



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
People's Democratic republic of Algeria  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministry of Higher Education and Scientific Research  
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم  
University Abdelhamid Ibn Badis - Mostaganem  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
Faculty of Sciences and Technology  
قسم الهندسة المدنية والمعمارية  
Civil engineering & architecture department



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 ajouts pouzzolanique sur le  
comportement thermo-physiques des mortiers**

**Présenté par :**

- OULD MOUSSA Mourad Tadj eddine.

***Soutenu le 25 / 06 / 2020 devant le jury composé de :***

**Présidente :** Pr. BELAS Nadia

**Examineur :** Pr. BOUHAMOU Nasreddine

**Encadrant :** Dr. BELARBI Omar

**Année Universitaire : 2019 / 2020**



## REMERCIEMENTS

*Toute ma gratitude, grâce et remerciement à Allah le plus puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.*

*Je tiens à remercier mon encadrant  
**Mr. BELARBI OMAR** son ouvrier  
**Pr. BELAS NADIA** pour leurs aide et leurs  
encadrement durant toute la période de  
préparation de ce mémoire.*

*Je remercie également l'ensemble des enseignants du département de génie civil et l'ensemble des enseignants qui ont contribué à ma formation.*

*Je remercie les membres de jury qui m'ont fait l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.*

*Enfin, à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce projet.*

## **DEDICACES**

*Je dédie ce mémoire A mes chers parents pour  
Leur patience,*

*Leur soutien et leurs encouragements.*

*A mes chères sœurs*

*A tout ma grande famille et toute qu'a une relation  
avec elle Soit proche ou lointain.*

*A mes amies et mes collègues.*

*Sans oublier tous les enseignants qui ont contribué  
à mon soutien Scolaire*

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I:CIMENTS ET AJOUTS .....</b>	<b>3</b>
I.1 INTRODUCTION.....	3
I.2 CIMENT.....	4
I.2.1 Historique.....	4
I.2.2 Définition du ciment.....	4
I.2.3 Principales phases du ciment portland.....	4
I.2.4 Les différentes méthodes de fabrication de ciment.....	5
I.2.5 Les Constituants principaux de ciment.....	6
I.2.6 Les principales catégories de ciment.....	8
I.2.7 Les caractéristiques du ciment portland.....	10
I.3 CONCLUSION .....	13
<b>CHAPITRE II:LES AJOUTS POUZZOLALESNQUES .....</b>	<b>14</b>
II.1 INTRODUCTION.....	15
II.2 TYPES DE POUZZOLANE .....	15
II.2.1 Pouzzolane naturelle.....	15
II.2.2 Pouzzolane artificielle.....	15
II.3 HISTORIQUE DES POUZZOLANES NATURELLES .....	16
II.4 LOCALISATION DU GISEMENT DE BENI-SAF.....	16
II.5 NATURE DU MATERIAU POUZZOLANIQUE DE BENI-SAF.....	17
II.5.1 La couleur des pouzzolanes.....	17
II.5.2 Qualités des roches utiles du gisement Bou-Hamidi .....	17
II.5.3 Réaction pouzzolanique.....	18
II.6 EFFET DE LA POUZZOLANE.....	19
II.6.1 A l'état frais .....	19
II.6.2 L'état durci.....	20
II.7 PROPRIETES DE LA POUZZOLANE NATURELLE .....	20
II.7.1 Propriétés hydrauliques .....	20
II.7.2 Propriétés physiques de remplissage .....	20
II.7.3 l'utilisation de la pouzzolane .....	20
II.8 LA PERLITE.....	21
II.8.1 Définition et genèse.....	21
II.8.2 Caractéristiques physique, chimique et minéralogique de la perlite .....	22
II.8.3 La perlite en Algérie.....	24
II.9 CONCLUSION .....	26

## **CHAPITRE III:SYNTHESE DES ETUDES SUR LES PROPRIETES PHYSICO-MECANQUES DES MORTIERS A BASE DE POUZZOLANE ET DE PERLITE**27

III.1 INTRODUCTION .....	28
III.2 ABSORPTION CAPILLAIRE.....	28
III.3 RESISTANCES MECANQUES DES MORTIERS .....	29
<i>III.3.1 Résistances à la traction.....</i>	<i>29</i>
<i>III.3.2 Résistance à la compression des mortiers à base de perlite.....</i>	<i>30</i>
III.4 CONCLUSION .....	34

## **CHAPITRE IV : ETUDE THERMIQUE DES MORTIERS CONTENANT LA PERLITE ET LA POUZZOLANE.....**35

IV.1 INTRODUCTION.....	36
IV.2 LES PROPRIETES THERMIQUES .....	36
<i>IV.2.1 Mesure de la conductivité thermique .....</i>	<i>36</i>
<i>IV.2.2 Mesure de la résistance thermique Rth.....</i>	<i>37</i>
<i>IV.2.3 Choix de la méthode de mesure des propriétés thermo physiques .....</i>	<i>38</i>
IV.3 MESURE DES PROPRIETES THERMIQUES DES MORTIERS.....	38
<i>IV.3.1 Mesure de la conductivité thermique des mortiers à l'air libre .....</i>	<i>38</i>
<i>IV.3.2 Mesure de la conductivité thermique des mortiers conservée dans l'eau .....</i>	<i>40</i>
<i>IV.3.3 Mesure de la résistance thermique (Rth) des mortiers à l'air libre et dans l'eau.....</i>	<i>41</i>
<i>IV.3.4 Comparaison entre la résistance thermique (Rth) et la conductivité thermique des mortiers à l'air libre et dans l'eau.....</i>	<i>42</i>
IV.4 CONCLUSION .....	45

