



N° d'ordre : M ...../GCP/2020

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER PROFESSIONNALISANT

**Filière :** Génie civil .

**Spécialité :** Efficacité Energétique des Bâtiments .

### *Thème*

**INFLUENCE DES DECHETS NATURELS SUR L'EFFICACITE THERMIQUE DES  
MORTIERS**

**Présenté par :**

HADJ ALI Amira

*Soutenu le .. / .. / 2020 devant le jury composé de :*

**Président :** Mme Nadia BELAS

**Professeur** UMAB-Mostaganem

**Examineur:** Mr Omar BELARIBI

**MCB** UMAB-Mostaganem

**Encadrant :** Mr Nasr Eddine BOUHAMOU

**Professeur** UMAB-Mostaganem

**Année Universitaire : 2019 / 2020**



## *Remerciements*

Tout d'abord, on remercie DIEU qui nous a donné la volonté et la force pour effectuer ce travail.

Toute ma gratitude à Mon encadrant Mr. BOUHAMOU Nasr-eddine pour ses orientations, ses conseils, pour son écoute et son encouragement.,

Et également mes remerciements sont exprimés :

Aux messieurs-dames les membres de jury " Mme Nadia BELAS et Mr Omar BELARIBI qui ont accepté de juger mon travail.

D'autre part je dresse mes plus vifs remerciements à tous les enseignants de Génie Civil.

Je souhaite ensuite remercier Mr. BELGHIT Abdelkadir qui m'a trop aidé dans mon travail, pour ses conseils, pour sa disponibilité et son soutien dès le début jusqu'à la fin.

Je souhaite aussi à exprimer ma gratitude à tous les membres de laboratoire et en particulier Mr. Eddebi Brahim pour sa gentillesse et son aide dans tous les travaux qu'on a effectués il était présent pour nous faciliter la tâche.

Ainsi que mon collègue Mr. AMMOURI Abdelkader et tous mes amis qui ont su être à mes côtés lorsque j'ai traversé des épreuves.

A ma mère

Par les inestimables sacrifices que tu as consentis pour moi, tu as tant souhaité que je parvienne à ce but.

Je te serai reconnaissante toute ma vie, qu'Allah t'accorde longue vie dans la santé !

A mon père

Grace à toi j'ai pu aller à l'école et choisir mon chemin de la vie .

Ma réussite est la tienne ! Qu'Allah t'accorde longue vie dans la santé !

A tous ceux qui m'ont aidés pour la réalisation de ce mémoire. Merci infiniment !

# Sommaire

---

## Sommaire

<i>Remerciements</i> .....	2
Resumé .....	12
<b>Summary</b> .....	13
ملخص.....	14
Introduction générale .....	15
Chapitre 1 : Notions générales sur la thermique des bâtiments .....	18
1-1 Confort Thermique .....	18
1-2 Paramètres Traditionnels du Confort Thermique.....	18
1-3 Phénomènes de conduction, convection et rayonnement .....	19
1-3-1 Conduction.....	19
1-3-2 Convection : .....	20
1-3-3 Rayonnement : .....	21
1-4 Fuite de chaleur – Flux thermique : $\phi$ .....	21
1-4-1 Définition.....	21
1-5 Conductivité thermique : $\lambda$ .....	22
1-5-1 Définition.....	22
1-6 Résistance thermique d'un matériau : $R$ .....	23
1-6-1 Définition.....	23
1-7 Isolation thermique .....	24
1-8 Réglementation thermique dans les bâtiments.....	25
1-9 Isolation thermique en Algérie.....	25
1-10 Réglementation Thermique Algérienne.....	26
1-10-1 vérification d'hiver (DTR C3-2).....	26

# Sommaire

---

1-10-2 vérification d'été (DTR C3-4).....	26
1-11 Conclusion .....	26
Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques .....	27
2-1 La pouzzolane .....	27
2-1-1 Historiques des pouzzolanes .....	27
2-1-1-1 Dans le monde.....	27
2-1-1-2 En Algérie .....	28
2-1-2 Pouzzolane naturelle.....	29
2-1-2-1 Matériaux d'origine volcanique (Les roches Pyroclastiques).....	29
2-1-2-2 Matériaux d'origine sédimentaire .....	30
2-1-2-3 Matériaux d'origine mixte (roche hybride:) .....	31
2-1-3 Pouzzolane artificielle .....	32
2-1-3-1 Cendres volantes .....	32
2-1-3-2 Argiles, Schistes, Terres de diatomées torréfiées .....	33
2-1-4-Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes : .....	34
Indice d'activité .....	34
Teneur en verre .....	34
Propriétés hydrauliques : .....	35
Propriétés physiques de remplissage .....	35
2-1-5 Activité pouzzolanique .....	35
2-1-5-1 Estimation de l'activité pouzzolanique .....	36
2-1-5-2 Nature des hydrates formés lors de la réaction pouzzolanique : .....	36
2-1-5-2-1 Hydratation des ciments aux pouzzolanes : .....	36
2-1-6- Comportement de La pouzzolane .....	38
2-1-6-1-A l'état frais .....	38

# Sommaire

---

2-1-2-1-B A l'état durci .....	38
2-2 la vase .....	39
2-2-1 Définition et origine des sédiments .....	39
2-2-2 Problème d'envasement.....	39
2-2-3 Gestion des boues de dragage .....	40
2-2-4 Débouchés potentiels en valorisation : .....	41
2-2-5 Valorisation dans le génie civil.....	41
2-2-6 Valorisation de la vase dans les ciments pouzzolaniques.....	42
2-2-6-1 Calcination.....	42
2-2-6-1-1 Calcination flash .....	43
2-2-6-1-2 Calcination lente .....	43
3-2 Comportement des bétons et mortiers à base de pouzzolane.....	44
Problématique .....	51
Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers	
Pouzzolaniques .....	53
3-1 Objectifs.....	53
3-2 Matériaux utilisés .....	54
3-2-1 le ciment.....	54
3-2-2 La pouzzolane naturelle.....	55
3-2-3 Perlite.....	56
3-2-4 Le sable.....	57
3-2-5 L'eau de gâchage.....	58
3-3 Formulation des mortiers.....	59
3-3-1 Formulation des mortiers.....	59
3-3-2 Préparation des mortiers .....	60

# Sommaire

---

3-4 Compagne Expérimentale.....	61
3-4-1 Les essais sur les différents mortiers à l'état frai .....	61
3-4-1-1 Essai de consistance et de prise.....	61
3-4-1-2 Maniabilité des mortiers frais .....	64
3-4-2 Les essais sur les différents mortiers à l'état durcis .....	66
3-4-2-1 Essais mécaniques.....	66
3-4-2-1-1 Résistance à la compression des mortiers durcis .....	66
3-4-2-1-2 Résistance à la traction des mortiers à l'état durcis .....	68
3-4-2-2 Essais Thermiques.....	69
3-4-2-2-1 Mesure de la conductivité thermique des mortiers à l'air libre .....	70
3-4-2-2-2 Mesure de la conductivité thermique des mortiers conservée dans l'eau .....	71
3-4-2-2-3 Mesure de la résistance thermique (Rth) des mortiers à l'air libre et dans l'eau..	72
3-4-2-2-4 Comparaison entre la résistance thermique (Rth) et la conductivité thermique des mortiers à l'air libre et dans l'eau .....	73
3-5 Bilan .....	76
3-6 Conclusion .....	77
Chapitre 4 : Etude des caractéristiques thermiques de bétons de granulats légers de la pouzzolane du moyen Atlas .....	79
4-1 Objectif .....	79
4-2 Introduction.....	79
4-3 Etude expérimentale .....	80
4-3-1 Mesure de la conductivité thermique .....	80
4-3-1-1 Technique de mesure.....	81
4-3-2 Mesure de la capacité calorifique de la pouzzolane en poudre : Méthode du calorimètre différentiel .....	83

# Sommaire

---

4-3-2-1 Technique de mesure .....	84
4-3-2-2 Principe de la détermination du Cp .....	85
4-4 Résultats.....	85
4-5 Discussion.....	87
4-6 Conclusion .....	88
Chapitre 5: Identification des Matériaux Utilisés .....	89
5-1 Le ciment .....	89
5-2 La Vase .....	91
5-2-1 Caractéristique physiques de la vase .....	94
5-3 Pouzzolane Naturelle.....	95
5-4 Les sables .....	97
Conclusion générale .....	99
Références bibliographiques.....	102

# Liste de figures

---

## Liste des figures

<b>Figure 1</b> : Paramètres traditionnels du confort thermique.....	19
<b>Figure 2</b> : Phénomène de conduction dans une paroi. ....	20
<b>Figure 3</b> : Phénomène de convection dans une paroi. ....	20
<b>Figure 4</b> : Phénomène de rayonnement dans une paroi. ....	21
<b>Figure 5</b> : Flux de chaleur. ....	22
<b>Figure 6</b> : La conductivité thermique d'un matériau. ....	23
<b>Figure 7</b> : La résistance thermique. ....	23
<b>Figure 8</b> : Barrage de Fergoug . ....	40
<b>Figure 9</b> : Température du four en fonction du temps. ....	43
<b>Figure 10</b> : Spectre RDX de la perlite de Hammam Bouhrara. ....	57
<b>Figure 11</b> : Courbe granulaire des sables corrigés. ....	58
<b>Figure 12</b> : Variation de la consistance des pâtes de ciment en fonction des teneurs. ....	62
<b>Figure 13</b> : Variation de temps de prise des pâtes de ciment en fonction des différentes teneurs pouzzolaniques. ....	63
<b>Figure 14</b> : Variation de l'étalement en fonction des différentes teneurs pouzzolaniques. ....	66
<b>Figure 15</b> : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers dans l'eau saturée en chaux. ....	67
<b>Figure 16</b> : Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des mortiers dans l'eau saturée en chaux.....	69
<b>Figure 17</b> : Variation de la conductivité thermique en fonction du temps des mortiers à l'air libre. ....	70
<b>Figure 18</b> : Variation de la conductivité thermique en fonction du temps des mortiers conservés dans l'eau.....	71
<b>Figure 19</b> : Variation de la résistance thermique en fonction du temps conservés dans l'eau.....	72

## Liste de figures

---

<b>Figure 20:</b> Variation de la résistance thermique en fonction du temps à l'air libre.....	73
<b>Figure 21 :</b> Variation de la conductivité thermique, résistance thermique en fonction des teneurs pouzzolaniques conservé dans l'eau à 300 jours .....	74
<b>Figure 22 :</b> Variation de la conductivité thermique, résistance thermique en fonction des teneurs pouzzolaniques à l'air libre à 300 jours.....	75
<b>Figure 23 :</b> Méthode du plan Chaud.....	81
<b>Figure 24:</b> Principe de mesure du calorimètre différentiel.....	84
<b>Figure 25:</b> Capacité calorifique en fonction de la température.....	87
<b>Figure 26 :</b> Granulométrie de la vase calcinée de Chorfa [Laboratoire LAFARGE, Sig].....	95
<b>Figure 27 :</b> Courbe granulométrique du sable corrigé.....	98

## Liste des photos

---

### Liste des photos

<b>Photo 1</b> : Isolation thermique des bâtiments. ....	25
<b>Photo 2</b> : Pouzzolane naturelle d'origine volcanique. ....	29
<b>Photo 3</b> : _usage de la terre de diatomée de Sig. ALGERIE. ....	31
<b>Photo 4</b> : Les cendre volantes. ....	33
<b>Photo 5</b> : Argile, Schiste, Terre de diatomée. ....	33
<b>Photo 6</b> : Scories de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf avant broyage ....	55
<b>Photo 7</b> : Poudre de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf broyer à 80 µm. ....	55
<b>Photo 8</b> :Scories de la perlite de Hammam Boghrara avant broyage.....	56
<b>Photo 9</b> : Poudre de la perlite de Hammam Boghrara broyer à 80 µm. ....	56
<b>Photo 10</b> : Calorimètre différentiel.....	84
<b>Photo 11</b> : Four de calcination utilisé (+ 1200°C). ....	92
<b>Photo 12</b> : Vase après calcination (produit final). ....	93
<b>Photo 13</b> : Poudre de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf broyée à 80 µm. ....	96

# Liste des tableaux

---

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : Analyse chimique de quelques pouzzolanes volcaniques .....	29
<b>Tableau 2</b> : Analyse chimique de quelques pouzzolanes riche en Silice.....	31
<b>Tableau 3</b> : Composition chimique élémentaire du ciment CPA-CEM I 42,5.....	54
<b>Tableau 4</b> : Composition minéralogique du clinker.....	54
<b>Tableau 5</b> : Composition chimique élémentaire de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf.....	55
<b>Tableau 6</b> : Composition chimique élémentaire de la perlite de Hammam Bouhrara.....	57
<b>Tableau 7</b> : Caractéristiques physiques du sable.....	58
<b>Tableau 8</b> : Analyse chimique de l'eau de gâchage. ....	59
<b>Tableau 9</b> : Formulations des mortiers. ....	60
<b>Tableau 10</b> : Conduite des opérations du malaxage. ....	60
<b>Tableau 11</b> : Les essais de consistances, début et fin de prise des pâtes de ciment pouzzolaniques.....	61
<b>Tableau 12</b> : Influence de la pouzzolane naturelle sur la maniabilité des mortiers à E/C=0,50..	65
<b>Tableau 13</b> : Conductivité thermique du béton pouzzolanique.....	85
<b>Tableau 14</b> : Conductivité thermique du mortier pouzzolanique.....	86
<b>Tableau 15</b> : Composition chimique du ciment utilisé .....	90
<b>Tableau 16</b> : Composition minéralogique du clinker.....	90
<b>Tableau 17</b> : Caractéristiques physiques du CPA CEM1 42.5. ....	91
<b>Tableau 18</b> : Caractéristiques chimiques de la vase calcinée.....	93
<b>Tableau 19</b> : Caractéristiques physiques de la vase calcinée de Chorfa. ....	94
<b>Tableau 20</b> : Composition chimique élémentaire de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf.....	96
<b>Tableau 21</b> : Caractéristiques physiques de la Pouzzolane Naturelle de Béni-Saf.....	96
<b>Tableau 22</b> : Caractéristiques Physiques des sables utilisés.....	97

# Resumé

---

## Resumé

Les matrices cimentaires confectionnées avec une addition minérale ont fait l'objet de nombreuses études.

Toutefois aucune règle générale n'a encore été dégagée pour quantifier les effets de telles additions, vis-à-vis des performances des mortiers, car le mélange des différents matériaux n'est pas une opération simple, à cause des incompatibilités qui peuvent exister entre différents constituants. Par ailleurs, le mélange de matériaux compatibles ne conduit pas toujours aux mêmes résultats ; des interactions (ou interactivités) éventuelles peuvent exister entre les différents types de matériaux.

Ces interactions peuvent se manifester par des synergismes ou des antagonismes entre les constituants, et sont difficiles à détecter. Ainsi, peu d'études ont été effectuées pour mettre en évidence les interactions éventuelles entre les différents composants des mélanges cimentaires. Les chercheurs reconnaissent le besoin d'outils complexes et performants pour mener des études dans ce domaine.

L'objectif de cette étude est d'examiner l'utilisation de la pouzzolane naturelle, la pouzzolane de synthèse produit à partir de la vase et la perlite comme substitution partiel au ciment portland dans le mortier, et cela pour évaluer leurs effets sur les résistances mécaniques au jeune âge et les propriétés thermiques, dans un seul but de valoriser ces déchets dans l'industrie cimentaire.[1]

Les résultats trouvés particulièrement par Hamadache [31] seront un sujet de discussion dans cette étude, permettent de mettre en évidence l'effet bénéfique de la pouzzolane naturelle, la vase et la perlite comme isolant thermique en les comparants avec d'autres matériaux isolants.

Les matériaux cimentaires ont des caractéristiques chimiques, physiques, mécaniques et thermiques qui évoluent au cours du temps ; ce qui explique la complexité de leur comportement.

Parmi les objectifs atteints dans ce travail de recherche, on peut citer :

Le comportement mécanique (résistance à la compression et la résistance à la traction) et les propriétés thermiques des mortiers pouzzolaniques [31].

**Mots clés :** Pouzzolane naturelle, Perlite, Vase, Mortiers, Comportement mécanique, Corrosion, Conductivité thermique, Résistance thermique.

# Summary

---

## Summary

Cementitious matrices made with a mineral addition have been the subject of numerous studies.

However, no general rule has yet been drawn up to quantify the effects of such additions on the performance of mortars, because the mixing of the different materials is not a simple operation, due to the incompatibilities that may exist between different constituents. Moreover, the mixing of compatible materials does not always lead to the same results; possible interactions (or interactivity) may exist between different types of materials.

These interactions can manifest themselves as synergisms or antagonisms between constituents, and are difficult to detect. Thus, few studies have been carried out to highlight possible interactions between the different components of cement mixtures. Researchers recognize the need for complex and efficient tools to conduct studies in this field.

The objective of this study is to examine the use of natural pozzolan, synthetic pozzolan produced from silt and perlite as a partial substitute for portland cement in mortar, in order to evaluate their effects on early strength and thermal properties, with the sole aim of valorising these wastes in the cement industry [1].

The results found particularly by M. Hamadache [31] will be a subject of discussion in this study, allow to highlight the beneficial effect of natural pozzolan, mud and perlite as thermal insulator by comparing them with other insulating materials.

Cementitious materials have chemical, physical, mechanical and thermal characteristics that change over time, which explains the complexity of their behaviour.

Among the objectives achieved in this research work are the following:

The mechanical behaviour (compressive strength and tensile strength) and thermal properties of pozzolanic mortars [31].

**Keywords:** Natural pozzolan, Perlite, Mud, Mortars, Mechanical behaviour, Corrosion, Thermal conductivity, Thermal resistance.

### ملخص

كانت ولا تزال مصفوفات الاسمنت المتكونة من اضافات معدنية موضوعا لدراسات عديدة و مع ذلك, لم يتم بعد العثور على قاعدة لتقدير الاثار المترتبة على هذه الاضافات

كما ان خلط مواد مختلفة ليست عملية بسيطة, وذلك بسبب عدم التوافق الذي قد يكون موجودا بين مختلف المكونات بالاضافة الى ذلك فان مزيج المواد غير المتوافقة لا يؤدي دائما الى نفس النتائج, نظرا للتفاعلات الممكنة الموجودة بين مختلف المواد, والتي يصعب اكتشافها, وبالتالي فقد اجريت دراسات قليلة لتسليط الضوء على التفاعلات المحتملة بين مختلف مكونات الخلطات الاسمنتية و الملاطات

وكان الهدف من هذه الدراسة البحث عن استخدام البوزولان الطبيعية لبوزولان الصناعي المنتج من الطمي والبيرلايت كبديل جزئي للأسمنت البورتلاندي في الملاط, من أجل تقييم أثارها على القوة الميكانيكية على المدى القصير والخصائص الحرارية, بهدف استعادة هذه النفايات في صناعة الأسمنت [1]

ستكون موضوع نقاش في هذه الدراسة, مما يسمح بتسليط الضوء [31] M. Hamadache النتائج التي توصل إليها بشكل خاص على التأثير المفيد للبوزولان والطين والبيرلايت كعازل حراري من خلال مقارنتها مع المواد العازلة الأخرى

. تتميز المواد الإسمنتية بخصائص كيميائية وفيزيائية وميكانيكية وحرارية تتغير بمرور الوقت, وهو ما يفسر مدى تعقيد سلوكها من بين الأهداف التي تحققت في هذا العمل البحثي ما يلي

السلوك الميكانيكي (قوة الضغط وقوة الشد) والخواص الحرارية لملاط البوزولانتيك [31]

**كلمات البحث.** البوزولان الطبيعي, البيرلايت, الطين, الملاطات, السلوك الميكانيكي, التآكل, التوصيل الحراري, المقاومة الحرارية

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Grâce à leurs propriétés mécaniques et aux faibles coûts de fabrication par rapport à d'autres matériaux de construction, les matériaux cimentaires sont les plus utilisés dans le domaine du génie civil. À la frontière entre plusieurs domaines –la chimie, la physique et la mécanique –l'étude des phénomènes qui ont lieu dans les matériaux cimentaires a soulevé une multitude de questions et a généré plusieurs controverses.

Les matériaux à base de ciment sont des matériaux « vivants », avec des périodes bien définies dans leur vie. Le jeune âge commence avec le contact entre l'eau et le ciment qui provoque un enchaînement de réactions chimiques impliquant les phases anhydres du ciment. Le matériau passe d'un état fluide à un état solide, la microstructure commence à se définir, et le matériau gagne en résistance mécanique et en rigidité. Les matrices cimentaires confectionnées avec une addition minérale ont fait l'objet de nombreuses études.

Il a été estimé que la production d'une tonne de ciment portland entraîne la libération d'une tonne de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère. Le  $\text{CO}_2$  est connu pour être un gaz à effet de serre qui contribue au réchauffement de la planète, et seule l'industrie du ciment génère environ 7% de celui-ci. Ces points et ces chiffres semblent indiquer que l'industrie du béton est devenue une victime de son propre succès et est donc confronté à d'énormes défis. Le béton est en soi un matériau respectueux de l'environnement. Les défis sont donc essentiellement à réduire la production du ciment portland et ses répercussion sur l'environnement.

En d'autres termes, il faut utiliser des ajouts naturels tel que la pouzzolane naturelle ou des sous produits de différentes industrie comme les laitiers, les cendres volantes ou des déchets; en remplacement du ciment. Toutefois aucune règle générale n'a encore été dégagée pour quantifier les effets de telles additions, vis-à-vis des performances des mortiers, car le mélange des différents matériaux n'est pas une opération simple, à cause des incompatibilités qui peuvent exister entre différents constituants. Ainsi, peux d'études ont été effectuées pour mettre en évidence les interactions éventuelles entre les différents composants des mélanges cimentaires. Les chercheurs reconnaissent le besoin d'outils complexes et performants pour mener des études dans ce domaine.