## **V.CONCLUSION GENERALE.....**47

## **VI.REFERANCE BIBLIOGRAPHIES.....**50

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1:</b> Fabrication du ciment [1].....	3
<b>Figure 2:</b> Le processus de fabrication du ciment Portland. [35] .....	5
<b>Figure 3:</b> Détermination du temps de début de prise.[33].....	10
<b>Figure 4:</b> Détermination du temps de fin de prise. [33] .....	10
<b>Figure 5:</b> Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression. [37] .....	11
<b>Figure 6:</b> Résistance du mortier normal. [33] .....	12
<b>Figure 7 :</b> Localisation du gisement de Bouhamidi (Béni-Saf) [31].....	17
<b>Figure 8:</b> Gel de C-S-H. [31].....	18
<b>Figure 9 :</b> les réactions d'hydratation ciment et de la pouzzolane [32]. .....	19
<b>Figure 10:</b> Exemple typique d'une roche de perlite [36] .....	21
<b>Figure 11:</b> Coupe géologique schématique du gisement de perlite de Pálháza, Mont Tokaj, Hongrie. [36] .....	22
<b>Figure 12:</b> Différents degrés de perlitisation [33] .....	23
<b>Figure 13:</b> Séchage : L'échantillon est d'abord séché par passage à l'étuve (105 oc) afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage ainsi que son tamisage. ....	25
<b>Figure 14:</b> Concassage et broyage.....	25
<b>Figure 15 :</b> Evolution des coefficients d'absorption capillaire des différents mortiers.....	29
<b>Figure 16:</b> Evolution des résistances à la traction (MPa).[32] .....	30
<b>Figure 17:</b> Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des mortiers dans l'eau saturée en chaux [38].....	31
<b>Figure 18:</b> Evolution des résistances à la compression (MPa) [32].....	32
<b>Figure 19:</b> Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers dans l'eau saturée en chaux. [38] .....	33
<b>Figure 20:</b> Conductivimètre au laboratoire LABMAT (ENP Oran).....	36
<b>Figure 21:</b> Variation de la conductivité thermique en fonction du temps des mortiers à l'air libre.....	39
<b>Figure 22:</b> Variation de la conductivité thermique en fonction du temps des mortiers conservés dans l'eau .....	40

<b>Figure 23:</b> Variation de la résistance thermique en fonction du temps conservés dans l'eau .....	41
<b>Figure 24:</b> Variation de la résistance thermique en fonction du temps à l'air libre.....	42
<b>Figure 25:</b> Variation de la conductivité thermique, résistance thermique en fonction des teneurs pouzzolaniques (après 300 jours de conservation dans l'eau).....	43
<b>Figure 26:</b> Variation de la conductivité thermique, résistance thermique en fonction des teneurs pouzzolaniques à l'air libre à 300 jours .....	44

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1:</b> Composition chimique en oxydes d'un ciment ordinaire et notation cimenterie [3].....	4
<b>Tableau 2:</b> Les principales phases du ciment Portland [35] .....	5
<b>Tableau 3 :</b> Composition chimique du clinker. [35] .....	6
<b>Tableau 4:</b> Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition. [35].....	9
<b>Tableau 5:</b> Les classes de ciment selon la résistance à la compression. [23] .....	9
<b>Tableau 6:</b> Qualité et activité de la roche du gisement Bouhamidi [31]. .....	18
<b>Tableau 7:</b> Analyses chimiques (% en masse) de perlite brute de divers pays [33].....	23
<b>Tableau 8:</b> Propriétés physiques de la perlite brute. [33] .....	24
<b>Tableau 9:</b> Les principaux gisements de la perlite de Maghnia [33] .....	24
<b>Tableau 10:</b> Coefficients d'absorption capillaire [32] .....	28



## RESUME

Les ajouts cimentaires font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés mécaniques des matériaux cimentaires (mortier et béton). D'autre part leurs utilisations ont pour objectifs de réduire la consommation de clinker, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement.

Ce travail de recherche étudie les avantages et la possibilité de substitution partielle du ciment par les ajouts pouzzolaniques naturels tels que la perlite et leur influence sur l'activité pouzzolanique des mortiers. Cette étude avait pour objectif de préparer un ciment avec addition minérale en substituant en volume (0% et 20%) la perlite de Maghnia et la pouzzolane naturelle de Béni-Saf au ciment. Avec ce ciment des mortiers devaient être élaborés afin d'étudier leur comportement mécanique à la compression, leur absorption capillaire ainsi que leurs caractéristiques thermiques plus particulièrement la conductivité thermique.

D'après la synthèse des travaux, il ressort que le taux de 10% de perlite améliore la résistance à la compression des mortiers au très jeune âge (3 jours), par contre les taux de 20% contribue positivement au jeune et à long terme (7, 14, 28 et 90 jours). L'absorption capillaire est la plus faible pour le mortier à base de 20% de perlite par rapport au mortier à 10% et au témoin. Quant à la conductivité thermique, elle est plus faible pour les mortiers à base de pouzzolane et perlite ce qui les rend de meilleurs isolants.

**Mots-clés** : Ajout pouzzolanique, perlite, ciment, mortier, comportement mécanique, absorption capillaire, comportement thermique.

## ملخص

تعد الإضافات الإسمنتية حاليًا واحدة من أحدث التطورات في إنتاج الأسمنت ، لأن استخدامها يؤدي إلى تحسن في الخواص الميكانيكية للمواد الإسمنتية (الملاط والخرسانة). من ناحية أخرى ، تهدف استخداماتها إلى الحد من استهلاك الكلنكر ، من خلال المساهمة بطريقة بسيطة واقتصادية في حل المشاكل المرتبطة بالبيئة.

تدرس هذه الدراسة البحثية مزايا وإمكانية الاستبدال الجزئي للأسمنت بإضافات البوزولان الطبيعية مثل البيرلايت وتأثيرها على نشاط البوزولاني للملاط. كان الهدف من هذه الدراسة هو تحضير الأسمنت بإضافة المعادن عن طريق استبدال (0% و 20%) بالحجم من بيرلايت مغنية والبوزولان الطبيعي لبني صاف للأسمنت. مع هذا إسمنت الملاط ، كان لا بد من تطويرها من أجل دراسة سلوكها الميكانيكي تحت الضغط ، امتصاصها الشعري وكذلك خصائصها الحرارية ، ولا سيما التوصيل الحراري.

وفقًا لتجميع الأعمال ، يبدو أن معدل 10 ٪ من البيرلايت يحسن قوة ضغط الملاط في سن مبكرة جدًا (3 أيام) ، من ناحية أخرى ، تساهم معدلات 20 ٪ بشكل إيجابي على المدى القصير و الطويل (7 و 14 و 28 و 90 يومًا). الامتصاص الشعري هو الأدنى للملاط بنسبة 20٪ من البيرلايت مقارنة للملاط بنسبة 10٪ وللشاهد. أما بالنسبة للتوصيل الحراري فهي أقل بالنسبة لملاط البوزولان والبيرلايت مما يجعلها عوازل أفضل.

**الكلمات المفتاحية:** إضافة البوزولاني ، البيرلايت ، الإسمنت ، الملاط ، السلوك الميكانيكي ، السلوك الحراري.

## ABSTRAT

Cementitious additions are currently one of the most recent developments in cement production, since their uses bring an improvement in the mechanical properties of cementitious materials (mortar and concrete). On the other hand, their uses are intended to reduce the consumption of clinker, by contributing in a simple and economical manner to solving the problems linked to the environment.