# Introduction générale

---

Le recours aux ajouts naturels, aux déchets et aux sous produits industriels est lié aussi à la diminution des ressources mondiale en matière première et à l'augmentation de la consommation de la matière première, et enfin à la législation qui devient très sévère concernant la protection de la nature et l'environnement .L'étude des matériaux cimentaires permet d'aboutir vers une meilleure compréhension des phénomènes qui agissent au sein de leur microstructure fortement hétérogène, et d'un point de vue pratique, c'est un moyen d'assister le matériau pendant ses premiers jours et d'assurer une meilleure durabilité, donc une plus importante durée de vie du matériau durci. Effectivement, connaître le développement de la microstructure du matériau (de son squelette solide et de sa porosité), de ses propriétés thermiques et mécaniques, suivre l'ampleur des déformations qu'il subit à jeune âge et estimer sa capacité de fluer pour relâcher les contraintes développées, nous permet de connaître le risque de fissuration auquel il sera confronté au jeune âge.[1]

Le principal objectif de notre étude est d'évaluer expérimentalement l'influence de plusieurs combinaisons de la pouzzolane naturelle et la pouzzolane de synthèse (vase calcinée) sur les propriétés thermiques des mortiers à court terme du béton. Pour cela nous avons essayé de s'inspirer et en même temps de discuter le travail de recherche mené par **M. Hamadache [31]** en particulier ca qui a porté sur l'effet des ajouts pouzzolaniques sur les propriétés thermiques des mortiers.

**Le premier chapitre** se voue à faire une synthèse bibliographique et état de l'art d'une part, sur la thermique des bâtiments et le phénomène de transfert de chaleur en général, d'autre part sur l'isolation thermique et la réglementation thermique Algérienne.

**Le deuxième chapitre** est destiné à l'étude bibliographique sur les pouzzolanes naturelles et artificielles. Dans cette partie nous avons exposé les travaux réalisés sur les pouzzolanes et nous avons fait état de la plus parts des axes pilotés à ce jour pour la valorisation des sédiments (activité pouzzolanique, traitement thermique etc).

**Dans Le troisième chapitre** nous chercherons à partir des résultats obtenus par M. **Hamadache [31]** sur l'influence de la pouzzolane naturelle et la perlite sur les propriétés mécanique et thermique "résistances mécaniques, conductivité et résistance à la corrosion" des mortiers de comprendre plus précisément l'influence des additions minérales sur les propriétés thermiques des mortiers.

# Introduction générale

---

**Le quatrième chapitre** présente un état de l'art sur la valorisation d'un autre type d'ajout minéral provenant du moyen Atlas Marocain utilisé comme granulats légers et son influence sur la conductivité thermique et la capacité calorifique du béton.

**Le cinquième chapitre** concerne la phase expérimentale où sera exposée l'identification des matériaux qui devraient être utilisés dans notre étude de recherche.

Enfin, nous clôturons cette étude par une conclusion générale qui recouvrira les principaux résultats dégagés et les perspectives envisageables pour le futur.

# Chapitre 1 : Notions générales sur la thermique des bâtiments

---

## Chapitre 1 : Notions générales sur la thermique des bâtiments

### 1-1 Confort Thermique

Le confort thermique est défini comme "un état de satisfaction du corps vis-à-vis de l'environnement thermique", sans perturbation extérieure, en absence de sollicitations corporelles ou physiologiques: n'avoir ni trop froid, ni trop chaud, ne pas ressentir des courants d'airs. [2]

### 1-2 Paramètres Traditionnels du Confort Thermique

Le confort thermique est traditionnellement lié à 6 paramètres (figure 1) :

1. Le métabolisme, qui est la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de 36,7°C. Un métabolisme de travail correspondant à une activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos.
2. L'habillement, qui représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement.
3. La température ambiante de l'air  $T_a$ .
4. La température moyenne des parois  $T_p$ .
5. L'humidité relative de l'air (HR), qui est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température  $t_a$  et la quantité maximale d'eau contenue à la même température.
6. La vitesse de l'air, qui influence les échanges de chaleur par convection. Dans le bâtiment, les vitesses de l'air ne dépassent généralement pas 0,2 m/s.

Notez que de façon simplifiée, on définit une température de confort ressentie (appelée aussi "température opérative" ou "température résultante sèche") :

$$T^{\circ}\text{opérative} = (T^{\circ}\text{air} + T^{\circ}\text{parois}) / 2$$

# Chapitre 1 : Notions générales sur la thermique des bâtiments

Cette relation simple s'applique pour autant que la vitesse de l'air ne dépasse pas 0,2 m/s [3].

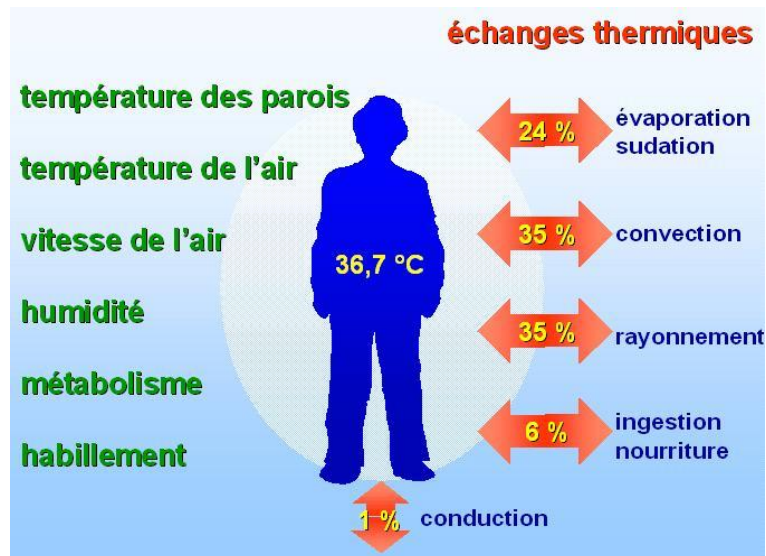


Figure 1: Paramètres traditionnels du confort thermique [4].

## 1-3 Phénomènes de conduction, convection et rayonnement

Lorsque deux éléments sont à des températures différentes, un échange de chaleur s'établit jusqu'à ce que les températures des deux éléments soient identiques. La chaleur va toujours du corps chaud vers le corps froid. Il est impossible d'empêcher ce phénomène d'échange, le but de l'isolation est donc de le freiner fortement. Dans le domaine du bâtiment, les échanges de chaleur se font principalement selon 3 modes de transmission : la conduction (majoritaire), la convection et le rayonnement [5].

### 1-3-1 Conduction

Comme indiqué sur la figure 2, la transmission d'énergie de proche en proche dans la partie solide d'un matériau. La chaleur se propage avec plus ou moins de facilité suivant la nature, les caractéristiques (résistances thermiques...) et la géométrie du matériau.

# Chapitre 1 : Notions générales sur la thermique des bâtiments

---

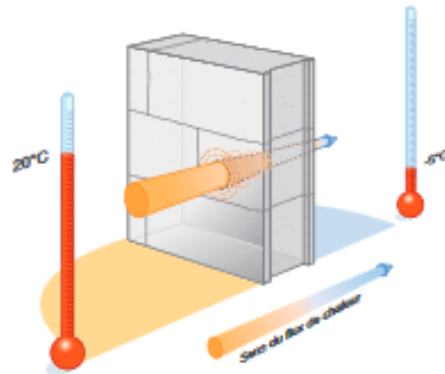


Figure 2 : Phénomène de conduction dans une paroi.

**Plus le matériau est isolant moins il y a de conduction.**

## 1-3-2 Convection :

Ce mécanisme de transfert de chaleur est propre aux fluides (gaz ou liquide). au contact d'un élément chaud le fluide, de l'air par exemple, se met en mouvement et se déplace vers l'élément froid au contact duquel il perd sa chaleur créant ainsi un mouvement vertical qui accélère les échanges thermiques entre les 2 éléments (figure 3).

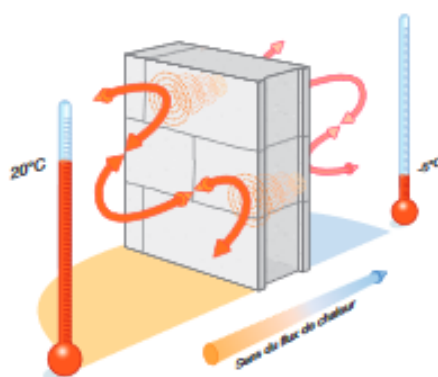


Figure 3 : Phénomène de convection dans une paroi.

**Plus l'air est immobile moins il y a de convection.**

# Chapitre 1 : Notions générales sur la thermique des bâtiments

---

## 1-3-3 Rayonnement :

C'est le transfert de chaleur d'un élément à un autre par onde électromagnétique sans contact direct. Ce type de transfert ne nécessite pas de support matériel il peut se produire même dans le vide (figure 4).

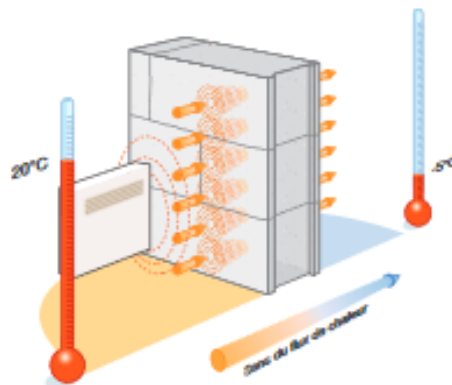


Figure 4 : Phénomène de rayonnement dans une paroi.

**Plus l'émissivité du matériau est faible moins il y aura de transfert par rayonnement.**

## 1-4 Fuite de chaleur – Flux thermique : $\phi$

### 1-4-1 Définition

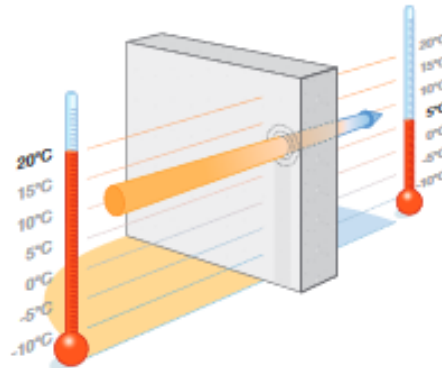
Le flux de chaleur  $\phi$  (phi) est la quantité d'énergie ou de chaleur passant au travers de  $1\text{m}^2$  de paroi pendant une seconde lorsqu'il existe un écart de température entre ses 2 faces (figure 5). Il s'exprime en  $\text{W}/\text{m}^2$ .

$$\phi = \lambda x \frac{\Delta T}{e}$$

Avec  $\lambda$  la conductivité thermique ;  $\Delta T$  l'écart de température et  $e$  l'épaisseur de la paroi.

# Chapitre 1 : Notions générales sur la thermique des bâtiments

---



**Figure 5 :** Flux de chaleur.

La quantité de chaleur s'échappant d'une paroi simple diminue : lorsque la conductivité thermique décroît, lorsque l'écart de température entre les 2 faces de la paroi diminue et lorsque l'épaisseur de la paroi augmente. Dans le domaine du bâtiment, les leviers pour limiter la fuite de chaleur sont la diminution de la valeur de la conductivité thermique et l'optimisation de l'épaisseur des parois [5].

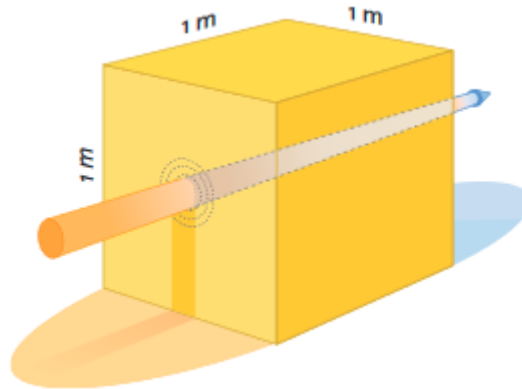
## **1-5 Conductivité thermique : $\lambda$**

### **1-5-1 Définition**

La conductivité thermique est la quantité d'énergie traversant  $1\text{m}^2$  de matériau d'un mètre d'épaisseur et, pour une différence de 1 degré de température. Elle s'exprime en  $\text{W}/(\text{m.K})$ . Elle représente l'aptitude du matériau à se laisser traverser par la chaleur. C'est une caractéristique constante intrinsèque aux matériaux homogènes (figure 6) [5].

# Chapitre 1 : Notions générales sur la thermique des bâtiments

---



**Figure 6 :** La conductivité thermique d'un matériau.

**Plus la conductivité est faible plus un matériau est isolant.**

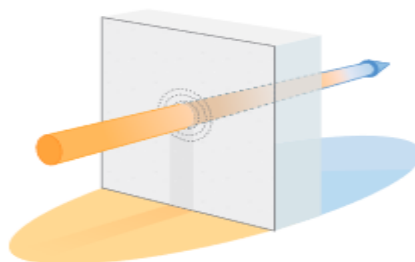
## 1-6 Résistance thermique d'un matériau : R

### 1-6-1 Définition

La résistance thermique d'un matériau caractérise sa capacité à ralentir le transfert de chaleur réalisé par conduction. Elle s'exprime en  $m^2.K/W$  (figure 7). Elle est calculée avec la formule suivante :

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Avec R : résistance thermique en  $m^2.K/W$  , e : épaisseur du matériau en mètre,  $\lambda$  : conductivité thermique du matériau en  $W/(m.K)$  [4].



# Chapitre 1 : Notions générales sur la thermique des bâtiments

---

**Figure 7 : La résistance thermique.**

**Plus la résistance thermique est élevée plus le matériau est isolant.**

## 1-7 Isolation thermique

L'isolation thermique est un facteur essentiel à la maîtrise énergétique du bâtiment. Les pertes de chaleur à travers les murs extérieurs et les toits sont responsables de plus de 70% des pertes de chaleur dans les constructions actuelles. Elle conduit à un meilleur confort et une protection améliorée du bâtiment (photo 1) [6].

Elle est une « barrière à chaleur ». Elle vise à conserver la chaleur (ou la fraîcheur) à l'intérieur des espaces de vie ; l'hiver, elle empêche la chaleur de s'évacuer des logements chauffés ; l'été, elle empêche de pénétrer à l'intérieur. Une bonne isolation augmente donc le confort, hiver comme été, et permet de faire des économies importantes de chauffage ou de climatisation [7].

Pour une meilleure isolation thermique il faut penser à : -L'épaisseur de l'isolant et sa position dans le mur -Les matériaux de construction utilisés Dans le cas d'un bâtiment bien isolé, les ponts thermiques peuvent entraîner des déperditions de chaleur proportionnellement très importantes par rapport aux déperditions totales [6].

## Chapitre 1 : Notions générales sur la thermique des bâtiments

---



**Photo 1 :** Isolation thermique des bâtiments [7].

### 1-8 Réglementation thermique dans les bâtiments

La réglementation thermique est un ensemble de lois visant à la maîtrise de l'énergie dans le bâtiment, ceci pour assurer le confort des occupants du bâtiment et réduire les émissions de polluants locaux et globaux et diminuer les charges d'exploitation des locaux (notamment le chauffage). Les enjeux de la réglementation thermique sont économiques pour réduire la facture énergétique. Enjeux environnementaux pour réduire l'effet de serre dans le cadre des accords de *Rio* et du protocole de *kyoto*. Enjeux sociaux pour assurer un meilleur confort des personnes.[8]

### 1-9 Isolation thermique en Algérie

La réglementation thermique de 1997 des bâtiments à usage d'habitation a été conçue pour réduire la consommation de chauffage de l'ordre de 25%. Une réflexion est engagée actuellement pour porter ce niveau d'économie à plus de 40%.

La réglementation Algérienne s'inspire en grande partie de la réglementation française, par contre les méthodes de calcul utilisées sont plus simples, elle autorise, tout du moins dans certaines limites, le calcul informatisé des besoins de chauffage. Ceci est un point positif puisque cela permet

# Chapitre 1 : Notions générales sur la thermique des bâtiments

---

de profiter de l'inertie thermique d'un bâtiment ; un facteur très important étant donné le type de climat et de construction existante diffère en Algérie [9].

## 1-10 Réglementation Thermique Algérienne

La réglementation thermique algérienne est basée sur deux documents techniques réglementaires (DTR). Le premier DTR est relatif à la période d'hiver, alors que le deuxième concerne la période d'été.

L'exigence réglementaire sur laquelle s'appuie le DTR consiste à limiter les déperditions calorifiques des logements en fixant un seuil à ne pas dépasser (appelé déperditions de référence).

### 1-10-1 vérification d'hiver (DTR C3-2)

Ce DTR concerne la période d'hiver. Il stipule que les déperditions calorifiques par transmission à travers les parois calculées pour la période d'hiver doivent être inférieures à une valeur de référence.

### 1-10-2 vérification d'été (DTR C3-4)

Ce deuxième DTR est réservé à la période d'été et mentionne que les apports de chaleurs à travers les parois (opaques et vitrées) calculés à 15 h du mois de juillet (considéré comme le mois le plus chaud de l'année) doivent être inférieurs à une limite appelée « Apport de Référence » [9].

## 1-11 Conclusion

Le confort d'une habitation nécessite une étude approfondie de sa construction. Il faut tout d'abord étudier les matériaux nécessaires et utiles pour avoir une isolation thermique pendant les périodes de l'été et de l'hiver puis parvenir à développer les structures en renouvelant les matériaux contre la chaleur, l'humidité, le froid.

Les matériaux de construction utilisés dans notre pays doivent être conformes aux normes internationales afin de réduire les dépenses en énergie et surtout améliorer le confort des occupants des immeubles par l'amélioration des structures de l'isolation. [8]

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

### Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

#### 2-1 La pouzzolane

##### 2-1-1 Historiques des pouzzolanes

###### 2-1-1-1 *Dans le monde*

Le béton existe dans la nature sous forme de poudingues calcaires et siliceux, mais c'est aussi un matériau très ancien puisque la maçonnerie romaine était faite de cailloux noyés dans un mortier à base de pouzzolanes volcaniques avec la chaux et de l'eau, d'une extraordinaire tenue dans le temps.

En effet pour leurs différentes constructions les Romains utilisaient la pouzzolane (tuf zéolite qu'ils trouvaient dans la baie de Naples, au pied du mont Vésuve, à Pouzzoles, d'où le nom de pouzzolane sous lequel est connu ce matériau), qui mélangée à de la chaux grasse donnait un mortier très résistant et durable : c'était là le secret de leur « ciment ».

La célébrité « des ciments » romains était finalement due à l'exploitation consciente de l'effet pouzzolanique, mais ils n'ont pas été les seuls à les découvrir. En effet, dans l'île de Bali, à l'est de Java (Indonésie), les habitants utilisent depuis plus de deux mille ans, pour construire les murets de leurs rizières en terrasse, un mélange de chaux, corallienne, cuite au feu de noix de coco, et de cendres de leur volcan sacré, l'Agung, qu'ils retrouvent dans les parties fines de sables de leurs rivières. Certains de ces murets, toujours en service, sont bien antérieurs à Jésus-Christ.

Les murs du panthéon, célèbre temple de Rome (construit en 27 av. J.C.), ont été jointoyés par un mortier constitué d'un mélange de chaux et de pouzzolane ; de même, pour la construction de son dôme, les romains ont utilisé un mortier à base de pouzzolane.

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

On sait que les grecs mélangeaient la chaux grasse avec des cendres volcaniques de l'île de Santorin, ils obtenaient ainsi de véritables liants hydrauliques. On a retrouvé dans ces pays d'anciens mortiers ou bétons de chaux à la pouzzolane. Entre l'an 700 et l'an 600 Av. J. C., dans la ville grecque antique de Camiros située dans l'île de Rhodes, un béton contenant de la pouzzolane naturelle et de la chaux avait été utilisé pour garnir les parois d'un réservoir à l'eau.

Au moyen âge, on ajoutait à la chaux des cendres pour construire les habitations. On ajoutait également à la chaux des tuiles et de la brique pilée, des déchets de poterie, des mâchefers de foyers domestiques.

Le pont du Gard en France est un exemple d'utilisation ancienne d'un mélange de chaux et de pouzzolane (pour jointoyer les pierres).

Les ciments pouzzolano- métallurgiques ont été fabriqués pour la première fois en France, en 1951. Ces ciments résultent du broyage de clinker, de gypse, de laitier et de cendres volantes. En Italie, la fabrication industrielle d'un ciment pouzzolanique a commencé dès 1923. [10]

### *2-1-1-2 En Algérie*

Dés la fin de l'époque tertiaire, la côte oranaise fut le siège d'une activité volcanisme et passe d'une nature acide à un volcanisme basique où les formations basaltiques prédominent.

L'activité volcanique du tell oranais est manifestée presque entièrement dans sa partie côtière durant la période comprise entre la fin du miocène et le quaternaire. Cette activité est liée à la seconde phase de l'activité tectonique, phase de la tectonique cassante.

Les premières études sur le volcanisme de la Basse-Tafna remontent à 1874 lorsque Velain donne une très courte description pétrographique du matériel éruptif et signale entre autre une néphéline dans l'île de Rachgoun qui a également été décrite par Lacroix (1983).

Grâce à cette activité volcanique, l'Algérie possède une quantité appréciable de matériaux pouzzolaniques d'origine volcanique qui s'étend de façon sporadique sur une longueur de 160 km entre la frontière Algéro-Marocaine et le Sahel d'Oran.