This research study studies the advantages and the possibility of partial substitution of cement by natural pozzolanic additions such as perlite and their influence on the pozzolanic activity of mortars. The objective of this study was to prepare a cement with mineral addition by substituting by volume (0% and 20%) perlite from Maghnia and natural pozzolan from Béni-Saf for cement. With this cement, mortars had to be developed in order to study their mechanical behavior under compression, their capillary absorption as well as their thermal characteristics, more particularly thermal conductivity.

According to the synthesis of the work, it appears that the rate of 10% of perlite improves the compressive strength of mortars at a very young age (3 days), on the other hand the rates of 20% contributes positively to the young and in the long term (7, 14, 28 and 90 days). The capillary absorption is the lowest for the mortar based on 20% perlite by adding to the 10% mortar and to the control. As for the thermal conductivity, it is lower for pozzolan and perlite mortars which makes them better insulators.

**Keywords:** Pozzolanic addition, perlite, cement, mortar, mechanical behavior, capillary absorption, thermal behavior.

# *INTRODUCTION GENERALE*

## INTRODUCTION GENERALE

La performance de l'efficacité énergétique des bâtiments doit porter globalement à la fois sur le bâti (matériaux de constructions), mais également sur les équipements et les systèmes qui les composent. Pour que la démarche soit complète, elle devra aussi intégrer le recours aux énergies renouvelables.

La principale préoccupation des bâtisseurs concerne la pérennité de leurs constructions. Ce principe est justifié par l'emploi de matériaux performant du point de vue résistance mécanique et durabilité. Par contre, les aspects de confort thermique n'étaient traités qu'à posteriori. Cependant, ce concept séduit de moins en moins les bâtisseurs, car il devient couteux. Ce changement de point de vue explique le développement récent de quelques matériaux allégés de construction tel que les bétons légers, capables de jouer un rôle en tant qu'isolant, tout en conservant des niveaux de performances suffisants.

Une bonne partie de la déperdition de chaleur se faisant par les murs, les matériaux isolants ralentissent le transfert de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment. La qualité de l'isolation à prévoir dépend du climat, de l'exposition des murs et aussi des matériaux employés pour la construction. Le choix d'un matériau utilisé comme isolant dépend naturellement de sa disponibilité et de son coût.

De nos jours, les matériaux cimentaires sont devenus les matériaux les plus utilisés au monde, vu la grande diversité de leur usage. Cet avantage est obtenu grâce à la facilité de leur mise en œuvre et leurs qualités techniques car les constructions d'aujourd'hui sont devenues, de forme plus en plus compliquée, plus en plus solides et plus en plus durables. Une grande partie des caractéristiques mécaniques et de durabilité des matériaux à matrice cimentaire provient des performances du ciment hydraté. Le ciment forme une matrice cohésive qui enrobe le squelette granulaire, et l'amélioration de ses performances implique directement l'amélioration de celles des matériaux cimentaires tel que le béton.

En Algérie, comme substance d'origine volcanique, on trouve la pouzzolane naturelle de Beni-Saf, qui a fait l'objet de nombreuses études de recherche sur son utilisation comme ajout cimentaire. Maintenant, c'est reconnu et accepté que cette substance minérale est pouzzolanique et peut offrir beaucoup de propriétés avantageuses aux matériaux cimentaires telles que la réduction du coût, l'amélioration des résistances mécaniques à long terme ainsi que la durabilité. Pour ce qui est de la perlite, son emploi comme matériau de construction substituable en partie au ciment est en cours de recherche.

L'objectif de notre étude a été d'évaluer expérimentalement l'influence du taux d'ajout de pouzzolane et perlite (0%, 20%) sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des mortiers. **Malheureusement**, la pandémie du covid-19 que traverse le pays a obligé l'état à prendre des restrictions et préventions sanitaires ce qui a rendu le travail expérimental dans le laboratoire du département de génie civil et d'architecture impossible. C'est pour cette raison qu'il a été remplacé par une synthèse bibliographique à l'issue de laquelle un bilan a été établi sur les travaux effectués et un programme a été proposé pour une recherche future.

## INTRODUCTION GENERALE

---

### **Le mémoire est composé de quatre chapitres :**

Nous présentons dans le premier un ensemble de connaissances sur la fabrication du ciment Portland, sur les principales familles des ajouts minéraux et leurs utilisations ainsi que leurs effets bénéfiques sur l'amélioration des propriétés essentielles des mortiers.

Dans le deuxième chapitre, sont décrits les caractéristiques physico-chimiques les principaux ajouts de nature pouzzolaniques tels que la pouzzolane naturelle et la perlite.

Une synthèse des recherches sur les propriétés physiques (absorption capillaire) et mécaniques (résistances à la compression) des mortiers contenant la pouzzolane naturelle de Béni-Saf et la perlite de Maghnia.

Quant au dernier chapitre il résume l'étude thermique effectuée sur des mortiers à base de pouzzolane et perlite.

En fin, une conclusion générale est proposée dans laquelle un bilan est établie et des recommandations sur un travail expérimental futur sont proposées.

*CHAPITRE I :*

*CIMENTS ET AJOUTS*

## CHAPITRE I : CIMENTS ET AJOUTS

## I.1. INTRODUCTION

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

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

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

En Europe pendant plusieurs décennies, les normes nationales ont gouverné la production qualitative de ces liants en respectant, dans chaque pays producteur, la diversification. Les Normes Européennes EN ont rassemblé le savoir-faire des différents pays pour établir une Norme Unique Européenne. [1]



Figure I.1 : Fabrication du ciment. [1]

## I-2-CIMENT

### I-2-1-Historique

Les Romains furent probablement les premiers à fabriquer des liants hydrauliques. En effet, ils mélangeaient de la chaux et des cendres volcaniques de la région de Pozzuoli au pied du Vésuve donnant naissance au ciment « Pouzzolanique » ; matériau capable de fixer la chaux en présence d'eau. Cependant, ce n'est qu'au XVIII<sup>ème</sup> siècle que fut inventé le ciment artificiel.

En 1817, les travaux du Français Louis Vicat ont permis de déterminer les proportions de calcaire et de silice nécessaire pour constituer le mélange qui après cuisson à la température adéquate et broyage, donnera un véritable liant hydraulique fabriqué industriellement. Quelques années plus tard, en 1824, l'Écossais Aspdin dépose un brevet pour la fabrication d'une chaux hydraulique à prise rapide qu'il appelle commercialement le ciment « Portland » (car la couleur de son produit ressemble aux célèbres pierres de la péninsule de Portland située dans la Manche).

### I-2-2-Définition du ciment

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

Elle est défini selon la norme NFP15301, comme une fine mouture inorganique qui gâchée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit. Le ciment portland est constitué d'un mélange de clinker, de gypse [2] et d'ajouts minéraux, le ciment est majoritairement composé de quatre phases anhydres.

Oxydes	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
<b>composition</b>	50-70%	5-10%	15-30%	5-10%	0-5%	0-2%	0-5%
<b>Notation cimenterie</b>	C	A	S	F	CS	H	S

**Tableau I.1 :** Composition chimique en oxydes d'un ciment ordinaire et notation cimenterie. [3]

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau car cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium [4]. L'expression de « pâte de ciment durcissant » sera utilisée pour désigner la pâte de ciment dans la transformation d'un état plus ou moins fluide en un état solide. [5]

Le ciment ordinaire anhydre est constitué de clinker Portland, de gypse et éventuellement d'additions telles que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau, la fumée de silice, pouzzolanes naturelles..., etc. [6]

### I.2.3. Principales phases du ciment portland

Les principales phases du ciment portland sont comme suivant [9] :

Composé	Composition	Abréviation
Silicate tricalcique	$3CaO.SiO_2$	C3S
Silicate bicalcique	$2CaO.SiO_2$	C2S
Aluminate tricalcique	$3CaO.Al_2O_3$	C3A
Aluminoferrite tétracalcique	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C4AF

Tableau I.2 : Les principales phases du ciment Portland. [35]

**I.2.4. Les différentes méthodes de fabrication de ciment**

IL existe quatre méthodes de fabrication du ciment [4] :

- Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).
- Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide).
- Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée).
- Fabrication du ciment par
- voie semi-sèche (en partant de la voie sèche).

**Principe de fabrication du ciment Portland**

Le ciment est produit à partir des roches facilement accessibles : calcaire, marbre et argile. De façon générale, un mélange renferme environ 80% de calcaire et 20% d'argile.

Le mélange finement broyé est porté à 1450°C dans un four rotatif pour produire le clinker. Le ciment résulte d'un broyage très fin du clinker. Lors de la phase de broyage, du gypse (5% en poids) est ajouté pour mieux maîtriser le temps de prise. A ce niveau, éventuellement d'autres constituants minéraux associés, parmi ces substances figurent la pouzzolane naturelle, les cendres volantes, les laitiers de hauts fourneaux, le calcaire etc.

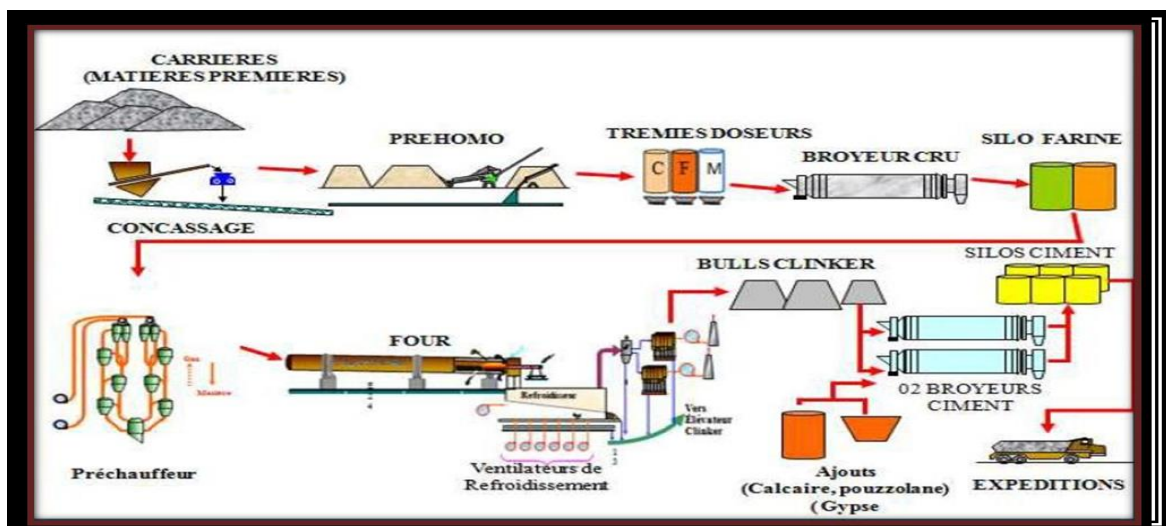


Figure I.2 : Le processus de fabrication du ciment Portland. [35]

Le composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO<sub>2</sub>), l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), et l'oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier l'oxyde ferrique Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

## I.2.5. Les Constituants principaux de ciment

### 1.2.5.1. Le clinker

Le clinker Portland est obtenu par cuisson, au moins jusqu'à fusion partielle, d'un mélange fixé avec précision de matières premières (farine crue, pâte ou suspension) contenant du CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, et des petites quantités d'autres matières. La farine crue, la pâte ou la suspension doivent être finement divisées, intimement mélangées et être homogènes.

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker

- Le silicate tricalcique 3CaO.SiO<sub>2</sub> (C3S) (50-70% du clinker).
- Le silicate bicalcique 2CaO.SiO<sub>2</sub> (C2S) (10-30% du clinker).
- L'aluminate tricalcique 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C3A) (2-15% du clinker).
- L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tétracalcique) 4CaOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C4AF) (5-15% du clinker) [28].

Elément	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
Fourchette(%)	62 à 68	18 à 24	4 à 8	2 à 5	0 à 5	0 à 5	0 à 2	0 à 2	0 à 2
Moyenne (%)	66,6	21,9	6,3	2,5	1	0,8	0,2	0,2	0,2

**Tableau I.3 :** Composition chimique du clinker. [35]

Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O), de la magnésie (MgO), et diverses traces de métaux. La teneur en alcalis et magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement la stabilité à l'illite du ciment durci.

### 1.2.5.2. Les différents types d'ajouts

Les ciments avec ajouts (ciments composés) sont obtenus par l'addition, lors de broyage du clinker, du gypse et d'éléments minéraux comme les laitiers de hauts fourneaux, les cendres de centrales thermiques, les fillers calcaires, les pouzzolanes naturelles ou artificielles. Ainsi sont obtenues les différentes catégories de ciments qui permettront la réalisation d'ouvrages allant du plus courant au plus exigeant [10].

- **Le gypse ( $\text{CaSO}_4$ )**

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

Il s'ensuit que pour ralentir la prise du ciment, il faut lier les hydroaluminates de calcium en d'autres composés. Ce rôle peut bien être joué par le gypse qui réagit énergiquement avec l'hydroaluminat tricalcique et produit un sel insoluble l'hydrosulfoaluminat de calcium ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ). La quantité à introduire doit correspondre à la teneur en C3A dans le liant. Lorsque cette teneur en gypse est respectée, l'action des hydroaluminates de calcium se trouve paralysée au moment initial.