Dés 1985, et après une étude sur les matériaux pouzzolaniques du gisement de Bou- Hamidi (situé à 2 Km 500 au sud de Béni-Saf), l'unité FER-PHOS entreprit l'exploitation de cette

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

pouzzolane et grâce à la ligne ferroviaire Béni-Saf - Ain Temouchent, elle est expédiée vers Zahana, Saïda, Chlef et d'autres régions du territoire Algérien. [11]

### 2-1-2 Pouzzolane naturelle

#### 2-1-2-1 Matériaux d'origine volcanique (Les roches Pyroclastiques)

Les roches pyroclastiques (photo 2) résultent des éruptions volcaniques explosives qui projettent les particules minuscules du magma fondu dans l'atmosphère. La diminution rapide de pression se produisant pendant l'éruption conduit à libérer le gaz dissous dans le magma liquide. Par conséquent, chaque particule contiendra un certain nombre de bulles et de conduits microscopiques formant une structure microporeuse. Simultanément, les particules sont sujettes à une trempe qui est responsable de leur état vitreux. Le matériau peut être déposé au sol ou dans l'eau. Généralement, les dépôts au sol, qui sont lâches et hétérogènes, se composent de cendres mélangées aux fragments venant des murs des conduits volcaniques ou de la base du volcan. [12]



Photo 2 : Pouzzolane naturelle d'origine volcanique

Tableau 1 : Analyse chimique de quelques pouzzolanes volcaniques [12]

Pouzzolane	pays	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	P.F
Bacoli	Italie	53.08	17.89	4,29	9.05	1.23	3.08	7.61	0.31	0.65	3.05
Barile	Italie	44.07	19,18	9.81	12.25	6.66	1.64	1.12	0.97	Tr*	4.42
Salone	Italie	46.84	18.44	10.25	8.52	4.75	1.02	6.35	0.06	Tr	3.82

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

Vizzini	Italie	50.48	16.77	11.59	4.86	5.24	0.87	0.17	0.08	0.15	9.68
Volvic	France	54.30	16.80	/	/	/	4.47	2.6	/	/	/
Santorin carth	Grèce	65.1	14.5	5.5	3.0	1.1	/	/	/	/	3.5
Rhine tuffash	Allemagne	58,91	19.53	2.85	2.48	1.33	6.12	4.53	/	/	2.21
Rhyolite pumicite	USA	65.74	15.89	2.54	3.35	1.33	4.97	1.92	/	/	3.43
Furue shirasu	Japon	69.34	14.56	1.02	2.61	/	3.00	2.39	0.25	/	1.85
Higashi Matsuyama	Japon	71.77	11.46	1.14	1.10	0.54	1.53	2.55	0.14	/	6.50

### 2-1-2-2 Matériaux d'origine sédimentaire

Les argiles et les terres de diatomées sont des roches sédimentaires capables de se combiner avec la chaux. Les premières proviennent du changement de roches magmatiques tandis que les dernières se forment à partir des squelettes siliceux des micro-organismes (diatomées) déposés en eaux douces ou de mer. Puisque les deux matériaux (matières) résultent de la déposition dans l'eau malgré leur origine différente, il n'est pas étonnant que les diatomées et les minerais d'argile se produisent mélangés ensemble. Les minerais d'argile, particulièrement ceux qui appartiennent au groupe de montmorillonite, peuvent réagir avec la chaux donnant des hydrates de silicate et d'aluminate de calcium mais ils ne peuvent pas remplacer la pouzzolane à mesure qu'ils augmentent la demande en eau et abaissent la résistance du mortier et du béton.

Le plus grand dépôt de diatomites se trouve en Californie, aux USA. D'autres dépôts importants se trouvent en ancienne URSS, au Canada, en Algérie (photo 3), en l'Allemagne et dans d'autres pays.

[12]

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---



**Photo 3:** usage de la terre de diatomée de Sig. ALGERIE

### 2-1-2-3 Matériaux d'origine mixte (roche hybride:)

Au nord de Rome il y a les dépôts stratifiés d'une roche friable (Sacrofanite) composée de matériaux d'origine différente (volcanique, sédimentaire et organique). Les couches supérieures contiennent une teneur en silice jusqu'à 90 %, perte considérable au le feu et un peu d'autres oxydes. En ce qui concerne les couches plus profondes, la teneur en silice est sensiblement moindre, l'alumine peut atteindre environ 20%, mais d'autres oxydes sont présents seulement en petites quantités. La faible teneur en fer explique la couleur légère de ces matériaux, généralement connue sous le nom de « terre blanche ». [12]

**Tableau 2 :** Analyse chimique de quelques pouzzolanes riche en Silice [12]

Pouzzolane	pays	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P.F
Les terres de diatomé											
Moler	Danemark	75.6	8.62	6.72	/	1.1	1.34	0.43	1.42	1.38	2.15

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

Diatomite	USA	85.97	2.30	1.84	/	trace	0.61	0.21	0.21	/	8.29
Diatomite	USA	60.04	16.30	5.80	/	1.92	2.29	/	/	/	11.93
Origines mixtes											
Sacrofanite	Italie	85.50	3.02	0.44	1.22	0.58	/	0.16	0.26	0.77	7.94
Terre blanche(a)	Italie	90.00	2.70	0.70	/	0.20	/	/	/	/	6.10
Terre blanche(b)	Italie	84.25	4.50	1.55	/	2.40	/	/	/	/	8.40
Terre blanche(c)	Italie	78.40	12.20	1.50	/	1.55	/	/	/	/	8.60
Terre blanche(d)	Italie	56.80	21.40	1.70	/	2.35	/	/	/	/	7.50
Beppu avec argile	Japon	87.75	2.44	0.41	1.10	0.19	0.23	0.11	0.11	/	/
Gaise	France	79.55	7.10	3.20		2.40	1.04	/	/	0.86	5.90

### 2-1-3 Pouzzolane artificielle

#### 2-1-3-1 Cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que Celles-ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique. Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables.

Elles peuvent avoir une forme sphérique, avec une distribution granulométrique semblable à celle du ciment Portland, elles peuvent contenir des sphères creuses et même dans certains cas, elles peuvent contenir seulement des particules angulaires.

Les cendres volantes se divisent en trois catégories :

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

- les cendres silico- alumineuses (cendre de houille) ;
- les cendres sulfocalciques (cendre de lignite)
- les cendres non typifiées de composition irrégulière ou de propriétés assez incertaines. [10]



**Photo 4 :** Les cendre volantes

### **2-1-3-2 Argiles, Schistes, Terres de diatomées torréfiées**

Le chauffage des argiles, à des températures correspondant à celles de la démolition thermique des minéraux qui les caractérisent provoque la rupture du réseau et par conséquent la formation d'un mélange de silice et d'alumine amorphe, dans les proportions stœchiométriques des minéraux d'origine. Puisque l'accroissement du désordre structural entraîne l'augmentation de l'instabilité du système, on remarque une réactivité de la chaux et une perte de plasticité des Pâtes de ciment aux proportions convenables et peuvent révéler des résistances mécaniques de même ordre que celles qu'on peut obtenir par l'utilisation de pouzzolanes ou de cendres volantes. [10]



## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

**Photo 5** : Argile, Schiste, Terre de diatomée

### 2-1-4-Propriétés et caractéristiques des pouzzolanes :

Un matériau a la caractéristique d'une pouzzolane si :

- Sa composition chimique vérifiée :  $AL_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 > 70\%$  (ASTM C 618)
- Son indice d'activité **I** est :  $0,67 < \mathbf{I} < 1$ .
- Sa teneur en verre  $> 34\%$

#### *Indice d'activité*

C'est une caractéristique importante. Elle est calculée en faisant le rapport entre les résistances à la compression à 28 jours du mortier sans vase (T) et celle du mortier contenant 25% de vase (25 PA) en substitution par le biais de la formule suivante :

$$\mathbf{I = Rc28 T / Rc28 25PA}$$

#### *Teneur en verre*

La qualité d'une pouzzolane est liée à sa teneur en verre. Pour cela, il suffit de calculer, à partir de la composition chimique, la différence entre les teneurs brutes en silice et en chaux (Silice-Chaux). Lorsque cette différence est inférieure à une valeur seuil de 34%, les pouzzolanes ne comportent pas de phase vitreuse. Selon les compositions chimiques cette différence doit être au moins supérieure ou égale à 34% pour que les pouzzolanes soient acides et contiennent une phase vitreuse, donc capables de fixer la chaux libérée par le ciment. [13]

D'autre part, la reconnaissance séparée des propriétés de chacun des constituants ne permet pas de prévoir le comportement des mélanges. Seuls les résultats des essais de l'évolution des résistances mécaniques dans le temps permettent de conclure. [14]

On peut dans certains cas, activer les pouzzolanes par certains procédés :

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

- Ajouts des produits chimiques.
- Broyage à une finesse plus élevée.
- Traitement thermique.

En plus de ces caractéristiques, on cite les propriétés suivantes :

### *Propriétés hydrauliques :*

La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme.

### *Propriétés physiques de remplissage*

En plus de leur effet pouzzolaniques, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité.

### **2-1-5 Activité pouzzolanique**

L'activité pouzzolaniques ou pouzzolanité est l'aptitude de certains matériaux dépourvus de propriétés hydrauliques propres, à fixer l'hydroxyde de calcium en présence d'eau pour donner des hydrates analogues de ceux du ciment Portland. Cette propriété se constate à des degrés variables dans les matériaux riches en silice libre non quartzeuse, quelle que soit leur origine : matériaux naturels (gaize, diatomites, cendres volantes) matériaux artificiels (cendres volantes, fumées de silice, argiles calcinées, cendres de balles de riz).

L'action pouzzolanique se caractérise par deux aspects distincts: [10]

- La quantité totale d'hydroxyde de calcium qu'une pouzzolane est capable de fixer
- La rapidité de fixation d'hydroxyde de calcium par la pouzzolane.

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

### *2-1-5-1 Estimation de l'activité pouzzolanique*

L'estimation de l'activité pouzzolaniques de l'ajout est déterminée par plusieurs méthodes connues. Citons quelques unes : [10]

- Déterminations chimiques (L'indice d'activité Chapelle).
- Méthodes physiques.
- Essais mécaniques et analyses chimiques.
- Evaluation la pouzzolanité d'un mélange argile calcinée/ $\text{Ca}(\text{OH})_2 = 1$ .

### *2-1-5-2 Nature des hydrates formés lors de la réaction pouzzolanique :*

#### *2-1-5-2-1 Hydratation des ciments aux pouzzolanes :*

Un ciment composé à la pouzzolane doit satisfaire les spécifications de l'activité pouzzolanique. Notamment la résistance à la compression du ciment composé qui doit présenter un indice d'activité pouzzolanique au moins égal à 75% de la résistance du ciment Portland de référence à 28 jours selon la norme ASTM C618.

La réaction des constituants du ciment à base de pouzzolane se fait par l'intermédiaire d'un processus de dissolution des produits anhydres dans l'eau interstitielle suivi d'une cristallisation (ou une précipitation) des hydrates, par combinaison des ions présents dans la solution ainsi formée (théories de le Chatelier).

Les hydrates formés lors de la réaction pouzzolanique sont en général des minéraux mal cristallisés. La nature chimique de ces minéraux dépend : [10]

- des conditions d'hydratation des pâtes mixtes (température, teneur en eau,...)
- de la nature cristallographique et composition chimique des matériaux pouzzolanique
- de la concentration des ions présents dans la solution.

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

L'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  libéré en grande quantité pendant l'hydratation du ciment Portland ne se combine pas toujours sous forme d'hydrate et reste disponible pour d'autres réactions avec d'autres composants du ciment, il présente la principale source d'alcalinité pour l'activité hydraulique nécessaire à la conversion de  $\text{SiO}_2$  de la pouzzolane en C-S-H.

Les hydrates formés lors de la réaction d'hydratation d'un ciment portland sont pratiquement des C-S-H amorphes et non stœchiométriques contenant une quantité d'atomes d'aluminium moins importante que Les C-S-H formés lors de la réaction pouzzolanique. [15]

La vitesse d'hydratation des composés minéraux est d'autant plus grande que la température de conservation des pâtes mixte est élevée. Blombled [15] a étudié l'impact de la température sur la formation des produits hydratés lors de la réaction pouzzolanique entre l'argile calcinée et l'hydroxyde de calcium.

Les principaux produits d'hydratation à  $20^\circ\text{C}$  sont :  $\text{C}_2\text{ASH}_8$ , C-S-H,  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  et  $\text{C}_3\text{AH}_6$ , C-S-H et  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  à  $55^\circ\text{C}$ . **Dron [16]** admet que la nature des phases hydratées formées dépend de la quantité d'hydroxyde de calcium. Lorsque le pourcentage d'hydroxyde de calcium est supérieur ou égal à 60%, les produits d'hydratation des pouzzolanes sont CH, C-S-H et  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ , sinon, pour des pourcentages d'hydroxyde de calcium moindres, les hydrates formés sont C-S-H,  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ,  $\text{C}_2\text{ASH}_8$ .

De plus d'après **Barron et al [17]**, le  $\text{C}_2\text{ASH}_8$  (géhlénite hydratée) se décompose en présence d'une solution saturée en hydroxyde de calcium en C-S-H et  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  stable selon l'équation suivante :



Aussi selon plusieurs travaux de recherches effectués par **Barron et al [17]**, ils affirment que la cinétique de l'hydratation des ciments aux pouzzolanes se fait en deux phases.

La première phase est très rapide, est due à la réaction des alcalins ( $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{Na}_2\text{O}$ ) produits par l'hydratation du ciment Portland.

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

La deuxième phase est lente est due aux réactions d'hydroxyde de calcium lors de l'hydratation des pouzzolanes.[10]

### 2-1-6- Comportement de La pouzzolane

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes :

#### 2-1-6-1-A l'état frais

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation. Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration.

#### 2-1-2-1-B 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.

- 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.

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

En effet, les eaux naturelles contiennent souvent du gaz carbonique libre. Celui-ci s'attaque à l'hydroxyde de calcium contenu dans la pâte de ciment en le solubilisant. Il en résulte une augmentation de la porosité et donc une diminution générale de la résistance. [10]

### 2-2 la vase

#### 2-2-1 Définition et origine des sédiments

Appelés communément vases, les sédiments marins et fluviaux sont constitués de phases minérale, organique et liquide. Dans le dictionnaire de géologie, les sédiments sont définis comme "un ensemble constitué par la réunion de particules plus ou moins grosses ou de matières précipitées ayant, séparément, subi un certain transport". Ces particules proviennent de l'érosion des roches et des sols, de l'activité organique (accumulation de coquilles, ...) ainsi que des rejets locaux dus à l'activité humaine [18]

#### 2-2-2 Problème d'envasement

L'envasement des retenues est un état critique qui produit la diminution de la capacité de stockage des barrages. Il est la conséquence naturelle de la dégradation des bassins versants. Ce problème est très actif dans les pays à climat aride ou semi-aride.

L'Algérie se caractérise par un climat semi aride, qui perd annuellement un volume de stockage de l'eau de l'ordre de 32 millions de m<sup>3</sup> sur un volume de 5,2 milliards de m<sup>3</sup> des 114 barrages en exploitation. Un des barrages envasés en Algérie qui fait l'objet de notre étude est le barrage de Fergoug qui est situé au nord-ouest de l'Algérie. Les terrains vulnérables de formations géologiques marneuses de cette région sont soumis à une érosion accélérée. L'envasement des retenues est lié directement aux phénomènes de *l'érosion*. Les processus de la dégradation des terres ont pris des dimensions inquiétantes pour la gestion durable de l'environnement, plus de 16 % des terres cultivables ont été dégradées par l'érosion hydrique (55%) et éolienne (28%), [10]

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

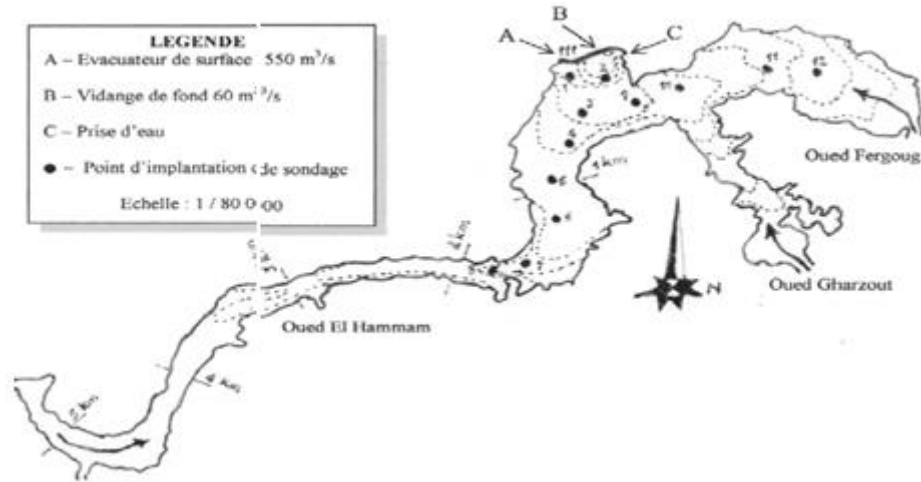


Figure 8 : Barrage de Fergoug

### 2-2-3 Gestion des boues de dragage

Une bonne gestion des déchets de dragage nécessite à trouver la meilleure solution à moindre coût en tenant compte des critères techniques, industriels et économiques. Dans ce cas, il faut créer de nouveaux procédés et techniques moins polluants pour remplacer les déchets. On peut imaginer la valorisation soit par réemploi ou par réutilisation du déchet, soit par traitement visant à obtenir de nouveaux matériaux. Ces trois aspects sont conditionnés par la valorisation des déchets en génie civil et doivent tenir compte des aspects suivants :

- Le tonnage : pour qu'un déchet soit valorisable, il faut que importante et homogène ;

sa production soit

- La rhéologie : les déchets possèdent des caractéristiques mécaniques et physiques spécifiques ;
- L'environnement : le déchet est acceptable pour l'environnement, s'il n'engendre pas de risques de pollution, que ce soit par l'exposition ou par lessivage.

Si aucune solution de valorisation n'est envisageable, on peut citer d'autres voies :

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

- Le rejet des déchets l'environnement ; dans le milieu naturel sans risque majeur de pollution pour
- Le stockage qui consiste à la mise en décharge ou à l'enfouissement technique des déchets. Dans ce cas, les conditions de stockage doivent assurer la protection complète et durable des milieux physiques et vivants.

Ces déchets imposent un cadre législatif jusqu'alors inexistant. Les différents règlements préconisent que seuls les déchets ultimes seront stockés en décharge. Les lois définissent les grands axes sur la diminution des décharges, sur la prévention et la réduction de la production et de la nocivité des déchets en agissant sur leur fabrication. [10]

### 2-2-4 Débouchés potentiels en valorisation :

Les débouchés potentiels en valorisation sont généralement classés parmi trois domaines :

- le génie civil et les travaux publics,
- l'agriculture par l'amendement des sols,
- la réhabilitation de sites naturels (habitats aquatiques et terrestres de la faune).

### 2-2-5 Valorisation dans le génie civil

Il existe de nombreuses voies de valorisation imaginables. Matériau de remplissage, de remblaiement, couche d'assise de chaussées, béton, brique. Il apparaît rapidement que la voie de valorisation béton est celle qui offre le plus de variantes possibles. Ne sachant pas quelles « performances » attendre du matériau valorisé, il était important d'avoir une grande liberté d'action. Le béton offre cette liberté : choix des quantités à substituer, du type de matériau à substituer (le liant, le sable ou les granulats), de la granulométrie, du type et de la quantité de liant à utiliser, des conditions de cures, des conditions d'utilisation. En fonction des résultats des études de valorisation nous disposons d'une large palette de paramètres sur lesquels il faut jouer pour parvenir à l'obtention d'un matériau valorisable. [10]

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

### 2-2-6 Valorisation de la vase dans les ciments pouzzolaniques

La valorisation de la vase dans le domaine des matériaux de construction se présente comme la solution écologique la plus adéquate pour l'exploitation des volumes très importants de la vase accumulée dans la retenue surtout dans le domaine des bétons pouzzolaniques et dans la construction des barrages vu les volumes importants que consomme la construction d'un barrage ce qui va influencer sur le prix de revient de l'ouvrage et par la suite sur le prix du mètre cube d'eau mobilisée.

D'autre part cette solution (valoriser la vase) aura les conséquences suivantes :

1. Réduction des coûts de l'opération de dévasement.
2. Augmenter le volume du réservoir pour répondre aux besoins de l'irrigation.
3. Répondre aux besoins croissants de matériaux de construction.

Un ciment pouzzolanique est un ciment constitué par l'addition d'une certaine quantité de clinker, à la pouzzolane. On sait que la pouzzolane est un produit qui n'est pas hydraulique par lui-même, mais qui est apte à fixer de la chaux aux températures ambiantes et à devenir de ce fait hydraulique ; d'où la constitution de ciments composés, ne comportant d'ailleurs que des matières actives, et qu'il ne faut pas confondre avec des ciments.[19]

#### 2-2-6-1 Calcination

La calcination est une technique de préparation d'échantillon utilisée en chimie analytique qui permet de prendre en compte ce phénomène. Elle consiste à chauffer l'échantillon sous air à haute température (typiquement 500 à 1000°C) pour provoquer des réactions physiques et chimiques et mettre ainsi l'échantillon dans un état de référence.

Pendant le chauffage, l'eau est perdue et un mélange de silice et d'alumine amorphes sera formé.

Pour valoriser les argiles, comme substituant partiel du clinker, le traitement thermique appliqué doit assurer la déshydroxylation tout en :

- Éliminant toutes les matières organiques incompatibles avec le ciment.
- Évitant la décarbonatation de la calcite néfaste pour la maniabilité des mortiers et bétons.

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

La calcination entre 550 et 800 °C des argiles permet le départ de l'eau de constitution (la déshydroxylation). La structure amorphe rend l'argile plus réactive que celle du départ à la chaux. Ce qui explique la forte diminution de la concentration en CaO de la solution. En présence de l'eau, la chaux réagit avec l'argile pour former des silicates, aluminates et aluminosilicates de calcium hydraté qui dépendent de la minéralogie des pouzzolanes et la solubilité des phases cristallines et non- cristallines.[20]

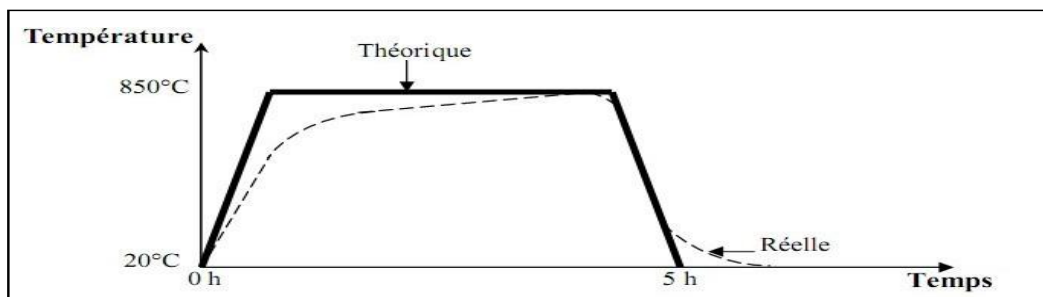
### 2-2-6-1-1 Calcination flash

La calcination flash, est une calcination très rapide d'un solide, généralement sous forme fine en suspension dans un gaz. La représentation de l'évolution de la température en fonction du temps permet d'obtenir l'historique thermique des particules.

Bien que la plupart des transformations chimiques et physiques aient une cinétique rapide à haute température, le temps très court de résidence dans le four mène à des transformations qui peuvent partiellement ne pas être terminées. Les changements sont cinétiquement bloqués et les produits incomplètement déshydroxylés si le temps d'exposition est trop court. Les propriétés des solides préparés sous ces procédés de chauffage flash, sont différentes de celles des matériaux traités dans des conditions de calcination où l'équilibre chimique et physique a pu être atteint.[21]

### 2-2-6-1-2 Calcination lente

Dans la calcination lente industrielle, la déshydroxylation est complète après avoir mené lentement l'échantillon à une température suffisamment haute (entre 600°C et 1100°C) pendant un degré suffisamment long (une voir plusieurs heures), comme le montre la figure 9. [21]



## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

**Figure 9** : Température du four en fonction du temps [21]

### 3-2 Comportement des bétons et mortiers à base de pouzzolane

**Laoufi. [22]** a étudié les caractéristiques physico-mécaniques des bétons à base de ciment pouzzolanique, il a montré dans son étude que :

Dans les premiers jours de l'hydratation, les performances mécaniques se développent plus rapidement pour le béton témoin que pour les bétons pouzzolaniques. Le béton témoin atteint à 7 jours plus de 79 % de sa résistance à 28 jours, alors que les bétons pouzzolaniques ne dépassent pas 73 % de leur résistance à 28 jours à la même date (73 % pour B.Z.25, 67,80 % pour B.Z.20 et même 64,70 % pour B.Z.30).

Au-delà de 7 jours, les bétons pouzzolaniques poursuivent leur évolution au profit de celle du béton témoin et dépassent même : tous les bétons pouzzolaniques améliorent leur résistance mécanique à 60 jours au profit de celle de béton témoin.

A 90 jours, tous les bétons pouzzolaniques évoluent nettement plus vite que celle du béton témoin.

Aux jeunes âges l'influence de la pouzzolane (à taux 20, 25 et 30 %) a donnée des valeurs de résistances à la traction relativement faible vis-à-vis du béton témoin.

Au-delà de ces âges, les taux de 20 et 25 % de pouzzolane ont le plus influence sur les résistances à la traction, puisque leur évolution est plus prononcée, les résistances finales à ces taux, à 90 jours, ne sont inférieurs que de 4,92 % et de 9,76% respectivement de la résistance de béton témoin au même âge.

Le taux de 30 % de pouzzolane donne des résultats de résistance en traction les plus faibles, la résistance maximale à 90 jours, pour ce taux n'est que d'environ 74% de la résistance de béton témoin à la même échéance.

**Kaid [23]** a analysé l'effet de l'ajout de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf et d'un adjuvant superplastifiant sur l'évolution des caractéristiques mécaniques et sur l'évolution du retrait libre

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

total des mortier desséchant conservés à une température de  $15\text{ °C} \pm 1\text{°C}$ , contenant 2 % de superplastifiant avec un pourcentage de 5%, 10% et 15%. Elle a montré que :

- l'ajout pouzzolanique a engendré, par rapport au mortier témoin ,une diminution de la résistance en compression et en traction aux jeunes âges, les mortier contenant 5% et 10 % de pouzzolane et 2 % de superplastifiant développent des résistances significatives au delà de 14 jours, de grandes résistances ont constatées entre 28 et 270 jours pour les mortier contenant 10% et 15 % de pouzzolane et 2 % de superplastifiant.
- Au-delà de 14 jours, la vitesse d'évolution du retrait total diminue et c'est le retrait du mortier témoin qui dépasse celui du mortier pouzzolanique, il atteint 25% de différence à l'âge de 3 moi.

**Berraih [24]** a conclu dans son travail de recherche que :

- Les résistances à la compression diminuent en général avec l'augmentation du pourcentage d'ajout de pouzzolane.
- A 3 et 7 jours, le mortier avec 5% de pouzzolane développe une résistance meilleure que le mortier témoin (100,36 % et 103,48%) respectivement, tandis que pour les dosages en pouzzolane allant de 10 à 20 % la diminution passe de 17% à 20% à l'âge de 3 jours et de 13% à 28 % à l'âge de 7 jours par rapport à celle du témoin.
- La perte de résistance varie de 6% et à 22% à 28 jours, de 10 % à 17% à 56 jours, de 3 % à 14% à 90 jours et de 5% à 13 % à 120 jours pour les mortiers avec 5% et 20 % respectivement.
- Les résistances à la flexion diminuent légèrement en général avec l'augmentation du pourcentage d'ajout de pouzzolane.
- Un pourcentage de substitution faible de 5% de pouzzolane ne diminue pas sensiblement les résistances à court terme et à long terme (93,8% à 3 jours, 101,5 % à 28 jours, 99.36% à 120 jours).
- Le mortier avec 10% de pouzzolane présente une perte de résistance en moyenne de 10 % à

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

court terme, et de 5% à long terme.

- Le mortier avec 20 % de pouzzolane présente une perte de résistance en moyenne de 21% à court terme, et de 8 % à long terme par rapport au mortier témoin.
- Dès 28 jours et pour une substitution allant de 5 à 20 %, les résistances à la flexion sont comparables, en effet à 120 jours, la perte de résistance ne dépasse pas 6 % pour une substitution de 20% par rapport au mortier témoin.

**Kerbouche [25]** a trouvé que la résistance à la compression au jeune âge des mortiers est réduite par l'incorporation de la pouzzolane naturelle, cette dernière s'améliore en fonction du temps et atteint son optimum à long terme. L'incorporation d'un taux de pouzzolane 30 % au CPA s'avère efficace puisque la résistance du mortier devient comparable à celle du mortier témoin.

**Mebrouki et al [26]** ont étudié le comportement mécanique de mortier incorporant une pouzzolane naturelle Algérienne, Ils ont montré que :

- Au jeune âge et jusqu'à 28 jours les résistances des différents mortiers sont inversement proportionnelles à la quantité de la pouzzolane substituée.
  - Au-delà de 28 jours, l'effet de la pouzzolane devient perceptible, puisque les résistances avec 10, 20 et 30 % de pouzzolane s'approchent (compression) ou dépassent (flexion) les résistances du béton témoin sans pouzzolane.
  - A long terme (après 60 jours), ces trois mélanges présentent des résistances supérieures à celle de béton témoin. Les mortiers contenant entre 0 et 40 % de pouzzolane développent des retraits évoluent dans un même fuseau.
  - A court terme (4 jours), le retrait diminue avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane.
- A moyen et long terme, l'utilisation entre 10 et 40 % de pouzzolane entraîne des retraits égaux ou inférieurs à ceux du témoin.

**Semcha[27]** dans son étude a comparé entre la pouzzolane artificielle à base de vase

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

calcinée et la pouzzolane naturelle de Béni-Saf. Il a confectionné des pates avec une substitution de 10, 15, 20, 25, 30 % de la pouzzolane naturelle et la vase calcinée.

Pour des pourcentages inférieurs à 20 % la pouzzolane naturelle donne des résistances plus élevées que la vase calciné, pour des pourcentages entre 20 et 30% les résistances pour la vase calcinée deviennent plus élevées.

Il a confectionnée par la suite des mortiers avec une substitution de 25% de la pouzzolane naturelle et la vase calcinée comparée à un béton témoin.

Le mortier à base de pouzzolane naturelle a un comportement proche de celui à base de ciment seul. Sa substitution au ciment constitue une économie sans en faire perdre les caractéristiques de résistance.

Le mortier à base de vase calcinée aux courtes échéances présente de plus faibles résistances, mais à 28 jours les valeurs obtenues ont dépassé celles de la pouzzolane naturelle et même que l'effet pouzzolanique s'est traduit par des résistances meilleures que celles du témoin.

**Besseghier[28]** a trouvé dans sa contribution comportement des bétons à base de vase calcinée que :

- Les résistances du béton avec 10 % de substitution de la vase calcinée est les meilleurs de tous les autres bétons à base de vase (15, 20%), et tendent en fin de parcours de rapprocher de celles du béton témoin.
- Les résistances au jeune âge sont d'autant plus faibles que le taux de vase substituée est élevée mais à des âges plus avancés (28 jours et plus ) ; elles ont tendance à rejoindre celle du béton témoin.
- A un jour le béton témoin affiche des performances mécaniques plus développées puisqu'il atteint plus de 50% de sa résistance à la compression à 28 jours, alors que les bétons à base de vase ne dépassent pas 43% de leur résistance à 28 jours et à la même date (43 % pour PV10, 40% pour BV15, 39% pour BV20).
- A 7 jours, le béton témoin développe plus 72% de sa résistance à la compression à 28 jours, alors que le BV 10 atteint 77%, le BV15 78% et le PV 20 78% de leur résistance à 28 jours à

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

la même date.

- A 60 et 90 jours, les bétons à base de vase évoluent nettement plus vite que le béton témoin, c'est l'activité de la vase qui a été déterminante.
- Un dosage de 10 % de vase substituée au ciment serait optimal pour développer rapidement des résistances à court terme. A 60 et 90 jours le béton à base de 20% de vase se voit ses résistances évoluer plus rapidement par rapport aux autres bétons.

**Chikouche[29]**, dans sa recherche sur l'effet des ajouts à base d'argiles gréseuses et vaseuses sur les propriétés des matériaux cimentaires a abouti aux conclusions suivantes :

- Les résistances mécaniques diminuent en général avec l'augmentation du pourcentage d'ajout pouzzolanique (vase et marne argileuse).
- Les résistances mécaniques sont moins élevées pour les bétons avec 10, 20, 30 % de vase et de celui de marne argileuse par rapport au béton témoin et à l'âge de 28 jours leurs résistances s'approchent de celle béton témoin.

**Benkaddour[30]** ont étudié la durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle avec des pourcentages de substitution de 10%, 20% et 30%, ils ont montré que :

- Les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute.
- La résistance à la compression diminue considérablement avec l'augmentation du pourcentage d'ajout au jeune âge surtout à 2j, 7j et 28 jours. A titre d'exemple, un remplacement du ciment par 30% de pouzzolane artificielle (la vase calcinée) diminue la résistance à la compression de 41.68%, 26.31% et 19.74% à 2j, 7j et 28 jours respectivement, aussi la substitution de 30% de pouzzolane naturelle diminue la résistance à la compression de 36.68%, 6.16% et 24.45% à 2j, 7j et 28 jours respectivement.
- La résistance à la compression des mortiers qui contiennent 10% de pouzzolane artificielle et ceux qui contiennent 10% de pouzzolane naturelle rejoint celle du témoin à 28 jours.

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

- La différence de la résistance à la compression des mortiers qui contiennent de 10% à 30% de la pouzzolane naturelle et ceux qui contiennent de 10% à 30% de la vase calcinée ne dépasse pas 5% quelque soit l'âge.

**N.Belbachir [10]**, a étudié l'influence de la substitution de clinker par la vase calcinée issue des opérations de dragage de barrage de Fergoug sur les propriétés mécaniques à court terme, avec un pourcentage de substitution de 20%. Elle a montré dans son étude que :

- Les résistances à la compression augmentent régulièrement avec l'âge, la substitution du clinker par les ajouts fait amoindrir les résistances, car ces ajouts ont un effet de remplissage aux jeunes âges et la réaction pouzzolanique n'est pas prédominante.
- Les résistances obtenues avec les mélanges à base de vase calcinée sont supérieures à celles obtenues à base de la pouzzolane naturelle.
- Les résistances des bétons avec ajouts commencent à s'approcher légèrement à celle du béton témoin à l'âge 28 jours.
- à 3 jours le béton témoin développe 52 % de sa résistance à 28 j, le béton à base de vase calcinée développe 47 % de sa résistance à 28 j, le béton à base de pouzzolane naturelle développe 46% de sa résistance à 28 j.
- à 7 jours le béton témoin développe 70% de sa résistance à 28 j, le béton à base de vase calcinée développe 62% de sa résistance à 28 j, le béton à base de pouzzolane naturelle développe 63% de sa résistance à 28 j.
- à 14 jours le béton témoin développe 84% de sa résistance à 28 j, le béton à base de vase calcinée développe 76% de sa résistance à 28 j, le béton à base de pouzzolane naturelle développe 76% de sa résistance à 28 j.
- La mesure des résistances à la traction ont été obtenue par 2 types d'essai : traction par flexion et traction par fendage. Les résistances augmentent régulièrement avec l'âge, les résistances de ciment avec ajouts approchent de celles de béton témoin à l'âge de 28 j.
- Les résultats de l'essai de traction par fendage sont inférieurs à celles de l'essai de traction par flexion.

## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les matériaux pouzzolaniques

---

- ✓ Résistance à la traction par flexion des bétons en fonction du temps :
  - à 3 jours le béton témoin développe 62 % de sa résistance à 28 j, le béton à base de vase calcinée développe 52 % de sa résistance à 28 j, le béton à base de pouzzolane naturelle développe 51% de sa résistance à 28j.
  - à 7 jours le béton témoin développe 77% de sa résistance à 28 j, le béton à base de vase calcinée développe 67% de sa résistance à 28 j, le béton à base de pouzzolane naturelle développe 68% de sa résistance à 28j.
  - à 14 jours le béton témoin développe 89% de sa résistance à 28 j, le béton à base de vase calcinée développe 80% de sa résistance à 28 j, le béton à base de pouzzolane naturelle développe 80% de sa résistance à 28j.
  
- ✓ Résistance à la traction par fendage des bétons en fonction du temps :
  - à 3 jours le béton témoin développe 61% de sa résistance à 28 j, le béton à base de vase calcinée développe 48% de sa résistance à 28 j, le béton à base de pouzzolane naturelle développe 47% de sa résistance à 28j.
  - à 7 jours le béton témoin développe 79% de sa résistance à 28 j, le béton à base de vase calcinée développe 69% de sa résistance à 28 j, le béton à base de pouzzolane naturelle développe 66 % de sa résistance à 28j.
  - à 14 jours le béton témoin développe 90% de sa résistance à 28 j, le béton à base de vase calcinée développe 85% de sa résistance à 28 j, le béton à base de pouzzolane naturelle développe 87% de sa résistance à 28j.
  - durant les premiers jours la résistance évolue moins rapidement pour le béton avec ajouts donc, l'hydratation est plus lente que celle de béton sans ajouts.
  - La résistance obtenue par fendage est plus représentative et utilisée dans la littérature du fait de sa simplicité. De plus cet essai par rapport à l'essai de flexion trois points, est le moins perturbé par la zone de compression qui influe la valeur finale de la résistance.

# Problématique

---

## Problématique

À la lumière de cette étude bibliographique, nous avons pu faire le point sur deux problématiques essentielles :

1. La première concerne les énormes quantités de sédiments présents dans les barrages en Algérie notamment celui de Chorfa de la wilaya de Mascara, qui est soumis à un phénomène d'envasement progressif. Au bout des dernières années sa capacité a chuté d'une dizaine de millions de m<sup>3</sup> ; soit un taux annuel d'envasement dépassant un million de m<sup>3</sup>.

Cela traduit la complexité du problème : construire l'ouvrage, le protéger, le vidanger régulièrement, préserver le site amont et aval, ... La valorisation des produits issus du dragage contribue sans aucun doute au développement de la région et à la résolution des questions liées au largage des vases.

La valorisation de ces sédiments de dragage dans la confection des bétons semble être une alternative bien fondée par rapport aux caractéristiques prometteuses de ces matériaux pour leur devenir. Plusieurs travaux ont été menés dernièrement pour étudier la possibilité de valoriser les sédiments de dragage dans le génie civil notamment dans les matériaux cimentaires et voir son impact sur les propriétés mécaniques et sur la résistance dans les milieux agressifs des mortiers et bétons, soit en substitution d'une partie du ciment soit en addition au béton, mais rares sont les études détaillées réalisées sur les performances des bétons à base de mélanges de vases et de pouzzolane naturelle encore moins sur leur durabilité.

2. La seconde concerne la substitution ou il faut s'assurer des pourcentages des teneurs en ajouts de la pouzzolane naturelle de 10%, 20% et 30% même chose pour la vase de 10%, 20% et 30% ainsi que pour les mortiers ternaires de 5% PZ+5% V, 10%PZ+10% V et 15%PZ+15% V.

Ainsi par cette contribution il nous sera possible de répondre à plusieurs objectifs :

## Problématique

---

Est-ce qu'on peut avoir une efficacité des mortiers à base de pouzzolane par ajouts, et évaluer le pourcentage voulu pour une performance atteinte sur les propriétés mécaniques et thermiques ?

Est-ce que l'influence des ajouts est positive ou négative sur les objectives de projet de recherche

## **Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques**

---

### **Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques**

#### **3-1 Objectifs**

L'objectif principal de cette étude qui a été menée par Hamadache [31] est de fournir davantage de données sur l'utilisation de la pouzzolane naturelle et de la perlite situées dans la région de l'ouest de l'Algérie comme substituant au ciment pour confectionner des mortiers avec différentes pourcentages de pouzzolane et perlite. D'une manière générale leur utilisation fait réduire la consommation du clinker en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement, réduire l'émission du CO<sub>2</sub> durant les opérations de production de ciment, maîtriser l'impact environnemental des produits sur leur cycle de vie complet.

Nous nous sommes intéressé particulièrement dans ses travaux de recherche à l'étude de l'efficacité des ajouts de la pouzzolane naturelle et de la perlite sur les propriétés thermiques des mortiers. Des instruments de mesures ont été installés afin de quantifier l'environnement intérieur global et en particulier l'ambiance thermique. Sachant que l'ambiance thermique est caractérisée par des grandeurs physiques tels que : La température de l'air, la température des parois et l'humidité de l'air. Celle-ci permette d'évaluer le niveau de la consommation énergétique et le comportement thermique de l'enveloppe de l'ouvrage, afin de vérifier la conformité du logement aux exigences du confort thermique. Dans la plupart des cas, l'isolation est obtenue par l'emploi des matériaux spécifiques, qui, outre une bonne résistance à la transmission de la chaleur, doivent présenter d'autres qualités qui sont fonction des impératifs de mise en œuvre comme :

- La légèreté et le non hygroscopicité afin de conserver dans le temps ses qualités isolantes,

## Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques

---

- Une bonne résistance thermique,
- Une bonne tenue aux températures d'emploi,
- Une absence d'effets nuisibles sur les matériaux en contact avec l'isolant.

Les mesures de la conductivité thermique et la résistance thermique des mortiers ont été suivis à l'air libre et dans l'eau pour différentes teneurs en pouzzolane naturelle (PZ : 10%, 20%, 30%), en perlite (P : 10%, 20%, 30%) et le mélange (5%P +5%PZ, 10%P+10%PZ, 15%P+15%PZ) pour différentes échéances. Le mortier témoin sans pouzzolane servira de référence. Les résultats trouvés permettent de mettre en évidence l'effet bénéfique de la pouzzolane naturelle et la perlite comme isolant thermique en les comparants avec d'autres matériaux isolants.

### 3-2 Matériaux utilisés

#### 3-2-1 le ciment

Le ciment utilisé dans tous les essais est un ciment CPA-CEM I 42,5 provenant de la cimenterie de la Farge, selon la Norme algérienne NA442 .

Les compositions chimiques du ciment et minéralogiques du clinker sont données dans les tableaux 3 et 4.

**Tableau 3 :** Composition chimique élémentaire du ciment CPA-CEM I 42,5

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO libre
64,8	21	4	7	2,71	0,41	0,13	0,9	1,20

**Tableau 4 :** Composition minéralogique du clinker

C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
51,30	25,70	2,80	14,30

## Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques

---

### 3-2-2 La pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle utilisée est d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamidi situé au sud de Béni-Saf. Le gisement est représenté par une montagne de forme conique appelée El-Kalcoul situé à la côte absolue de 236 m. Cette pouzzolane est essentiellement formée de scories et de pierres ponce bien stratifiées, de couleur variant du rouge au noir.

La pouzzolane naturelle utilisée dans tous les essais est sous forme d'une poudre, résultante de concassage des scories pouzzolaniques, étuvées pendant 24 heures à une température de 50°C afin d'éliminer leur humidité, ensuite broyées jusqu'à ce que la poudre résultante puisse passer à travers un tamis de mailles 80  $\mu\text{m}$ .



**Photo 6 :** Scories de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf avant broyage



**photo 7 :** Poudre de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf broyer à 80  $\mu\text{m}$ .

La composition chimique de la pouzzolane naturelle après le broyage est montrée dans le tableau 5.

## Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques

**Tableau 5** : Composition chimique élémentaire de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	Cl	CaCO <sub>3</sub>
12,36	42,95	16,32	9,49	0,01	1,39	3,00	4,20	0,00	10,75

### 3-2-3 Perlite

La perlite est une roche volcanique siliceuse. La roche est d'abord concassée et calibrée par granulométrie. En apparence, extraite du gisement de Hammem Boughrara situé à Tlemcen, Algérie. L'expansion industrielle de la perlite est réalisée par EFISOL dans des fours spéciaux, fixes ou rotatifs [6]. Sous l'effet de la chaleur, les grains de perlite s'expandent : une multitude de cellules fermées se constituent à l'intérieur des grains. La perlite est utilisée sous forme d'une poudre tamisée à 80 µm dans tous les essais .



**Photo 8** : Scories de la perlite de Hammam Boghrara avant broyage.



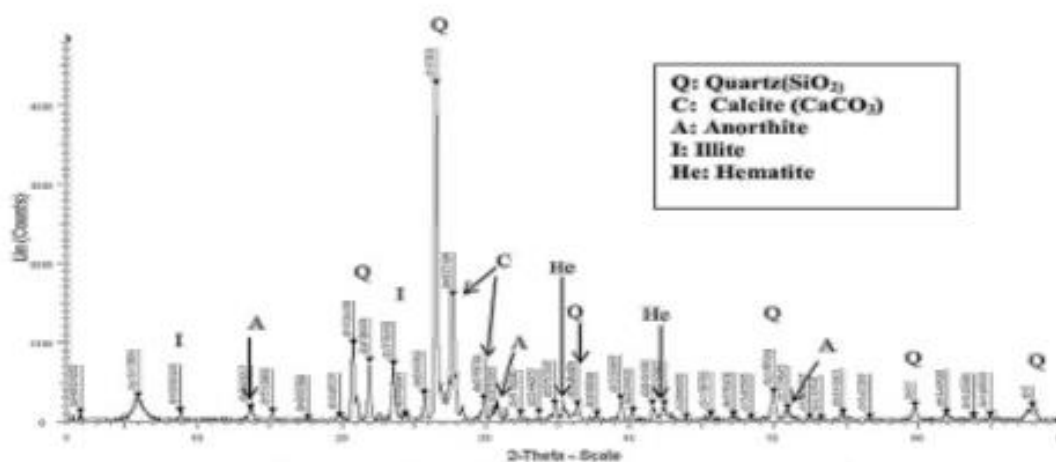
**photo 9** : Poudre de la perlite de Hammam Boghrara broyer à 80 µm.

## Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques

La composition chimique de la perlite broyée et le spectre DRX sont montrés dans le tableau 6 et la figure 10, respectivement.

**Tableau 6 :** Composition chimique élémentaire de la perlite de Hammam Boughrara

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	Cl	CaCO <sub>3</sub>
3,16	76,40	13,43	2,92	0,01	4,33	0,82	0,37	0,008	8,75



**Figure 10 :** Spectre RDX de la perlite de Hammam Boughrara

### 3-2-4 Le sable

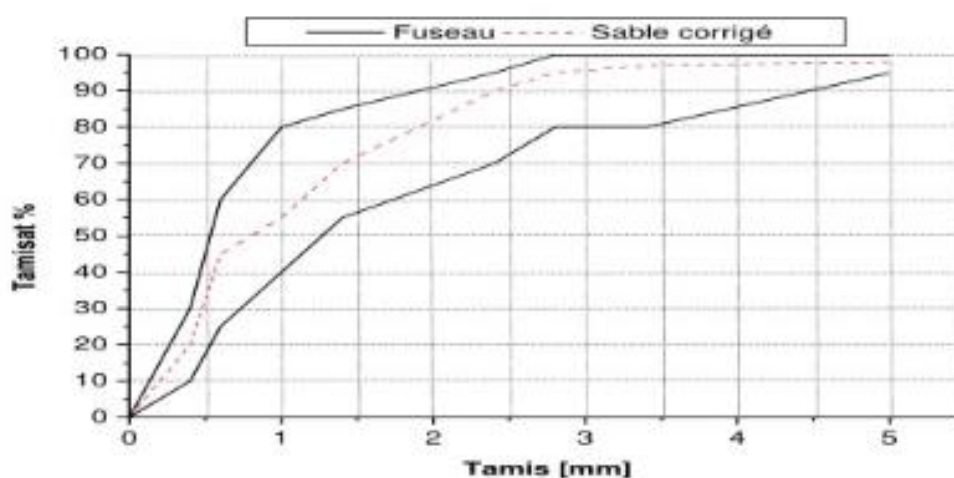
Le sable choisi est une combinaison de 40 % Sable de Mer provenant de Terga et 60 % Sable de Carrière de Kristel. Le sable est initialement préparé pour être classé suivant les normes françaises NF P 15-403, sa courbe granulométrique satisfait au fuseau de référence indiqué dans la figure 11. Ce sable est un squelette granulaire qui a le plus d'impact sur les qualités du béton

## Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques

et du mortier. Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées et le prix de revient des bétons. Il doit être propre, ne pas contenir d'éléments nocifs.

**Tableau 7 :** Caractéristiques physiques du sable

Masse Volumique absolue ( $\text{g/cm}^3$ )	2,64
Masse Volumique apparente ( $\text{g/cm}^3$ )	1,44
Equivalent de sable (%)	98,4
Module de finesse	1,80
Coefficient de courbure	1,20
Coefficient d'uniformité	2,40
Nature du sable	Quartzeux



**Figure 11 :** Courbe granulatoire des sables corrigés

### 3-2-5 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la préparation des mortiers est l'eau potable du robinet, sa composition chimique est illustrée dans le tableau 8.

## Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques

---

**Tableau 8 :** Analyse chimique de l'eau de gâchage.

Composé	Symbole	Teneur (mg /l)
Chlorures	Cl	127
Sulfates	SO <sub>4</sub>	190,23
Magnésium	Mg	54
Calcium	Ca	86
Dioxyde de carbone	CO <sub>2</sub>	2,43
Bicarbonates	CO <sub>3</sub> H	138
Matières organiques		0,12
pH=7,50		

### 3-3 Formulation des mortiers

#### 3-3-1 Formulation des mortiers

Des mélanges de mortier ont été réalisés à partir du ciment Portland CEM I 42,5N et trois combinaisons de liants obtenus suite au remplacement partiel en poids du ciment par différentes pourcentages d'ajouts pouzzolaniques. Pour chaque liant, on a réalisé des mélanges du mortier conformément à la norme **ASTM C1012 [32]**. Les mortiers sont destinés pour la confection des éprouvettes de dimensions de (50x50x50) mm<sup>3</sup> et des éprouvettes cylindriques de dimensions; diamètre 50mm, longueur 100mm.

La composition des mélanges de matériaux pour confectionner les éprouvettes des mortiers est donnée dans le tableau II.9 avec E/L égale 0,5.

## Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques

**Tableau 9 :** Formulations des mortiers.

Désignation du mortier		Pouzzolane naturelle (g)	Perlite (g)	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (L)	Rapport E /L
M <sub>0</sub>	Mortier normal	0	0	450	1350	225	0,50
M <sub>10pz</sub>	Mortier avec ciment binaire	45	0	405	1350	225	0,50
M <sub>20pz</sub>		90	0	360	1350	225	0,50
M <sub>30pz</sub>		135	0	315	1350	225	0,50
M <sub>10p</sub>	Mortier avec ciment binaire	0	45	405	1350	225	0,50
M <sub>20p</sub>		0	90	360	1350	225	0,50
M <sub>30p</sub>		0	135	315	1350	225	0,50
M <sub>5pz+5p</sub>	Mortier avec ciment ternaire	22,5	22,5	405	1350	225	0,50
M <sub>10pz+10p</sub>		45	45	360	1350	225	0,50
M <sub>15pz+15p</sub>		67,5	67,5	315	1350	225	0,50

### 3-3-2 Préparation des mortiers

Cette opération influe d'une façon notable sur le produit final. La préparation du mortier a été effectuée selon les étapes suivantes normes [10], [11] :

Le sable et le ciment à tester sont gâchés avec de l'eau dont les proportions :  $450 \pm 2g$  du ciment,  $1350 \pm 5g$  du sable et un pourcentage d'eau (tableau 10).

**Tableau 10 :** Conduite des opérations du malaxage.

Opérations	Introduire du sable	Introduire du ciment		Introduction de l'eau		Raclage de la cuve	
Durée			30 s	30 s	60 s	15 s	60 s
Etat de malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêt	Vitesse rapide

## Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques

### 3-4 Compagne Expérimentale

#### 3-4-1 Les essais sur les différents mortiers à l'état frais

##### 3-4-1-1 Essai de consistance et de prise

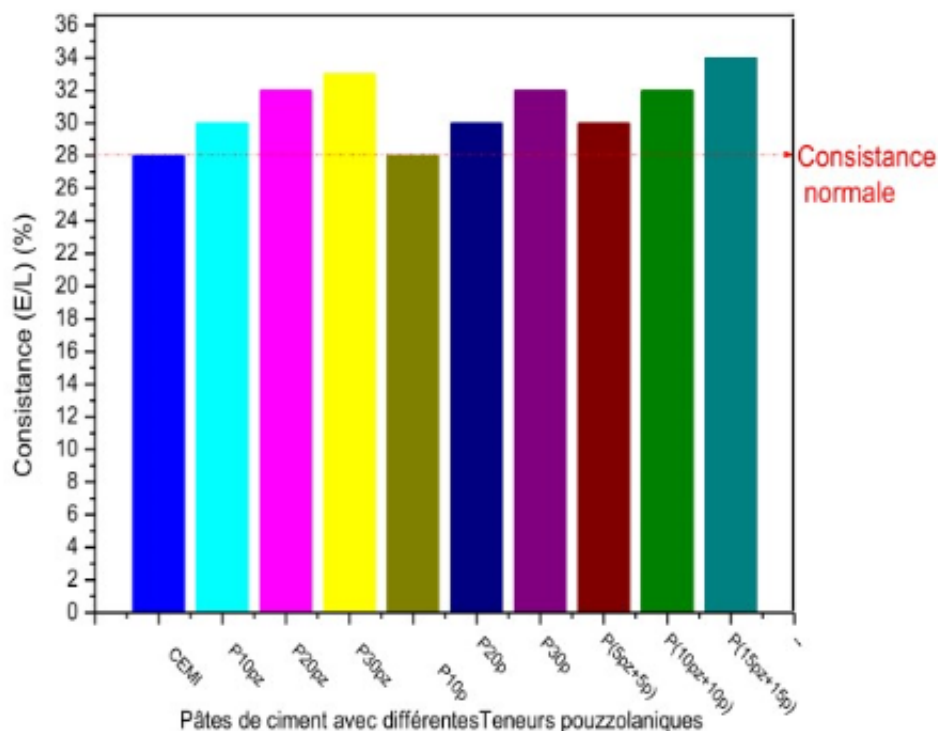
Les essais de consistance et de prise ont été réalisés au laboratoire (L.A.B.M.A.T) avec différents essais effectués sur les pâtes de ciment confectionnés selon les différents teneurs d'ajouts de pouzzolane naturelle et de perlite substituées en fonction des poids.

Les résultats sont donnés dans le tableau 11 et représentés dans les figures 12 et 13.

Désignation des pâtes de ciment	Ciment CEMI (%)	Pouzzolane naturelle (%)	Perlite (%)	Consistance (E/L) (%)	Début de prise h : mn	Fin de prise h : mn
CEMI	100	0	0	28	164	310
P10pz	90	10	0	30	165	345
P20pz	80	20	0	32	160	325
P30pz	70	30	0	33	127	315
P10p	90	0	10	28	166	335
P20p	80	0	20	30	158	320
P30p	70	0	30	32	135	318
P(5pz+5p)	90	5	5	30	158	320
P(10pz+10p)	80	10	10	32	155	318
P(15pz+15p)	70	15	15	34	125	310

**Tableau 11** : Les essais de consistances, début et fin de prise des pâtes de ciment pouzzolaniques

## Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques

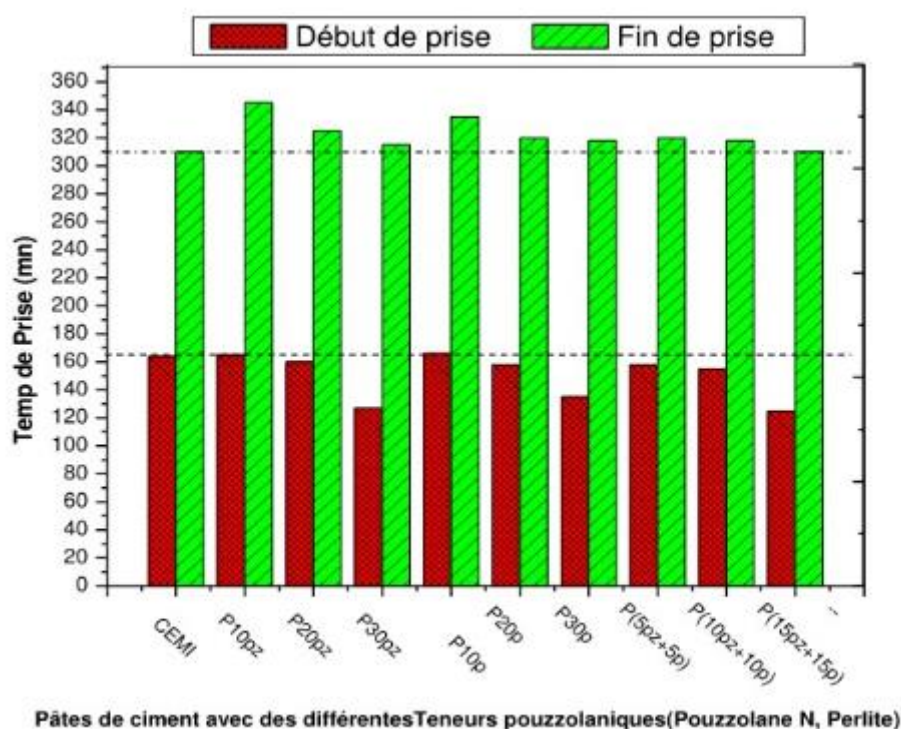


**Figure 12 :** Variation de la consistance des pâtes de ciment en fonction des teneurs Pouzzolaniques

On constate dans la figure 12 que la consistance est normale pour la pâte du ciment CEMI et la pâte de ciment avec 10% de perlite (P10p), mais pour les pâtes pouzzolaniques leurs consistances sont élevées, plus le teneur de l'ajout pouzzolanique augmente plus la consistance augmente.

Chaib et al [33], a constaté la même chose pour la pouzzolane naturelle de Beni-Saf et la perlite, dont la consistance des pâtes du ciment augmentent avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

## Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques



**Figure 13 :** Variation de temps de prise des pâtes de ciment en fonction des différents teneurs pouzzolaniques

La figure 13 présente le temps de prise qui est inversement proportionnel à la teneur des différentes pâtes de ciment avec l'ajout ou sans ajout. Plus la teneur de l'ajout pouzzolanique augmente plus le temps de prise diminue. Ceci est conforme à l'étude faite par **Aichouba et al[34]** qui ont rapporté que la substitution du ciment par la pouzzolane naturelle, cause l'accélération de la prise avec l'augmentation du pourcentage d'ajout. Ainsi, le ciment contenant 30% de pouzzolane naturelle présente une diminution de 32% pour le début de prise et 23% pour la fin de prise.

Erdem et al [35], ont testé deux perlites naturelles provenant de deux régions de la Turquie (Izmir et Erzincan). Ils ont produit plusieurs ciments composés en substituant le ciment par différentes quantités de perlite (20% et 30%, en poids de ciment). Ils ont conclu qu'en raison de la

## Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques

---

dilution du ciment, les temps de prise des pâtes contenant de la perlite étaient plus longs que celui du témoin. Ils ont conclu aussi que, les ciments produits par cobroyage de la perlite avec le clinker, présentant une plus grande finesse et des temps de prise plus longs comparés aux ciments broyés séparément.

Chaib[33] a constaté la même chose pour la pouzzolane naturelle de Beni-Saf, dont les temps de début et de fin de prise du ciment diminuent avec l'augmentation du pourcentage de cet ajout. De la même sorte,

Chihaou [36] a étudié des mortiers de ciment portland de la cimenterie de zahana est partiellement substitué avec la pouzzolane de Béni-Saf.

### *3-4-1-2 Maniabilité des mortiers frais*

Les résultats d'essais d'étalement sur table à choc représentés dans le tableau 12 conformément à la norme ASTM C 1437 [37], montrent qu'avec une quantité d'eau constante pour la préparation de tous les mortiers, le mortier avec du ciment Portland sans ajout présente une maniabilité supérieure aux mortiers pouzzolaniques. Ainsi, la maniabilité des mortiers pouzzolaniques diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la pouzzolane naturelle et de la perlite suivant la figure 14.

Cela prouve que l'augmentation du taux de la pouzzolane naturelle, perlite accroît sensiblement la demande en eau.

La croissance de la demande d'eau est principalement attribuée à l'augmentation progressive de la surface spécifique des liants pouzzolaniques et donc un fort appel aux molécules d'eau afin de mouiller toute la surface.

## Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques

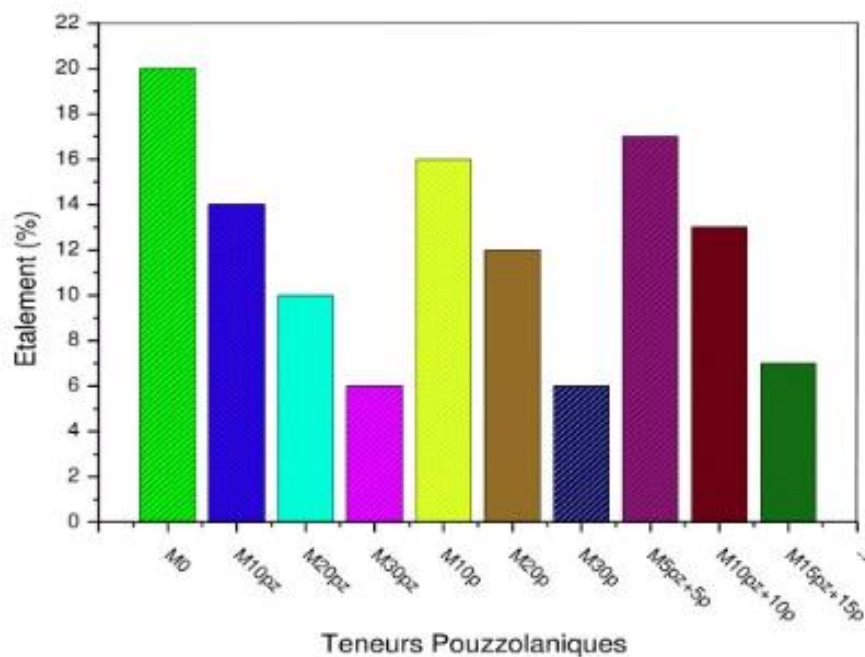
**Tableau 12 :** Influence de la pouzzolane naturelle sur la maniabilité des mortiers à E/C=0,50.

Etalement $E\% = (D_r - D_i) / D_i$ , $D_i = 100\text{mm}$					
Désignation de mortier	Pouzzolane naturelle (%)	Perlite (%)	E/C	Etalement (mm)	Etalement (%)
M <sub>0</sub>	0	0	0,50	120	20
M10PZ	10	0	0,50	114	14
M20PZ	20	0	0,50	110	10
M30PZ	30	0	0,50	106	06
M10P	0	10	0,50	116	16
M20P	0	20	0,50	112	12
M30p	0	30	0,50	106	06
M5PZ+5P	5	5	0,50	117	17
M10PZ+10P	10	10	0,50	113	13
M15PZ+15P	15	15	0,50	107	07

Les résultats ci-dessus confirment que la substitution du ciment par des fines telles les pouzzolanes naturelles et les perlites, fait que ces liants sont caractérisés par une grande surface spécifique conduisant à la baisse de la maniabilité du mortier.

Ceci est en accord avec les résultats de recherches de Senhadji [38] et Chihaoui [36] qui ont trouvé même remarque aux résultats d'expériences par l'utilisation de plusieurs ajouts pouzzolaniques (la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, perlite, la fumée de silice et le métakaolin) pour la confection des mortiers, indique que ces ajouts pouzzolaniques diminuent la maniabilité car leur demande en eau est supérieure à celle du mortier de ciment pure. Afin d'obtenir des consistances voisines de celles d'un mortier normalisé de CEM I il a maintenu le rapport E/L constant en ajustant la maniabilité par l'utilisation d'un superplastifiant.

## Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques



**Figure 14 :** Variation de l'étalement en fonction des différentes teneurs pouzzolaniques

La figure ci-dessus montre que l'étalement est inversement proportionnel à la teneur de pouzzolane naturelle et de la perlite, plus le teneur de l'ajout pouzzolanique augmente plus l'étalement diminue.

### 3-4-2 Les essais sur les différents mortiers à l'état durcis

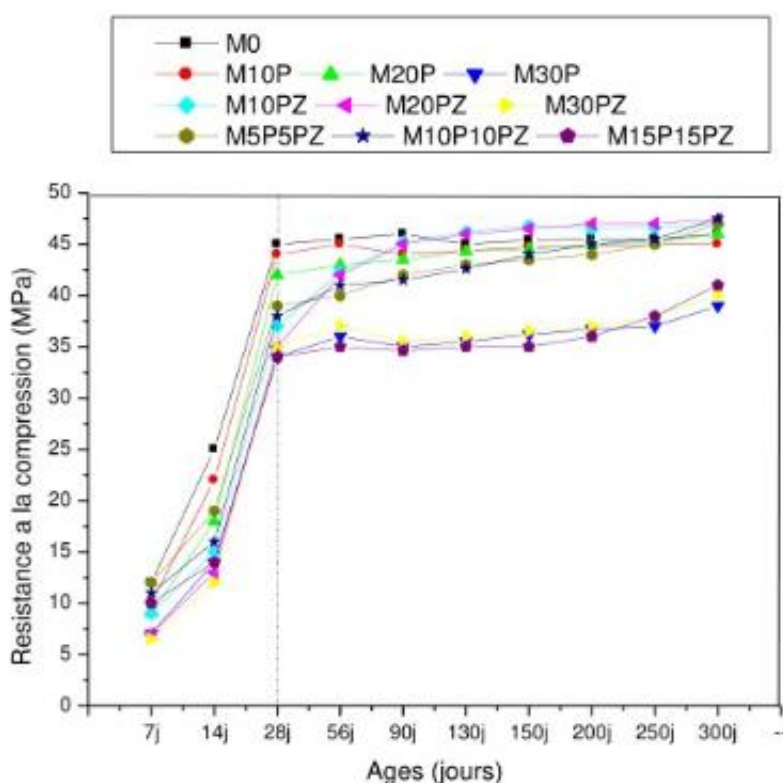
#### 3-4-2-1 Essais mécaniques

##### 3-4-2-1-1 Résistance à la compression des mortiers durcis

Les résultats des résistances à la compression des éprouvettes de (50x50x50) mm<sup>3</sup> immergées dans un milieu de conservation. Il est à signaler que les éprouvettes de mortiers sont conservées pendant une durée de 300 jours dans une eau saturée en chaux.

## Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques

La figure 15 présente l'évolution, l'effet de la pouzzolane et le rapport de la résistance à la compression par celle mesurée à 28 jours en fonction du temps (i varie de 7 à 300j) dans l'eau saturée en chaux.



**Figure 15 :** Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers dans l'eau saturée en chaux.

De cette figure on peut tirer les remarques suivantes :

- Les résistances augmentent rapidement au jeune âge jusqu'à l'âge de 28 jours, après quoi ces résistances augmentent légèrement à long terme et ceux pour tous les mortiers.
- Les résistances à la compression diminuent en générale avec l'augmentation du pourcentage des ajouts pouzzolaniques.

## Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques

---

On remarque que la résistance à la compression de tous les mortiers augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute.

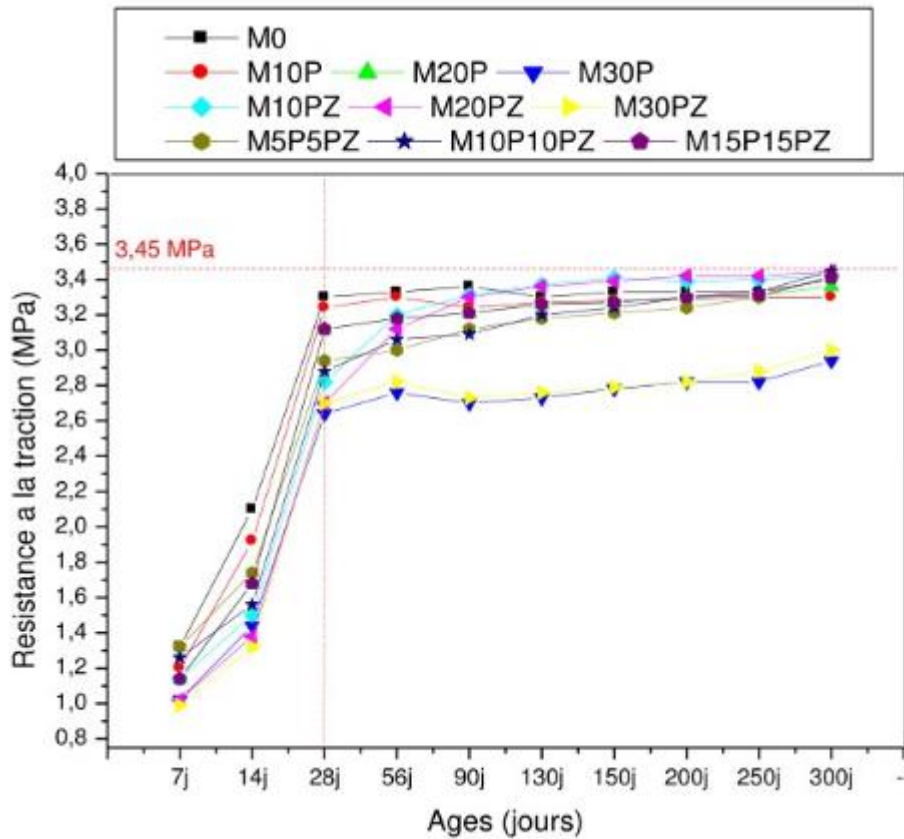
Selon Day et Shi [39], la finesse d'un liant est un facteur important affectant le taux de développement de la résistance. L'augmentation de la finesse dans les limites acceptables peut améliorer le développement de la résistance au jeune âge, particulièrement si un ciment contient des ajouts minéraux.

### *3-4-2-1-2 Résistance à la traction des mortiers à l'état durcis*

L'expérimentales des résistances à la traction des éprouvettes de (40x40x160) mm<sup>3</sup> immergées dans un milieu de conservation. Il est à signaler que les éprouvettes de mortiers sont conservées pendant une durée de 300 jours dans une eau saturée en chaux.

La figure 16 présente l'évolution, l'effet de la pouzzolane et le rapport de la résistance à la compression par celle mesurée à 28 jours en fonction du temps (i varie de 7 à 300j) dans l'eau saturée en chaux.

# Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques



**Figure 16 :** Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des mortiers dans l'eau saturée en chaux

La résistance à la traction de tous les mortiers augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute avant 28 jours, au-delà de 28 jours on constate qu'il y a une augmentation lente sauf qu'une chute résistance pour les mortiers avec 30% d'ajout de pouzzolane naturelle et de 30% d'ajout de la perlite (figure 16).

### 3-4-2-2 Essais Thermiques

Afin d'évaluer les propriétés thermiques des mortiers à l'air libre et conservée dans l'eau qui sont destinés pour la confection des éprouvettes de dimensions de 50x50x50 mm<sup>3</sup>, l'appareil utilisé est du type "Isomet 2104". C'est un instrument de mesure portable pour la mesure directe

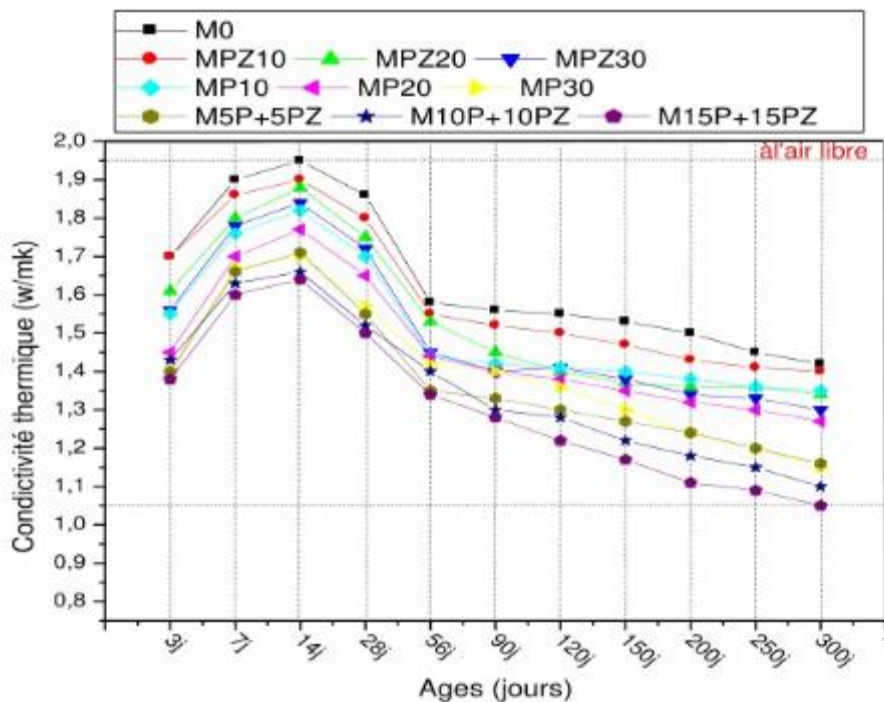
# Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques

du coefficient de conductivité thermique, capacité volumétrique spécifique et la température en utilisant l'échange de seringues et sondes de surface, selon la norme ISO8302 [40].

### 3-4-2-2-1 Mesure de la conductivité thermique des mortiers à l'air libre

La figure 17 illustre la variation de la conductivité thermique des mortiers pouzzolaniques et du mortier témoin en fonction du temps à l'air libre.

Trois phases sont considérées pour la conductivité thermique :



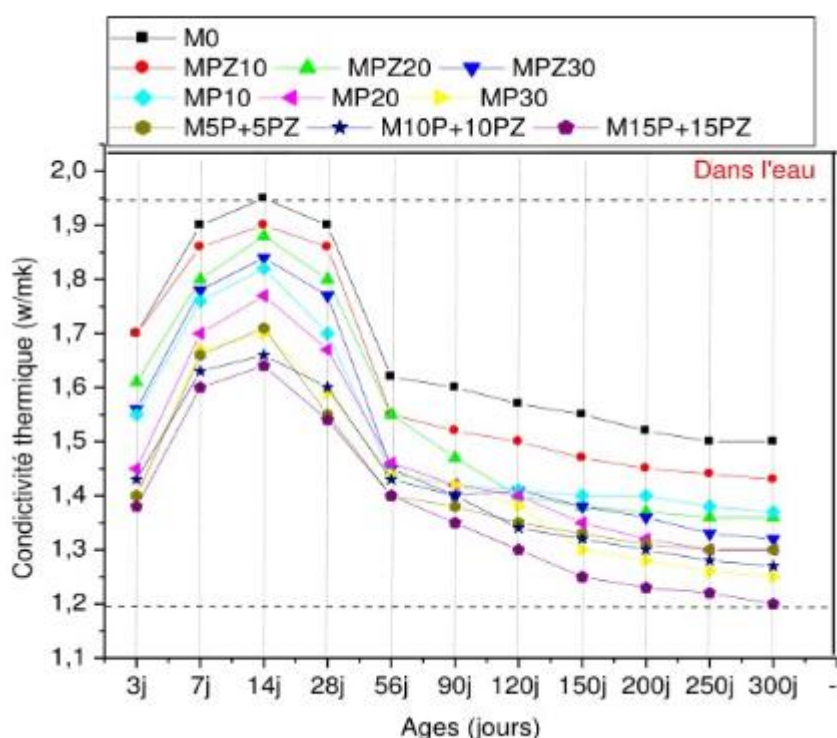
**Figure 17 :** Variation de la conductivité thermique en fonction du temps des mortiers à l'air libre.

Sur l'intervalle compris entre 3 jours et 14 jours, la figure 17 montre l'évolution de la conductivité thermique en fonction du taux d'ajouts, au-delà de 14 jours la conductivité thermique diminue pour le même taux d'ajouts ce qui explique la bonne isolation thermique à long terme

## Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques

### 3-4-2-2-Mesure de la conductivité thermique des mortiers conservée dans l'eau

La figure 18 présente la variation de la conductivité thermique des différents mortiers en fonction du temps conservés dans l'eau.



**Figure 18 :** Variation de la conductivité thermique en fonction du temps des mortiers conservés dans l'eau

En comparant les figures 17 et 18, nous enregistrons une bonne amélioration de l'isolation thermique qui est due essentiellement à la faible conductivité thermique des échantillons exposés à l'air par rapport à ceux conservés dans l'eau.

# Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques

## 3-4-2-2-3 Mesure de la résistance thermique ( $R_{th}$ ) des mortiers à l'air libre et dans l'eau

Les figures 19 et 20 montrent les variations de la résistance thermique ( $R_{th}$ ) des différents

mortiers en fonction du temps ; On utilise la formule suivant :  $R_{th} = \frac{e}{\lambda}$

Où,  $e$  : épaisseur de la couche du matériau. En prend  $e = 0,05$  m.

$\lambda$  : Conductivité thermique des mortiers.

La résistance thermique est inversement proportionnelle à la conductivité thermique. Physiquement, elle représente la capacité d'un milieu à résister (en température) à une perturbation thermique sur une couche constante.

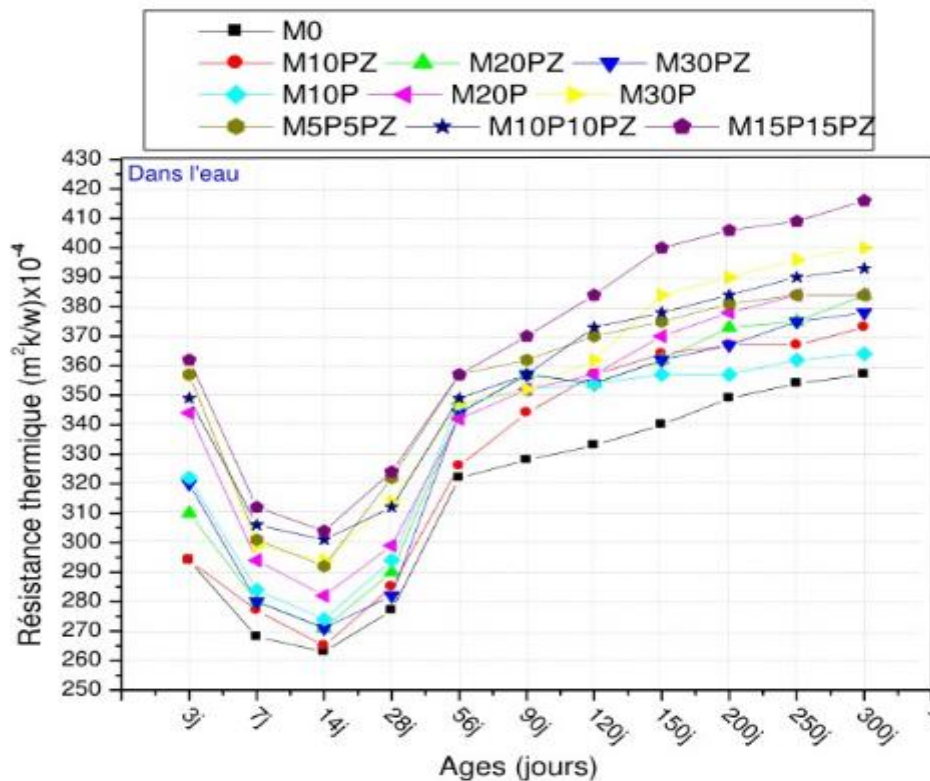


Figure 19 : Variation de la résistance thermique en fonction du temps conservés dans l'eau

# Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques

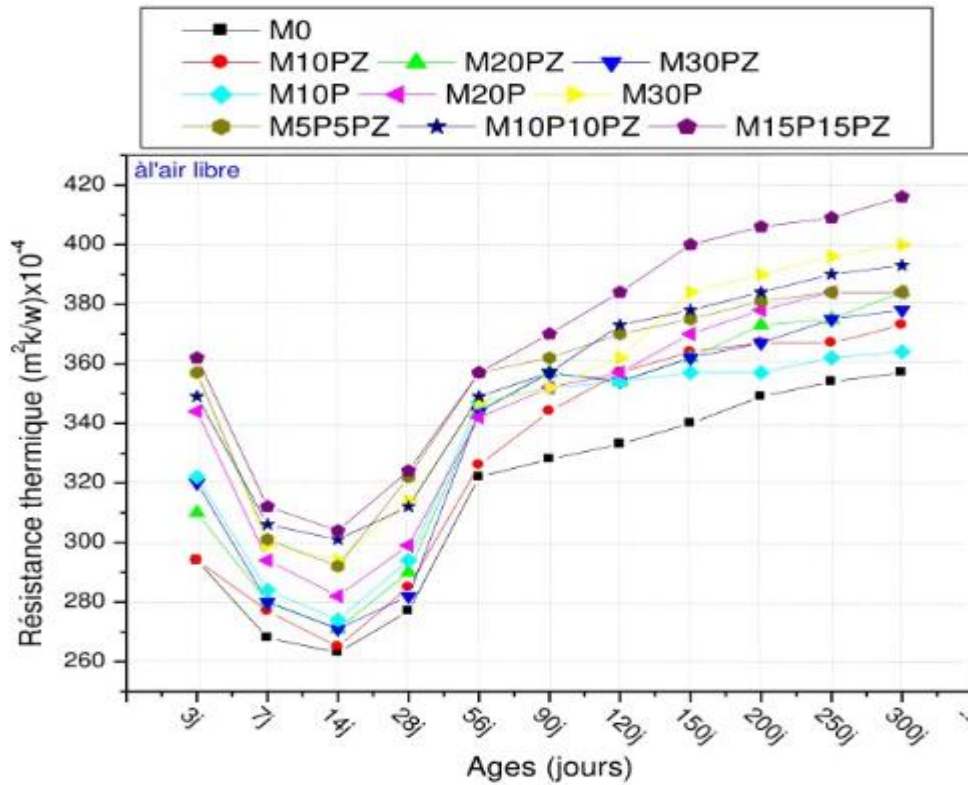


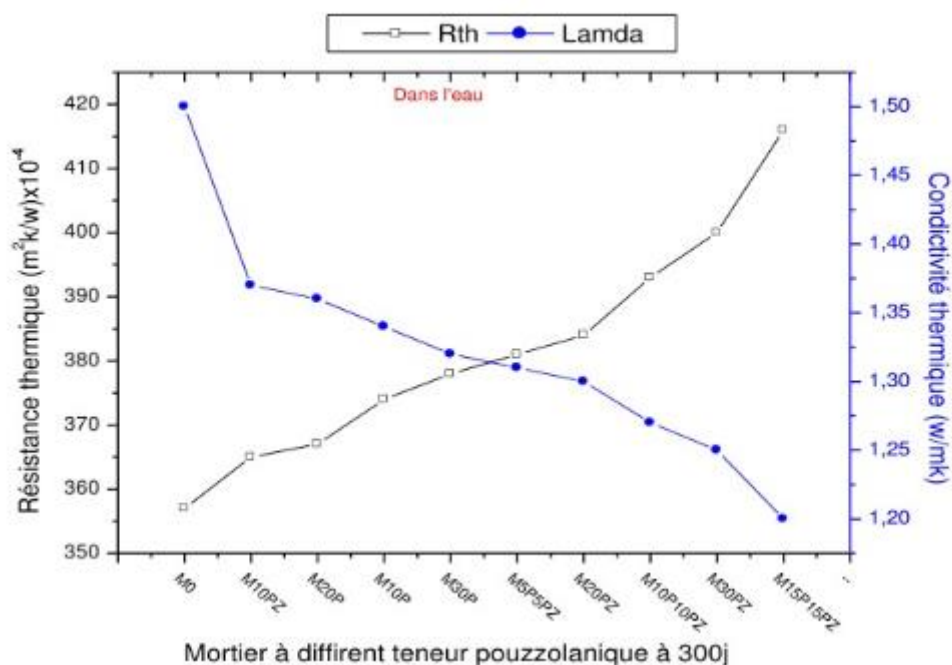
Figure 20 : Variation de la résistance thermique en fonction du temps à l'air libre

On remarque que plus la valeur de la résistance thermique  $R_{th}$  d'une paroi est grande, plus le matériau est isolant, la comparèrent des deux figures 19 et 20, nous enregistrons une bonne amélioration de l'isolation thermique qu'est due essentiellement à une grande résistance thermique des échantillons exposés à l'aire par rapport à ceux conservés dans l'eau.

### 3-4-2-2-4 Comparaison entre la résistance thermique ( $R_{th}$ ) et la conductivité thermique des mortiers à l'air libre et dans l'eau

Les figures 21 et 22 représentent les variations de la résistance thermique, conductivité thermique des différents mortiers en fonction des teneurs pouzzolaniques à 300 jours,

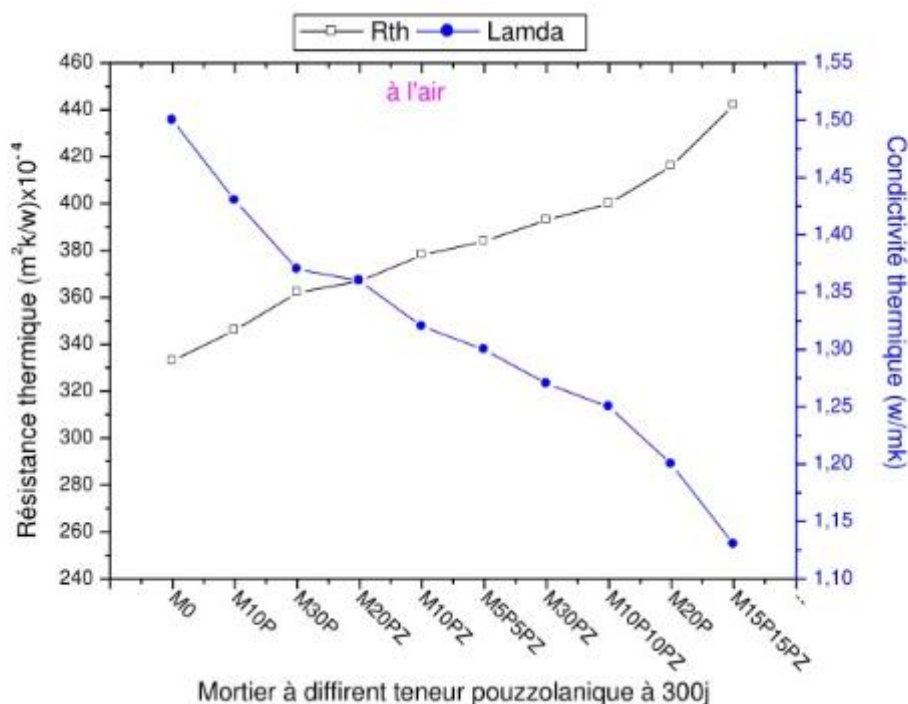
## Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques



**Figure 21 :** Variation de la conductivité thermique, résistance thermique en fonction des teneurs pouzzolaniques conservé dans l'eau à 300 jours

La figure 21 montre que la conductivité thermique est inversement proportionnelle à la résistance thermique par rapport à la classification des teneurs pouzzolaniques : M0, M10%PZ, M20%P, M10%P, M30%P, M5%P+5%PZ, M20%PZ, M10%P+10%PZ, M30%PZ, M15%P+15%PZ.

## Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques



**Figure 22 :** Variation de la conductivité thermique, résistance thermique en fonction des teneurs pouzzolaniques à l'air libre à 300 jours

La figure 22 exhibe la même variation des courbes que la figure 21. Sauf que le classement des mortiers pouzzolaniques à l'air libre diffère que ceux conservées dans l'eau. Le nouveau classement est comme suit :

M0, M10P, M30P, M20PZ, M10PZ, M5P+5PZ, M30PZ, M10P+10PZ, M20P, M15P+15PZ.

## Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques

---

### 3-5 Bilan

L'objectif principal de cette étude est la valorisation de la perlite de Hammem Boghrara à Maghnia et la pouzzolane naturelle de Beni saf en tant qu'ajout cimentaire dans le mortier.

D'une manière générale et en se basant sur les résultats obtenus dans cette, les principales conclusions auxquelles nous sommes parvenues sont :

- **A l'état frais**

- La consistance est normale pour la pâte de ciment CEMI et la pâte de ciment avec 10% de perlite, mais pour les pâtes pouzzolaniques leurs consistances sont élevées, plus la teneur de l'ajout pouzzolanique augmente plus la consistance augmente ;
- Le temps de prise qui est inversement proportionnel à la teneur des différentes pâtes de ciment avec l'ajout ou sans ajout. Plus la teneur de l'ajout pouzzolanique augmente plus le temps de prise diminue. L'ajout de perlite naturelle dans le ciment accélère les temps de début et de fin de prise des pâtes ;
- La substitution du ciment par des fines telles les pouzzolanes naturelles et les perlites, fait que ces liants sont caractérisés par une grande surface spécifique conduisant à la baisse de la maniabilité du mortier.

- **A l'état durcis**

- La résistance à la compression de tous les mortiers dans l'eau saturée en chaux augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute ;
- Le rapport de la résistance à la compression par celle mesurée à 28 jours, augmente avec le temps notamment pour les mortiers avec l'ajout pouzzolanique à partir de 56 jours.