- **Ajout minéral actif**

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

Le rapport entre le clinker et l'adjuvant hydraulique (ajout minéral) est établi en fonction de l'activité de l'adjuvant et de la composition minéralogique du clinker. Plus l'adjuvant est actif, plus il peut fixer l'oxyde de calcium hydraté et moins il faudra de ciment pouzzolanique [18].

Parmi les ajouts les plus utilisés, on mentionne :

- **Les laitiers de haut-fourneau**

On obtient du laitier granulé de haut fourneau par refroidissement rapide de la scorie fondue, c'est-à-dire des résidus provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Il est constitué, en masse, d'au moins deux tiers de  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  et  $\text{SiO}_2$ , le reste contenant  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et de faibles quantités d'autres oxydes.

Les laitiers existent sous forme de poudre fine, sèche. Ils sont considérés comme un matériau hydraulique latent, qui présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable, en effet, l'ajout d'eau à un échantillon de laitier vitrifié n'entraîne aucun durcissement du mélange.

L'hydratation des laitiers engendre la formation de CSH (silicate de calcium hydraté), d'aluminates ( $\text{AC}_2\text{H}_7$ ) et de silicoaluminates (dérivés de l'ettringite) [6].

- **Les cendres volantes :**

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

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

Les cendres volantes sont obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes provenant du courant de gaz des chaudières, alimentées au charbon pulvérisé.

Les cendres obtenues par d'autres méthodes ne doivent pas être utilisées dans les ciments conformes à la norme Algérienne [19].

- **Les fumées de silice**

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

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

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

- **Les Pouzzolanes**

Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement des substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires ayant une composition chimique et minéralogique appropriées. Elles sont essentiellement composées de silice, d'alumine et de fer, et développent naturellement des propriétés pouzzolanique. Les pouzzolanes artificielles correspondent à des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxydes de fer qui, activés thermiquement, développent des propriétés pouzzolanique (argiles ou schistes par exemple) [29].

Les pouzzolanes ne durcissent pas elles-mêmes en présence d'eau, mais elles réagissent à température ambiante en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca(OH)}_2$  libéré au cours de l'hydratation du clinker, pour former des CSH et des aluminates de calcium hydratés [6].

- **La perlite**

La perlite est une roche volcanique acide, vitreuse et hydratée, de couleur gris clair, verdâtre ou noirâtre, appartenant à la famille des rhyolites. Fréquemment, la roche présente un aspect lustré, avec un débit caractéristique en perles à structure concentrique en pelures d'ognon, mais elle peut également se présenter sous d'autres. Elle se distingue des autres verres naturels par une teneur en eau chimique de constitution de 2 à 6% dans la structure vitreuse [6].

### **I.2.6.. Les principales catégories de ciment**

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale

#### ***1.2.6.1. Classification des ciments en fonction de leur composition***

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) [3]:

- ✚ CEM I: Ciment portland (CPA - dans la notation française).
- ✚ CEM II: Ciment portland composé (CPJ).
- ✚ CEM III: Ciment de haut fourneau (CHF).
- ✚ CEM IV: Ciment pouzzolanique (CPZ).
- ✚ CEM V: Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

• La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le (Tableau.I.4) Les constituants marqués d’une étoile (\*) sont considérés comme constituants secondaires pour le type de ciment concerné; leur total ne doit pas dépasser 5%. (Les fillers sont considérés comme des constituants secondaires).

	Cim. Portland	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pozzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC-CEM V/A	CLC-CEM V/B
<b>Clinker (K)</b>	/95%	/80% ≤94%	/65% ≤79%	/35% ≤64%	/20% ≤34%	/5% ≤19%	/65% ≤90%	/45% ≤64%	/40% ≤64%	/20% ≤39%
<b>Laitier (S)</b>	*	6%≤	21%≤	/36% ≤65%	/66% ≤80%	/81% ≤95%	*	*	/18% ≤30%	/31% ≤50%
<b>Pouzzolanes (Z)</b>	*	total	total	*	*	*	10% ≤ total	36% ≤ total	18% ≤ total	31% ≤ total
<b>Cendres siliceuses (V)</b>	*	≤20%	≤35%	*	*	*	≤35% (fumée ≤10%)	≤55% (fumée ≤10%)	≤30%	≤50%
<b>Fumée de silice (D)</b>	*	(fumée	(fumée	*	*	*			*	*
<b>Cendres calciques (W)</b>	*	de	de	*	*	*	*	*	*	*
<b>Schistes (T)</b>	*	silice	silice	*	*	*	*	*	*	*
<b>Calcaires (L)</b>	*	≤10%)	≤10%)	*	*	*	*	*	*	*
<b>Fillers (F)</b>	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tableau I.4 : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition. [35]

1.2.6.2. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous classes “R” sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32.5, classe 42.5, classe 52.5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du Tableau I.5. Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs garanties lorsqu’elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées.

Classe	Résistance à la compression (MPa) EN 196-1				Retrait à 28 jours	Début de prise	Stabilité
	au jeune âge		à 28 jours				
	2 jours	7 jours	mini.	maxi.	P 15-433 (µm/m)	EN 196-3 (min)	EN 196-3 (min)
<b>32,5</b>		(17,5)	/32,5 (30)	≤52,5	≤800	/90	≤10
<b>32,5 R</b>	/13,5 (12)	/	/32,5 (30)	≤52,5	≤1 000	/90	≤10
<b>42,5</b>	/12,5 (10)		/42,5 (40)	≤62,5	≤1 000	/60	≤10
<b>42,5 R</b>	/20 (18)		/42,5 (40)	≤62,5	≤1 000	/60	≤10
<b>52,5</b>	/20 (18)		/52,5 (50)			/60	≤10
<b>52,5 R</b>	/30 (28)		/52,5 (50)			/60	≤10

Tableau I.5 : Les classes de ciment selon la résistance à la compression. [23]

## I.2.7. Les caractéristiques du ciment portland

### I.2.7.1. La prise (NA230 NF EN 196-3) :

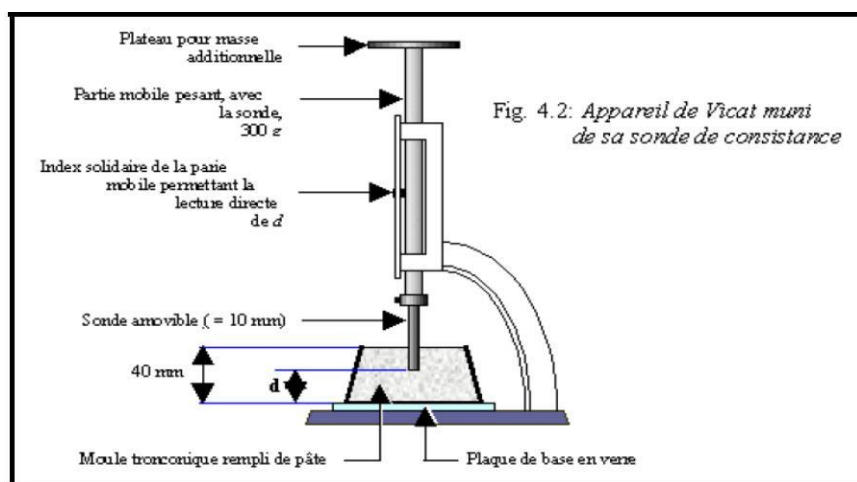
Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée. Mais au bout d'un certain temps, les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange a changé de viscosité et se raidit, on dit qu'il se fait priser.



**Figure I.3 :** Détermination du temps de début de prise.  
[33]

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil de Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance ( $d = 6 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$ ) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pâte pure de ciment (voir figure I.4).

De même, la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau.



**Figure 1.4 :** Détermination du temps de fin de prise. [33]

### 1.2.7.2. Le durcissement :

C'est la période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment, Sa durée se prolonge pendant des mois au cours desquels les résistances mécaniques continuent à augmenter.

Comme le phénomène de prise, le durcissement est sensible à la température, ce qui conduit notamment en préfabrication, à chauffer les pièces pour lesquelles on désire avoir des résistances élevées au bout de quelques heures.

### 1.2.7.3. La Finesse de Mouture (finesse de Blaine - NA231 EN196-6):

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm<sup>2</sup>/g).

Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm<sup>2</sup>/g.

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes (voir figure 1.5 : Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression), par contre plus le ciment est sensible à l'éventuellement et plus le retrait est important. En outre, la finesse de mouture influence la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais, ainsi que son pouvoir de rétention d'eau et la ressuée [21].

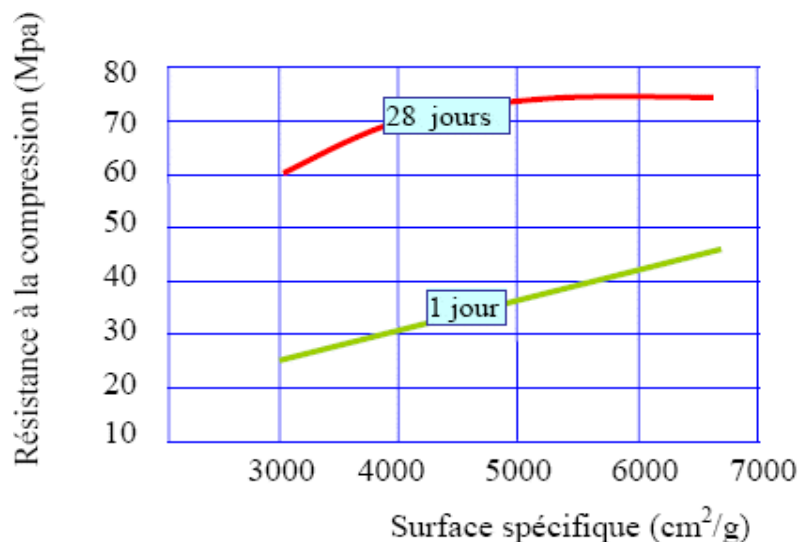


Figure 1.5 : Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression. [37]

### 1.2.7.4. Résistance à la compression (NA 234 EN 196-1) :

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit "normal", à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes (4 x 4 x 16) cm<sup>3</sup>. La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment.

Elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en MPa (voir Figure 1.6 : Résistance du mortier normal.). Le mortier utilisé est réalisé conformément à la Norme EN 196-1. Le sable utilisé est un sable appelé "sable normaliser CEN EN 196-1".

Pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales.

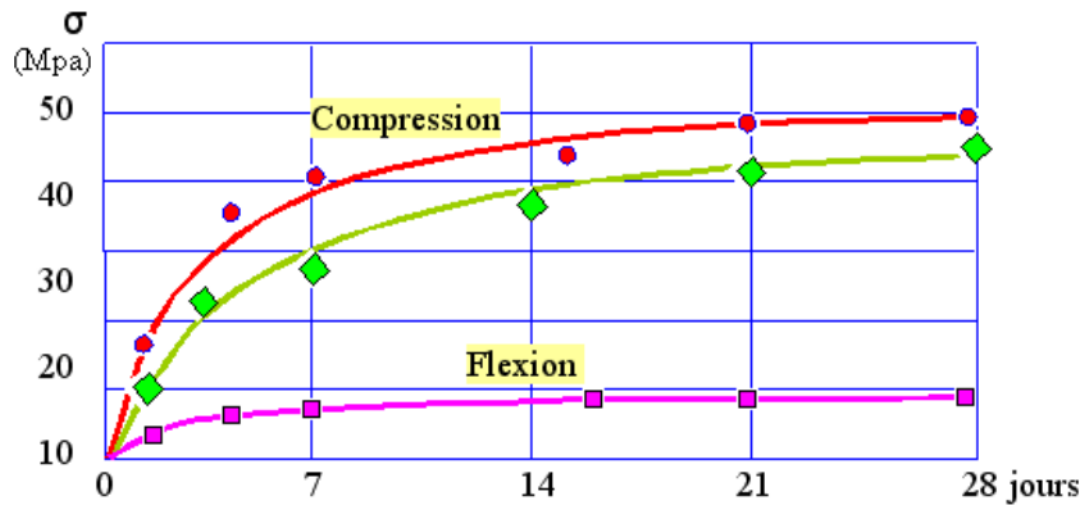


Figure 1.6 : Résistance du mortier normal. [33]

## **CONCLUSION**

Les recherches qui sont présentées lors de cette étude bibliographique, notamment sur le plan expérimental, nous montrent que le procédé de fabrication du ciment portland nécessite une énergie importante et dégagent du CO<sub>2</sub> et de la poussière causant la pollution de l'environnement, d'où le recours à l'utilisation des ajouts cimentaires comme remède à ces problèmes ce qui permet de :

- diminuer la quantité de clinker utilisé d'où un gain d'énergie.
- préserver l'environnement.
- améliorer les propriétés du ciment.