Cette réaction produit des gels C-S-H supplémentaires qui contribuent à l'amélioration de la résistance des mortiers pouzzolaniques ;

- La résistance à la traction de tous les mortiers augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute avant 28 jours, au-delà de 28 jours on constate qu'il y a une

## Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques

---

augmentation lente sauf qu'une chute résistance pour les mortiers avec 30% d'ajout de pouzzolane naturelle et de 30% d'ajout de la perlite, même pour le rapport de la résistance à la traction par celle mesurée à 28 jours augmente avec le temps notamment pour les mortiers avec ajout pouzzolanique de 10%, 20% pouzzolane naturelle et de 5% pouzzolane +5% de perlite et même pour 10%pouzzolane+10%perlite à partir de 56jours. Ceci est attribué à la réaction pouzzolanique contenu dans le ciment, suite à la consommation de la Portlandite (CH) produite à l'hydratation du ciment.

- **Concernant les propriétés thermiques**

- Une bonne amélioration de l'isolation thermique qui est due essentiellement à la faible conductivité thermique des échantillons exposés à l'aire par rapport à ceux conservés dans l'eau ;
- Une grande résistance thermique de tous les mortiers exposés à l'aire par rapport à ceux conservés dans l'eau. Cette résistance thermique est due à une bonne isolation thermique ;
- La conductivité thermique est inversement proportionnelle à la résistance thermique.

### 3-6 Conclusion

L'intérêt majeur qui a été à l'origine de cette étude est la possibilité de substituer partiellement un matériau industriel, le ciment, par un matériau naturel qui est la pouzzolane et la perlite. L'un et l'autre n'ont pas le même prix de revient. En effet la pouzzolane naturelle et la perlite étant des produits naturels et ne passant donc pas par des processus industriels d'énergie coûteuse. Elles sont beaucoup moins chères que le ciment, qui lui, passe par des processus très coûteux.

Mais, les mortiers obtenus par substitution du ciment par les matériaux tels que la pouzzolane et la perlite ne peuvent être retenus que s'ils présentent des performances physico-chimiques et thermiques nettement meilleures que celles obtenues avec le ciment seul.

## **Chapitre 3 : Résistances Mécaniques, Conductivité et Résistance à la Corrosion des Mortiers Pouzzolaniques**

---

Les résultats obtenus au cours de cette étude montrent une meilleure valeur de la conductivité thermique à l'âge de 120 jours pour des mortiers pouzzolaniques exposés à l'air libre en les comparant à des mortiers pouzzolaniques conservés dans l'eau pour le même âge. De cela, on déduit une meilleure isolation thermique.

La principale conclusion à laquelle on a abouti, c'est que le matériau substitué de mélange de pouzzolane et perlite au ciment Portland confère au mortier une meilleure conductivité thermique. Les mortiers pouzzolaniques peuvent être recommandés comme matériaux isolants thermique parce que la conductivité thermique des échantillons est faible en fonction du temps et lorsque la teneur en pouzzolane augmente. D'où, l'efficacité énergétique de ces matériaux.[31]

## **Chapitre 4 : Etude des caractéristiques thermiques de bétons de granulats légers de la pouzzolane du moyen Atlas**

---

### **Chapitre 4 : Etude des caractéristiques thermiques de bétons de granulats légers de la pouzzolane du moyen Atlas**

#### **4-1 Objectif**

Bouyahyaoui et al [41] ont présenté une étude expérimentale portant sur la caractérisation thermomécanique de la pouzzolane (roche volcanique très répandue dans la région d'Azrou au Moyen Atlas au Maroc). L'objectif de ce travail est d'évaluer l'influence de la pouzzolane sur la conductivité thermique du béton pouzzolanique en utilisant différentes formulations de béton et ce, en substituant des pourcentages variés de graviers et sables usuels par des graviers et sables à base de la pouzzolane. La caractérisation thermique des échantillons a consisté à déterminer la conductivité thermique et la capacité calorifique. Les résultats obtenus ont montré que la pouzzolane est un matériau local qui présente une résistance thermique importante et peut être considérée comme un bon isolant en efficacité énergétique et thermique dans le secteur du bâtiment.

#### **4-2 Introduction**

Dans le cadre de la transition énergétique, la réglementation thermique de la construction marocaine appliquée depuis 2015, exige que les déperditions dans le bâtiment n'excèdent pas un certain seuil selon le zonage climatique du pays. Pour se conformer à ce règlement, deux possibilités peuvent être envisagées, soit d'augmenter les épaisseurs des éléments de l'enveloppe et des séparations, soit de travailler avec des matériaux de faible conductivité thermique. La première

## **Chapitre 4 : Etude des caractéristiques thermiques de bétons de granulats légers de la pouzzolane du moyen Atlas**

---

solution reste difficile à appliquer pour les maisons de petite surface vu qu'elle entraîne une consommation importante d'espace et à fortiori un prix de revient du produit très coûteux. De ce fait, la deuxième solution semble être plus acceptable. Dans cette optique, nous proposons d'étudier un matériau de construction élaboré à base de pouzzolane.

La pouzzolane utilisée est une roche volcanique du moyen Atlas marocain qui se définit comme un matériau silico-alumineux. Elle se caractérise par sa légèreté et sa grande porosité qui est de l'ordre de 45% .

### **4-3 Etude expérimentale**

L'étude expérimentale a consisté en l'étude de la conductivité thermique et la capacité calorifique d'échantillons à base de pouzzolane.

#### **4-3-1 Mesure de la conductivité thermique**

Vu la nature de notre matériau et la disponibilité des appareils de mesures, le calcul a été effectué par la méthode du plan chaud.

Les échantillons étudiés ont été confectionnés en substituant un pourcentage des graviers usuels par des graviers pouzzolaniques, et une partie du sable de mer par du sable pouzzolanique

Pour la simplification, ils ont utilisé les abréviations suivantes :

- BnGPZ : Béton contenant n% des graviers pouzzolaniques à la place des graviers usuels.
- BnSPZ: Béton contenant n% du sable pouzzolanique à la place du sable de mer.
- MnSPZ: Mortier contenant n% du sable pouzzolanique à la place du sable de mer.

Les mélanges étudiés sont : B25GPZ, B40GPZ, B100GPZ, B40SPZ, M50SPZ et M100SPZ.

Les échantillons ont été préparés selon les dimensions normalisées des films chauds, à savoir :

- une forme cylindrique : rayon= $10 \pm 0,4$  cm et épaisseur= $2 \pm 0,4$  cm
- une forme parallélépipédique :  $10 \times 10 \times 2$  cm<sup>3</sup>

## Chapitre 4 : Etude des caractéristiques thermiques de bétons de granulats légers de la pouzzolane du moyen Atlas

---

Etant donné que la conductivité thermique est influencée par l'humidité, les échantillons ont été placés dans l'étuve à 70°C jusqu'à ce que leur masse se stabilise.

### 4-3-1-1 Technique de mesure

La méthode est basée sur la création d'un flux de chaleur unidirectionnel passant par l'échantillon et le polystyrène à l'aide d'une résistance thermique. Le montage expérimental se compose des éléments suivants :

Un polystyrène, isolant placé au-dessous de la résistance thermique, permet de maximiser le flux passant à travers l'échantillon.

Deux blocs d'aluminium, utilisés pour réduire le temps de la phase transitoire profitant de sa grande conductivité.

Trois thermocouples pour la mesure de la température dans des points particuliers (figure 23).

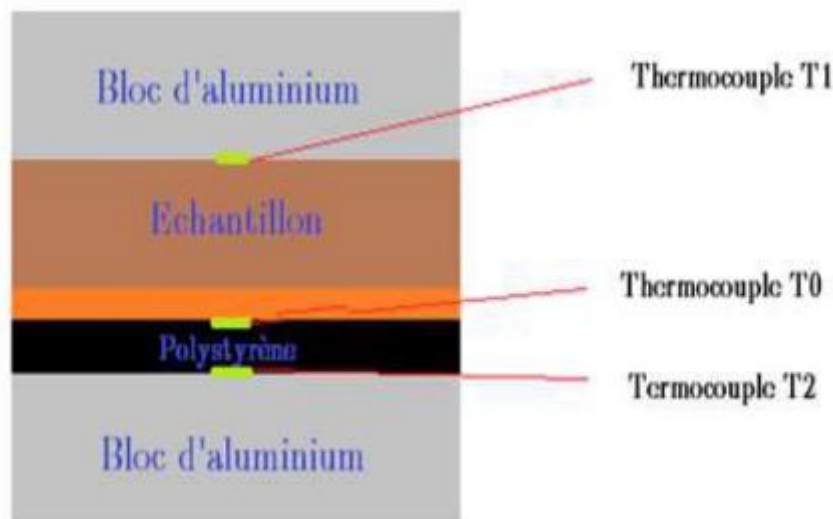


Figure 23 : Méthode du plan Chaud

En effectuant le bilan énergétique de l'échantillon :

---

## Chapitre 4 : Etude des caractéristiques thermiques de bétons de granulats légers de la pouzzolane du moyen Atlas

---

Flux induit par effet de Joule

$$\phi_J = RI^2 = R \times \left(\frac{U}{R}\right)^2 = \frac{U^2}{R} \quad (1)$$

Avec

U : tension aux bornes de la résistance chauffante (V)

R : Résistance chauffante ( $\Omega$ )

Flux de conduction traversant l'échantillon

$$\phi_E = \frac{\lambda_1 S}{e_1} (T_0 - T_1) \quad (2)$$

Avec

$\lambda_1$  : La conductivité thermique de l'échantillon

S : L'aire de l'échantillon

$e_1$  : Epaisseur de l'échantillon

$T_0$  : Température de la plaque chauffante

$T_1$  : Température entre l'échantillon et le bloc d'aluminium

Flux de conduction traversant le polystyrène

$$\phi_P = \frac{\lambda_2 S}{e_2} (T_0 - T_2) \quad (3)$$

Avec

$\lambda_2$  : La conductivité thermique du polystyrène

## Chapitre 4 : Etude des caractéristiques thermiques de bétons de granulats légers de la pouzzolane du moyen Atlas

---

S : L'aire du polystyrène

e<sub>2</sub> : Epaisseur du polystyrène

T<sub>0</sub> : Température de la plaque chauffante

T<sub>2</sub> : Température entre le polystyrène et le bloc d'aluminium

En utilisant les équations (1), (2) et (3), on trouve que :

$$\Phi_J = \Phi_E + \Phi_P$$

Alors

$$\frac{U^2}{R} = \frac{\lambda_2 S}{e_2} (T_0 - T_2) + \frac{\lambda_1 S}{e_1} (T_0 - T_1) \quad (4)$$

Finalement

$$\lambda_1 = \frac{e_1}{T_0 - T_1} \left[ \frac{U^2}{RS} - \frac{\lambda_2}{e_2} (T_0 - T_2) \right] \quad (5)$$

### 4-3-2 Mesure de la capacité calorifique de la pouzzolane en poudre : Méthode du calorimètre différentiel

La capacité thermique massique à pression constante  $C_p$ , est l'une des grandeurs thermodynamiques les plus importantes. Elle permet de déterminer les variations d'enthalpies en fonction de la température pour une phase donnée, le pouvoir de stockage de l'énergie thermique par la chaleur sensible et de déterminer implicitement la diffusivité et l'effusivité thermique d'un matériau.

La pouzzolane a été broyée sous forme de poudre pour la préparation des échantillons de 21 mg

## Chapitre 4 : Etude des caractéristiques thermiques de bétons de granulats légers de la pouzzolane du moyen Atlas

### 4-3-2-1 Technique de mesure

L'appareil utilisé, TA Instrument Q100, constitué de deux enceintes chauffantes et identiques, l'une contient l'échantillon à analyser et l'autre la référence (24), photo(10). Lors de l'utilisation de la DSC (Calorimétrie Différentielle à Balayage), une augmentation linéaire de la température est imposée ; on enregistre alors la différence de puissance électrique  $W(t)$  fournie aux deux enceintes (fours) afin de les maintenir en permanence à une température identique ( $T_1(t) = T_2(t)$ ).

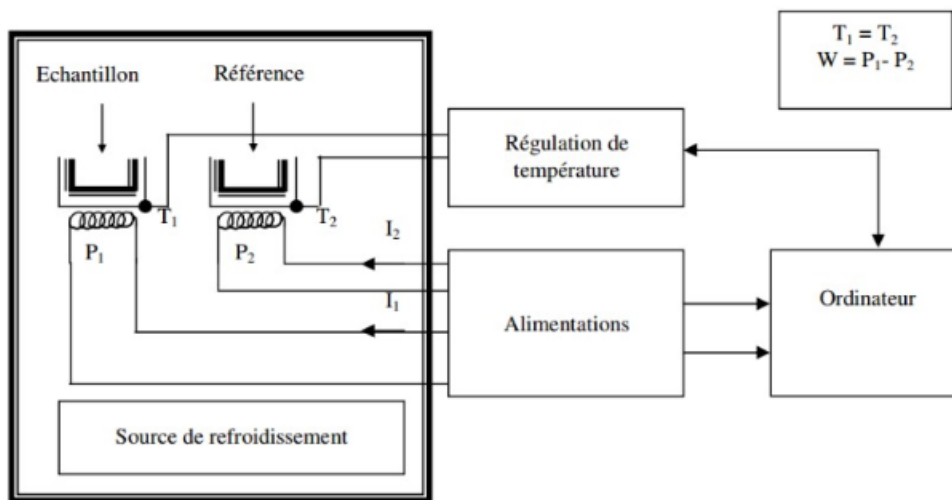


Figure 24 : Principe de mesure du calorimètre différentiel



Photo 10 : Calorimètre différentiel

## Chapitre 4 : Etude des caractéristiques thermiques de bétons de granulats légers de la pouzzolane du moyen Atlas

---

### 4-3-2-2 Principe de la détermination du $C_p$

L'énergie fournie au corps

$$Q = \Delta H = m C_p \Delta T$$

$$\frac{dH}{dt} = m C_p \frac{dT}{dt}$$

$\frac{dH}{dt}$  : correspond au flux de chaleur que mesure la DSC

$\frac{dT}{dt}$  : correspond à la vitesse de montée en température réelle lors de l'essai

$$C_p = \frac{\frac{dH}{dt}}{m \frac{dT}{dt}}$$

Donc :

### 4-4 Résultats

Les résultats de l'étude de la conductivité thermique des échantillons sont résumés dans les tableaux ci-dessous :

**Tableau 13** : Conductivité thermique du béton pouzzolanique

Echantillon	Conductivité thermique (W/K.m)
B25GPZ	0,985
B40GPZ	0,808
B100GPZ	0,528

## Chapitre 4 : Etude des caractéristiques thermiques de bétons de granulats légers de la pouzzolane du moyen Atlas

---

B40SPZ	1,229
--------	-------

**Tableau 14 :** Conductivité thermique du mortier pouzzolanique

Mélanges	Conductivité thermique (W/K.m)
M50SPZ	0,506
M100SPZ	0,289

Ils ont constaté que l'incorporation du gravier pouzzolanique dans le béton permet de réduire la conductivité thermique. Elle passe de 0,985 W/K.m pour un béton contenant 25% de gravier pouzzolanique (B25GPZ) à 0,528 W/K.m pour un béton contenant uniquement du gravier à base de pouzzolane (B100GPZ) (Tableau 13).

De même pour le mortier, la conductivité thermique est passée de 0,506 W/(°K.m) pour M50SPZ à 0,289 W/(°K.m) pour M100SPZ (Tableau 14).

En ce qui concerne la capacité calorifique, nous remarquons qu'elle augmente en fonction de la température. Elle passe de 765,7 (J/K.Kg) pour une température de -10°C à 1096 (J/K.Kg) pour une température de 290°C (Figure 25)

## Chapitre 4 : Etude des caractéristiques thermiques de bétons de granulats légers de la pouzzolane du moyen Atlas

---

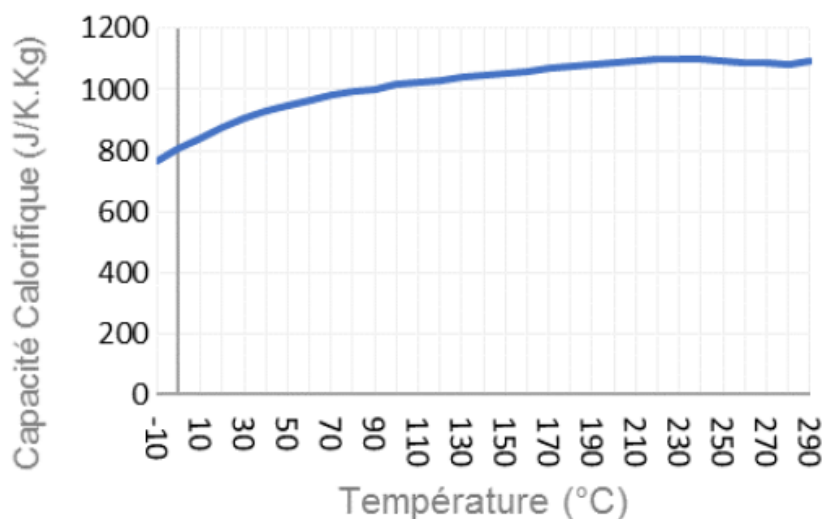


Figure 25 :. Capacité calorifique en fonction de la température

### 4-5 Discussion

La pouzzolane se caractérise par une grande porosité, due aux nombreuses bulles d'air qu'elle contient. Son incorporation dans le béton et le mortier permet de réduire la conductivité thermique. Cette réduction est de l'ordre de 76%, elle passe de 2,2 W/(°K.m) pour un béton usuel à 0,528 W/(°K.m) pour un béton à gravier entièrement à base de pouzzolane. Pour le mortier, elle diminue d'environ 78%. Elle passe de 1,3 W/(°K.m) pour un mortier usuel à 0,289 W/(°K.m) pour un mortier à sable entièrement à base de pouzzolane ; ce résultat est conforme aux études bibliographiques

En ce qui concerne la capacité calorifique, elle est de l'ordre de 900 J/°K.Kg pour des températures d'utilisation dans le secteur du bâtiment (-10 °C à 45 °C ). Ce qui est en en concordance avec les résultats de la littérature

Le comportement mécanique de ces mélanges a montré une faible résistance à la compression par rapport au béton usuel ce qui limite leur utilisation aux éléments secondaires non structuraux .

## **Chapitre 4 : Etude des caractéristiques thermiques de bétons de granulats légers de la pouzzolane du moyen Atlas**

---

L'introduction de ces matériaux dans la couche de forme et la couche de protection de l'étanchéité permet d'amortir la variation de la température de la face interne et d'augmenter le déphasage entre les pics des températures.

### **4-6 Conclusion**

La pouzzolane du moyen Atlas comparée à la pouzzolane Algérienne de Bénie-Saf peut jouer un rôle très important dans la politique de la transition énergétique. Son utilisation permet de réduire les déperditions thermiques à travers les éléments de l'enveloppe du bâtiment : les ponts thermiques et la couche d'enduit des façades internes et externes (le mortier). Enfin, il est recommandé d'étudier le volet économique de ces solutions et de les comparer à l'utilisation d'un isolant thermique existant sur le marché.

## Chapitre 5: Identification des Matériaux Utilisés

---

### Chapitre 5: Identification des Matériaux Utilisés

#### 5-1 Le ciment

Un seul type de ciment a été utilisé dans la composition des différents BAP : Un ciment CPA CEMI 42,5 provenant de l'usine de Zahana (ouest Algérien). Il contient au moins 95% de clinker. Le reste est composé de constituants secondaires tel que le gypse comme régulateur de prise.

Le choix de ce ciment sans ajout est justifié par l'étude de l'effet de chaque substitut sur les performances des bétons autoplaçants sans qu'il y'ait d'interférence avec les autres ajouts présents dans les ciments composés et qui pourraient fausser les interprétations.

Ce ciment présente une résistance moyenne en compression à 28 jours de 42,5 MPa. Sa surface spécifique Blaine est de 318 m<sup>2</sup>/kg et sa densité de 3,13.

La finesse de mouture d'un ciment est caractérisée par sa surface spécifique ou surface développée des grains contenus dans une masse donnée. La surface spécifique Blaine du ciment a été déterminée par la méthode du perméabilimètre à Blaine selon la norme NF EN 196-6 et exprimée en cm<sup>2</sup>/g.

La composition chimique du ciment est donnée par le tableau 15

## Chapitre 5: Identification des Matériaux Utilisés

---

**Tableau 15 :** Composition chimique du ciment utilisé

Composants chimiques	Teneur massique (%)
SiO <sub>2</sub>	22.30
CaO	63.60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.10
MgO	1.43
Na <sub>2</sub> O	0.34
K <sub>2</sub> O	0.70
SO <sub>3</sub>	1.24
Perte au feu	1.18
Insolubles	0.36

Sa composition minéralogique illustrée dans le tableau 16 est obtenue en utilisant la formule de Bogue appliquée au clinker ordinaire.

**Tableau 16 :** Composition minéralogique du clinker

Constituants	Teneur massique (%) du CEMI 42.5
C <sub>3</sub> S	58.57
C <sub>2</sub> S	16.05
C <sub>3</sub> A	1.43
C <sub>4</sub> AF	17.11

La masse volumique apparente est obtenue par la pesée d'un récipient d'un litre rempli de ciment sans aucun tassement. La masse volumique absolue du ciment a été déterminée, selon NF P 18 – 555, par le pycnomètre et le benzène.

La consistance normalisée de la pâte de ciment est déterminée selon la norme NF EN196-3

## Chapitre 5: Identification des Matériaux Utilisés

---

à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une sonde. Le temps de prise est déterminé selon la norme NF EN 196-3 à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une aiguille. Ces caractéristiques physiques sont groupées dans le tableau 17.

**Tableau 17** : Caractéristiques physiques du CPA CEM1 42.5.

<b>L'état du ciment</b>	<b>Caractéristiques</b>	<b>Valeurs</b>
<b>Ciment Anhydre</b>	Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.18
	Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	3.13
	Surface spécifique Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3180
<b>Pâte de Ciment</b>	Teneur en eau pour consistance normale (%)	25
	Début de prise	2h 45
	Fin de prise	3h 55

### 5-2 La Vase

La vase étudiée a été prélevée en aval du barrage Chorfa dans la zone de rejet. Après curage, des essais de caractérisation physiques et chimiques ont été effectués sur des échantillons prélevés par soins.

La composition chimique de la vase du barrage Chorfa permet d'envisager la transformation des structures argileuses stables en structures amorphes, cette transformation nous assure la réactivité pouzzolanique recherchée pour la substitution envisagée.

Nous avons donc concrétisé le processus de préparation et de transformation par traitement thermique de l'échantillon de vase, ce qui nous a permis par la suite de procéder à l'évaluation des caractéristiques physiques de cette vase. La vase draguée passe par les différentes étapes suivantes :

## Chapitre 5: Identification des Matériaux Utilisés

---

**1. Séchage :** L'échantillon de vase est d'abord séché par passage à l'étuve (105 °c) afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage ainsi que son tamisage.

**2. Concassage :** La vase étuvée est concassée pour faciliter son broyage.

**3. Broyage :** La vase concassée est totalement broyée.

**4. Tamisage :** La vase broyée est tamisée par voie sèche à travers un tamis de 80 µm où seul le passant est considéré par la suite.

**5. Calcination :** C'est un traitement thermique effectué sur la vase préparée préalablement par cuisson à 750 °c .[27]



**Photo 11 :** Four de calcination utilisé (+ 1200°C).

La vitesse de cuisson doit être réglée à 5 °c/min afin de garantir une cuisson lente et uniforme, ensuite, la température de cuisson qui est de (750 °c ±5) est maintenue constante pendant 05 heures pour obtenir à la fin le produit final qui est la vase calcinée et qui doit être conservé à l'abri de l'air et de l'humidité dans des sacs hermétiques.

## Chapitre 5: Identification des Matériaux Utilisés

---



**Photo 12 :** Vase après calcination (produit final)

La composition chimique de cette vase calcinée a été effectuée au laboratoire LTPO, les résultats d'analyse sont représentés dans le Tableau 18 :

**Tableau 18 :** Caractéristiques chimiques de la vase calcinée

<b>Les composants chimiques</b>	<b>Les teneurs %</b>
SiO <sub>2</sub>	55.34
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.75
CaO	13.82
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.43
SO <sub>3</sub>	0.17
SO <sub>4</sub>	/
Total	92.51
CaCO <sub>3</sub>	23.5
Carbonates	4.64
CO <sub>2</sub>	2.04
H <sub>2</sub> O	0.87

## Chapitre 5: Identification des Matériaux Utilisés

---

Selon la norme ASTM C618 :

silice-CaO=41,52%  $\geq$  34%, donc la vase calcinée comporte une phase vitreuse.

%SiO<sub>2</sub>+%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>= 78,52%  $\geq$  70%, La vase calcinée du barrage de Chorfa est donc pouzzolanique.

### 5-2-1 Caractéristique physiques de la vase

La vase étudiée a fait l'objet d'une caractérisation physicochimique afin de pouvoir l'identifier. Les masses volumiques apparentes de la vase calcinée ont été obtenues par la pesée d'un récipient d'un litre rempli sans aucun tassement.

Les masses volumiques absolues ont été déterminées, selon NF P 18-555, par le pycnomètre de Le Châtelier et le benzène.

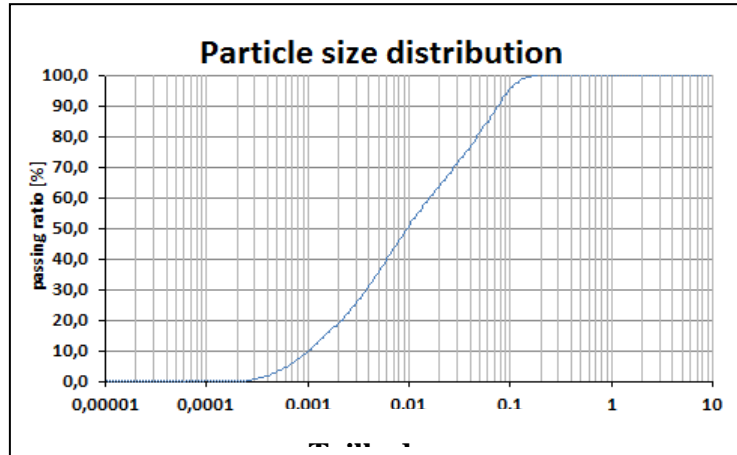
**Tableau 19** : Caractéristiques physiques de la vase calcinée de Chorfa.

Masse volumique apparente g/cm <sup>3</sup>	0.57
Masse volumique absolue g/cm <sup>3</sup>	2.65
Finesse cm <sup>2</sup> /g	7830

L'analyse granulométrique de la vase calcinée a été effectuée au laboratoire de la cimenterie LAFARGE située dans la région de Sig (figure 26).

## Chapitre 5: Identification des Matériaux Utilisés

---



**Figure 26** : Granulométrie de la vase calcinée de Chorfa [Laboratoire LAFARGE, Sig].

### 5-3 Pouzzolane Naturelle

La pouzzolane naturelle utilisée est extraite du gisement de Bouhamidi situé au sud de Béni-Saf. Cette pouzzolane est essentiellement formée de scories et de pierres ponce bien stratifiées, de couleur variant du rouge au noir.

La pouzzolane naturelle utilisée dans tous les essais est sous forme d'une poudre (photo 13), résultante de concassage des scories pouzzolaniques ; la pouzzolane est étuvée pendant 24 heures à une température de 50°C afin d'éliminer l'humidité, ensuite les broyée jusqu'à ce que la poudre résultante puisse passer à travers un tamis de mailles 80 µm.

## Chapitre 5: Identification des Matériaux Utilisés

---



**Photo 13 :** Poudre de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf broyée à 80  $\mu\text{m}$ .

La composition chimique de la pouzzolane naturelle après broyage est montrée dans le tableau 20

**Tableau 20 :** Composition chimique élémentaire de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf.

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	Cl	CaCO <sub>3</sub>
12,36	42,95	16,32	9,49	0,01	1,39	3,00	4,20	0,00	10,75

Les caractéristiques physiques de cette pouzzolane sont mentionnées dans le tableau 21

**Tableau 21 :** Caractéristiques physiques de la Pouzzolane Naturelle de Béni-Saf.

Masse volumique absolue g/cm <sup>3</sup>	<b>2,60</b>
Finesse cm <sup>2</sup> /g	<b>4330</b>

## Chapitre 5: Identification des Matériaux Utilisés

---

### 5-4 Les sables

Pour cette étude, nous avons utilisé une composition en granulats, comportant un sable naturel siliceux, provenant de la carrière de Oued El Kheir (région de Mostaganem) et un sable concassé calcaire provenant de la carrière de Terga (région oranaise).

Le sable qui sera utilisé dans tous les confections des mortiers est un sable corrigé de 40 % Sable de Naturel et de 60 % Sable concassé de carrière.

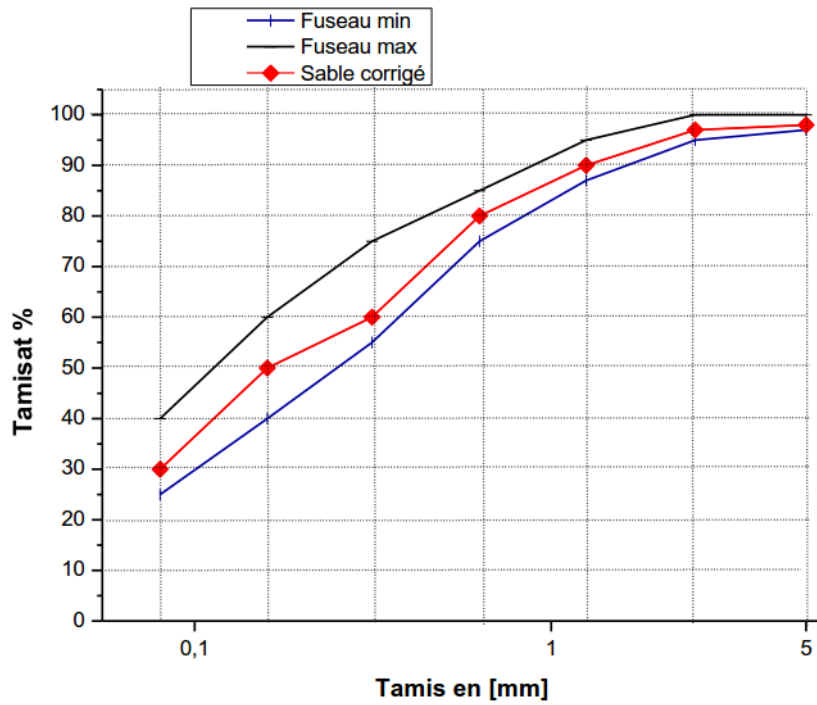
Le tableau 22 et la figure 27 fournissent les propriétés des sables utilisés.

**Tableau 22:** Caractéristiques Physiques des sables utilisés.

Origine du sable	Sable Naturel	Sable de Carrière	Sable Corrigé
Classe	0/1	0/4	0/4
Nature	Siliceux	Calcaire	Silico-Calcaire
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2,60	2,70	2,68
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,70	1,90	1,83
Pourcentage en éléments fin %	0,33	1	10
Module de finesse $M_f$	1,64	2,63	2,32

## Chapitre 5: Identification des Matériaux Utilisés

---



**Figure 27 :** Courbe granulométrique du sable corrigé

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

C'est dans le cadre du développement durable et l'efficacité énergétique et thermique des bâtiments que nous est venue l'idée de la valorisation de ces déchets naturels, qui possèdent de nombreuses potentialités souvent ignorées. Les voies de valorisation sont nombreuses et on été explorées par de nombreux chercheurs dans le domaine de bâtiment comme alternatives aux méthodes traditionnelles de production des matériaux de constructions (granulats, sable, ajouts au ciment).

Les ciments avec ajouts sont actuellement les plus utilisés pour la confection des mortiers et bétons. Ces ciments présentent plusieurs avantages écologiques et économiques en plus de leur rôle dans l'amélioration de certaines propriétés des bétons.

L'objectif principal des études qu'on a exposé est la valorisation de la pouzzolane naturelle, la vase calcinée et la perlite en tant qu'ajout cimentaire dans le mortier et comme granulats dans le béton.

En ce qui concerne l'étude des propriétés mécaniques, la conductivité thermique des mortiers pouzzolaniques qui a été menée par Hamadache [31], nous avons conclu ce qui suit :

- un matériau industriel, le ciment remplacé par un matériau naturel qui est la pouzzolane et la perlite. L'un et l'autre n'ont pas le même prix de revient. En effet la pouzzolane naturelle et la perlite étant des produits naturels et ne passant donc pas par des processus industriels énergivores. Elles sont beaucoup moins chères que le ciment, qui lui, passe par des processus très coûteux.

Mais, les mortiers obtenus par substitution du ciment par les matériaux tels que la pouzzolane et la perlite ne peuvent être retenus que s'ils présentent des performances physico-chimiques et thermiques nettement meilleures que celles obtenues avec le ciment seul.

-Les résultats obtenus au cours de cette étude montrent une meilleure valeur de la conductivité thermique à l'âge de 300 jours pour des mortiers pouzzolaniques exposés à l'air libre en les comparants à des mortiers pouzzolaniques conservés dans l'eau pour le même âge. De cela, on déduit une meilleure isolation thermique.

## Conclusion générale

---

-La conclusion principale à laquelle nous avons abouti, c'est que le matériau substitué de mélange de pouzzolane et perlite au ciment Portland confère au mortier une meilleure conductivité thermique. Les mortiers pouzzolaniques peuvent être recommandés comme matériaux isolants thermique par ce que la conductivité thermique des échantillons est faible en fonction du temps, et la teneur en pouzzolane augmente. D'où, l'efficacité énergétique de ces matériaux.

Pour les autres différentes études, on a conclu que :

- Les résistances à la compression diminuent en général avec l'augmentation du pourcentage d'ajout de pouzzolane.
- la résistance à la compression au jeune âge des mortiers est réduite par l'incorporation de la pouzzolane naturelle, cette dernière s'améliore en fonction du temps et atteint son optimum à long terme
- Les résistances à la flexion diminuent légèrement en général avec l'augmentation du pourcentage d'ajout de pouzzolane.
- Pour des pourcentages inférieurs à 20 % la pouzzolane naturelle donne des résistances plus élevées que la vase calciné, pour des pourcentages entre 20 et 30% les résistances pour la vase calcinée deviennent plus élevées.
- La résistance à la compression des mortiers qui contiennent 10% de pouzzolane artificielle et ceux qui contiennent 10% de pouzzolane naturelle rejoint celle du témoin à 28 jours.
- Les résistances obtenues avec les mélanges à base de vase calciné sont supérieures à celles obtenues à base de la pouzzolane naturelle.
- L'incorporation de la pouzzolane dans le béton et le mortier permet de réduire la conductivité thermique. Cette réduction est de l'ordre de 76%, elle passe de 2,2 W/(°K.m) pour un béton usuel à 0,528 W/(°K.m) pour un béton à gravier entièrement à base de pouzzolane. Pour le mortier, elle diminue d'environ 78%. Elle passe de 1,3 W/(°K.m) pour un mortier usuel à 0,289 W/(°K.m) pour un mortier à sable entièrement à base de pouzzolane
- la capacité calorifique, elle est de l'ordre de 900 J/°K.Kg pour des températures d'utilisation dans le secteur du bâtiment (-10 °C à 45 °C ).

## Conclusion générale

---

Le comportement mécanique de ces mélanges a montré une faible résistance à la compression par rapport au béton usuel ce qui limite leur utilisation aux éléments secondaires non structuraux. L'introduction de ces matériaux dans la couche de forme et la couche de protection de l'étanchéité permet d'amortir la variation de la température de la face interne et d'augmenter le déphasage entre les pics des températures.

Finalement, si le facteur temps était en notre faveur notre travail de recherche n'aurait pas dû être limité au stade d'identification des matériaux utilisés. Le bilan des recherches citées dans notre projet serait donc très utile pour l'élaboration de notre contribution.

Ce bilan va être plus qu'une recommandation pour essayer de valoriser un autre type d'ajout qui représente une combinaison optimale entre la vase de Chorfa et la pouzzolane naturelle de Béni-Saf. Surtout pour enrichir et actualiser la bibliographie particulièrement sur le comportement thermique à base de ces déchets naturels..

## Références bibliographiques

---

### Références bibliographiques

- [1]. **F.Larbi chaht**, « Caractérisation des propriétés thermiques des liants hydrauliques au jeune âge: ciment et pouzzolane », mémoire de magister, Université Abdelhamid ibn badis Mostaganem, 2012
- [2]. [http://ftp.clermont-fd.archi.fr/taiga\\_ftp/cours/2016/1368/ENSACF-AMBIANCES-L1\\_01\\_LE\\_CONFORT\\_THERMIQUE.pdf](http://ftp.clermont-fd.archi.fr/taiga_ftp/cours/2016/1368/ENSACF-AMBIANCES-L1_01_LE_CONFORT_THERMIQUE.pdf)
- [3]. <https://energieplus-lesite.be/theories/confort11/le-confort-thermique-d1/>
- [4]. <https://isolation-thermique.org/conseils-isolation-thermique/isolation-interieur-exterieur/isolation-thermique-interieur/la-notion-de-confort-thermique/>
- [5]. [https://seformeravec-saint-gobain.com/medias/page\\_essentiels/SG\\_ESS4\\_2016\\_BAT\\_HD\\_pap.pdf](https://seformeravec-saint-gobain.com/medias/page_essentiels/SG_ESS4_2016_BAT_HD_pap.pdf)
- [6]. [http://thesis.univ-biskra.dz/2426/6/CH%203\\_Quelques%20notions%20sur%20la%20thermique%20du%20batiment.pdf](http://thesis.univ-biskra.dz/2426/6/CH%203_Quelques%20notions%20sur%20la%20thermique%20du%20batiment.pdf)
- [7]. <http://lacnl93.com/isolation-thermique/>
- [8]. **S.Foura**, Livre « La haute performance énergétique en Algérie, HPE., 2011 , P n°59, P n°134
- [9]. [https://pmb.univ-saida.dz/butecopac/doc\\_num.php?explnum\\_id=438](https://pmb.univ-saida.dz/butecopac/doc_num.php?explnum_id=438)
- [10]. **N.Belbachir** , Mémoire de magister : « Etude des propriétés mécaniques à court terme de béton à base de ciment pouzzolanique de synthèse », Université Abdelhamid ibn badis Mostaganem, 2012.
- [11]. **Sardon.G 58**, Les formations volcaniques tertiaires et quaternaires du Tell oranais, Edition Eyrolles, 1958.
- [12]. **Peter. C. Hewlett 04** Lea's chemistry of cement and concrete , 4 ème édition, ISBN: 0750662565, Publisher: Elsevier Science & Technology Books, P472-480, 2004.
- [13]. **Benkaddour. M, Kazi Aoual.F et Semcha.A 09**, Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle, Article de LABMAT, département de génie civil, ENTSET d'Oran, 2009.

## Références bibliographiques

---

- [14]. **Venuat. M 89**, La pratique des ciments, mortier et bétons- Tome 1 : caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers, 2<sup>ème</sup> édition- Collection moniteur- P277, 1989.
- [15]. **Blomblet .J.P 85**, liants à bas coût pour les pays en développement, Rapport de fin de contrat Rexcoop, Lyon:INSA.1985, p123.
- [16]. **Dron. R 78** , L'activité pouzzolanique. Bull. liaison Labo. Ponts et Chaussées, vol. 1978, p66-p69.
- [17]. **Barron.J, Sauterey.R 82**, Le béton hydraulique .Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées Paris.1982, p 559.
- [18]. **Foucault.A et Raoult.JF 80**, Dictionnaire de géologie, Editions Masson, Paris, ISBN 2-225-65461-1, ISSN 0338-2672.1980
- [19]. **Djeddou. M et Remini. B 98**, Incorporation Environnementale des sédiments issue d'opérations de dragage dans le domaine des matériaux de construction Cas d'étude
- [20]. **Chinje Melo.U, Billong.N 04**, Activité pouzzolanique des déchets de briques et tuiles cuites, African Journal of Science and Technology (AJST), Science and engineering Series Vol. 5, N°1, Juin 2004, P 92-100.
- [21]. **Bich C 05**, Contribution à l'étude de l'activité thermique du kaolin :évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique, thèse pour l'obtention d'un grade de docteur, spécialité génie civil, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005,p 44-45
- [22]. **Laoufi.L 02**, thèse "contribution à l'étude des caractéristiques physico-mécanique es bétons à base de ciment pouzzolanique", ENSET d'Oran, 2002.
- [23]. **Kaid.N 00**, Contribution à l'étude des caractéristiques physico-chimiques des mortiers pouzzolaniques, thèse de magistère à l'USTMB D'Oran, 2000.
- [24]. **Berraih. M 10**, Etude des mortiers contenant de la pouzzolane naturelle et des déchets de verre, thèse de magistère à l'ENSET d'Oran, 2010
- [25]. **Kerbouche .A 09**, Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et la durabilité des mortiers, thèse de magistère à l'ENSET d'oran, 2009.

## Références bibliographiques

---

- [26]. **Mebrouki.A, Cyr.M, Bouhamou.N, Belas Belaribi.N 06**, Valorisation de matériaux locaux, Etude de comportement mécanique de mortiers incorporant une pouzzolane naturelle Algerienne, Article de LMDC université de Mostaganem, INSA/UPS, Toulouse, France, 2006
- [27]. **Semcha A.** «Valorisation des sédiments de dragage: Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug». Thèse de doctorat à l'Université de Reims Champagne-Ardenne. Génie Civil. Décembre 2006.
- [28]. **Besseghier. N 08**, Valorisation de la vase du barrage de Fergoug pour son utilisation dans le béton, thèse de magistère à l'université de Mostaganem, 2008.
- [29]. **Chikouche.M 08**, Effet des ajouts à base d'argiles gréseuses et vaseuses sur les propriétés des matériaux cimentaires, thèse de magistère à l'université de Msila, 2008.
- [30]. **Benkaddour. M, Kazi Aoual.F et Semcha.A 09**, Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle, Article de LABMAT, département de génie civil, ENTSET d'Oran, 2009.
- [31]. **M.Hamadache 18**, thèse de doctorat « Résistances mécaniques, conductivité et résistance à la corrosion des mortiers pouzzolaniques », Ecole Nationale Polytechnique M-A d'Oran , 2018.
- [32]. **ASTM C1012-04**, « Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution », 2004.
- [33]. **O. Chaib et al**, « Etude de l'influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance mécanique des mortiers à base de ciments composés » 33èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, 27 au 29 mai 2015
- [34]. **A. Ali Aichouba et al** ; « Effets de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire ». Colloque CMEDIMAT 2005, ENSET Oran 06 et07 Décembre 2005.
- [35]. **Erdem et al.** « Effect of various additives on the hydration of perlite gypsum plaster and perlite-portland cement pastes». Turk J Chem1997;21(3):209–14.
- [36]. **R. Chihaoui**, « Durabilité des matériaux cimentaires vis- à-vis d'un environnement chimiquement agressif ». Mémoire de magister génie civil à l'USTMB d'Oran, 2008.

## Références bibliographiques

---

- [37]. **ASTM C 1437-01**, « Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar », 2001.
- [38]. **Senhadji Y.**, « L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfates) ». Thèse de doctorat, Université de sciences et de la technologie d'Oran MB, Algérie, 2013.
- [39]. **Day R.L., Shi C.**, « Influence of the fineness of pozzolan on the strength of lime natural pozzolan cement pastes », *Cement and Concrete Research*, Vol. 24(8), p. 1485-1491, 1994.
- [40] **ISO8302-91.**, « Isolation thermique, détermination de la résistance thermique et des propriétés connexes en régime stationnaire », méthode de la plaque chaude gardée, Model ISOMET 2104, Heat Transfer Analyzer, (1991).
- [41]. **A. Bouyahyaoui, M. Cherkaoui, My L. Abidi, T. Cherradi** Mechanical and chemical characterisation of pozzolan of middle atlas in morocco accepted, *International Journal of GEOMATE*, Jan., 2018 Vol.14, Issue 41, pp.126-134