*CHAPITRE II:*

*LES AJOUTS POUZZOLANIQUES*

## CHAPITRE II : LES AJOUTS POUZZOLANIQUES

### II.1. INTRODUCTION

Les matériaux pouzzolaniques sont employés d'une manière globale comme additifs (les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, la fumée de silice, le calcaire, perlite et les pouzzolanes naturelles) avec les liants aériens et hydrauliques dans le but d'améliorer certaines caractéristiques des mortiers et des bétons. Seul des ajouts bien définis permettent d'exploiter au mieux leurs propriétés et avantages.

### II.2. TYPES DE POUZZOLANE

#### II.2.1. Pouzzolane naturelle

La Pouzzolane naturelle est un produit d'origine volcanique (verre volcanique, pierre ponce, zéolite...) ou sédimentaire (terre à diatomées, trass.....), composé essentiellement de silice alumine et fer.

Elle est formée d'une phase mal cristallisée, amorphe et de grande surface spécifique, qui réagit rapidement avec la chaux libérée pendant l'hydratation du ciment pour former de nouveaux cristaux de silices et d'aluminate de calcium hydraté qui participent au développement des résistances mécaniques et chimiques. Selon la norme DE L'ASTMC 18, la pouzzolane se définit comme étant un matériau siliceux et alumineux qui ne possède en lui-même aucune ou à peu près aucune valeur liante mais qui sous forme de poudre très fine et en présence d'humidité réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  à des températures ordinaires pour former des composés possédant des propriétés liantes [29].

La norme [NF P18-308 ,1965] décrit la pouzzolane comme une roche naturelle, constituée par des scories volcaniques, essentiellement composée de silice ( $\text{SiO}_2$ ), d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et d'oxyde ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

La norme [ASTM C 618-3, 2003] la décrit comme étant un matériau siliceux et alumineux qui ne possède par lui-même aucune valeur liante mais qui sous forme de poudre très fine et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à des températures ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes.

#### II.2.2. Pouzzolane artificielle

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolanique. Elles sont des déchets des efférentes industries. On distingue. Soit des résidus de fabrication industrielle tel que. le mach fers , cendre de bois ou d'houille , soit des débris de brique et de tuile fabriquées avec des argile pures des températures modérées . On distingue aussi le schiste cuite, et les déchets de l'industrie à base de méta kaolinite [26].

**II.3. HISTORIQUE DES POUZZOLANES NATURELLES**

Dès la fin de l'époque tertiaire, la côte oranaise fut le siège d'une activité volcanique intense. D'est en Ouest, ce volcanisme passe de nature acide à un volcanisme basique où les formations basaltiques prédominent.

L'activité volcanique du tell Oranais s'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 néphilinite à mélilite dans l'Île de Rachgoun qui a également été décrite par LACROIX (1893).

GENTIL (1903) présente une étude sommaire de quelques laves et rattache celles du plateau de Tadmaya à un basalte à olivine. D'autre part, il indique la présence au Cap d'Acra et décrit des Labradorites sans signaler leurs lieux.

SADRAN (1958) donne une chronologie relative du volcanisme et précise la nature pétrographique des différentes coulées. L'auteur montre que le substratum gréseux des coulées de la Basse-Tafna est constitué de sable à hélix d'âge miocène supérieur, probablement "le Messinien". Enfin, il publie des résultats d'analyses chimiques et relie la tectonique avec le volcanisme.

GUARDIA (1975), présente une étude géologique de toute la région. Il montre que le volcanisme de la Basse-Tafna est totalement indépendant vis-à-vis de la tectogénèse antérieure mais plutôt à une néotectonique profonde.

BELLON et GUARDIA (1980), publient les résultats de l'étude paléomagnétique des roches éruptives de Béni-Saf. D'autre part, ces derniers précisent l'âge de la formation gréseuse qui constitue le substratum.

MEGARTSI (1985) apporte des compléments à l'étude des laves de la Basse-Tafna en les étudiant du point de vue pétrographique et chimique. [30]

**II.4. LOCALISATION DU GISEMENT DE BENI-SAF**

Cette ressource naturelle siliceuse variant du rouge au noir se trouve en abondance dans la région de Béni-Saf ouest de l'Algérie et de Basse-Tafna correspond à un ensemble important de déjections basaltiques qui couvre une superficie d'environ 200 km<sup>2</sup>. Il s'étend sur 30km de cote entre Cap de Sidi Mohamed Bel Ourdini au sud –ouest [figure1].entre Béni-Saf et le Cap Oulassa il se réduit à quelques pointeuses isolées dans les formations sédimentaires, mais à hauteur de la Tafna, il s'étend sur 15km entre l'îleRachgoun et le plateau de Tadmaya. Les matériaux d'origine volcanique du massif de Béni-Saf et de la Basse-Tafna peuvent se subdiviser d'après leur mode de gisement en coulées basaltiques et formations pyroclastiques. Après concassage, broyage, étuvage et tamisage de ce produit (<80um), la poudre résultante est récupérée.



**Figure II.7 :** Localisation du gisement de Bouhamidi (Béni-Saf). [31]

## II.5. NATURE DU MATERIAU POUZZOLANIQUE DE BENI-SAF

Parmi les massifs volcaniques déjà cités, celui de Béni-Saf et de la Basse-Tafna donne lieu à un certain nombre d'épandements remarquables dans lequel on reconnaît les vestiges des principaux cratères. En raison de la grande homogénéité de ce massif, les gisements qu'il contient ne doivent pas se différencier. [30]

### II.5.1. La couleur des pouzzolanes

Les oxydes de fer peuvent être retenus comme "indicateur coloré" des pouzzolanes puis qu'ils sont susceptibles de donner d'utiles renseignements sur les degrés d'oxydation atteints dans les pouzzolanes rencontrées.

Les analyses chimiques réalisées sur les pouzzolanes de provenances très différentes (France, Italie, Madagascar, Réunion, Martinique, Guadeloupe, Zaïre et Ruanda) tendent bien à montrer que la couleur dominante de celles-ci reste étroitement liée au rapport des pourcentages pondéraux des oxydes ferreux et ferriques [29].  $32\text{OFeOFe}$

La coloration des matériaux ne révélait que des variations du degré d'oxydation du fer présent et ne pouvait donc pas affecter la partie silicatée. De ce fait, le préjugé selon lequel les pouzzolanes noires présenteraient une qualité plus médiocre que celles des pouzzolanes rouges est actuellement dénué de tout fondement. [30]

### II.5.2. Qualités des roches utiles du gisement Bou-Hamidi

L'étude géologique faite en 1985 par l'UREG Boumerdes sur la qualité et l'activité pouzzolanique des roches utiles emploi tableau les du gisement Bouhamidi à donner les résultats suivants:

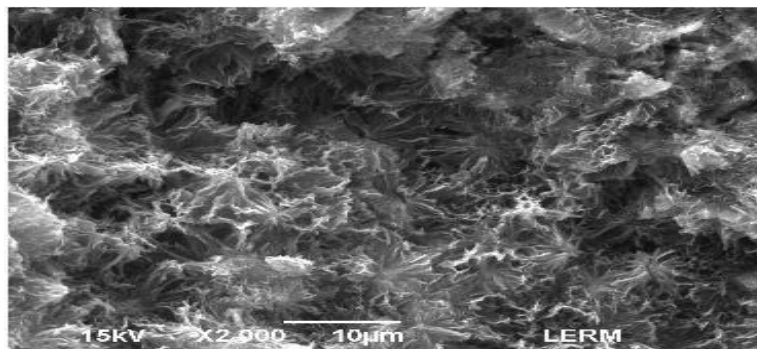
N°	Variétés lithologiques	Activité (mg/g)
01	Pierre ponce	70
02	Tuf calcaire finement poreux	82
03	Pierre ponce grise et brunâtre Tuf	77
04	basaltique finement poreux Tuf	95
05	compact	94
06	Basalte gris clair poreux	85
07	Basalte marron	84
08	Brèche tufeuse cimentée	100
09	Pierre ponce en matériau carbonaté	84
10	Pierre ponce agglutinante brune	100
11	Pierre ponce en matériau carbonaté marans claire	67
12	Tuf basaltique finement poreux, brunâtre et cimenté	71
13	Agglutiné imprégné de masse vitreuse	81
14	Tuf compact	80

**Tableau II.6 :** Qualité et activité de la roche du gisement Bouhamidi. [31]

### II.5.3. Réaction pouzzolanique

La réaction pouzzolanique signifie formation dans la réaction de liaison. Les propriétés de la pâte qui contient les produits de réaction sont indépendantes de la réactivité pouzzolanique.

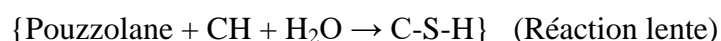
L'action pouzzolanique se caractérise donc par deux aspects distincts qui sont la quantité totale de chaux (la chaux utilisée est une chaux éteinte ayant pour formule chimique  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Portlandite ou hydroxyde de calcium) qu'une pouzzolane est capable de fixer ; et la rapidité de fixation de la chaux par la pouzzolane (la réactivité de la pouzzolane), cette réaction est lente c'est-à-dire se manifeste après 28 jours.

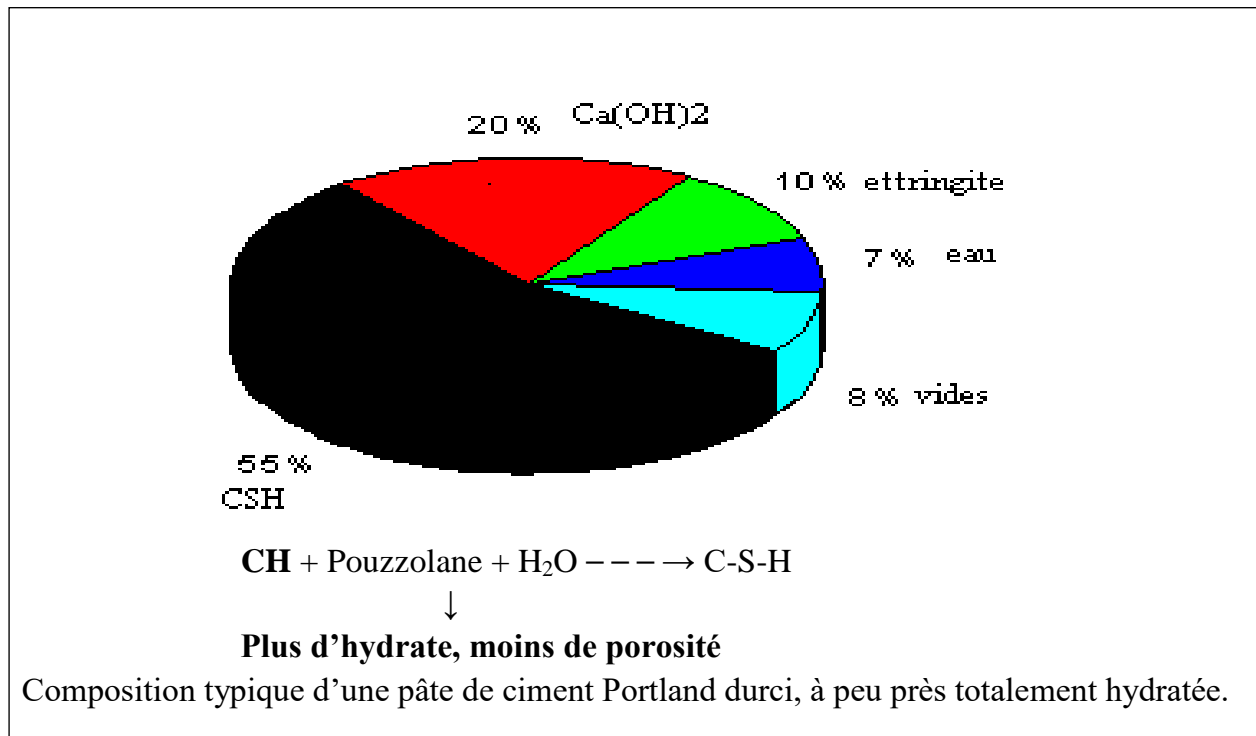


**Figure II.8 :** Gel de C-S-H. [31]

Les pouzzolanes naturelles contiennent de 60 à 85% de silice ( $\text{SiO}_2$ ) et d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). En présence d'eau et de chaux, à des températures ordinaires, comme dit la norme, elles vont former des silicates de calcium hydratés, semblables à ceux produits par l'hydratation du silicate tricalcique (C3S) (C3A.  $\text{SiO}_2$ ), composé principal du ciment Portland.

Les réactions pouzzolanique et hydraulique peuvent s'écrire globalement comme suit : [24] [25]





**Figure II.9 :** Les réactions d'hydratation ciment et de la pouzzolane. [32]

Le comportement du ciment avec ajout minéral est déterminé par trois caractéristiques de la réaction pouzzolanique de l'ajout :

- La réaction est lente, le dégagement de chaleur et le développement des résistances seront également lents.
- Au lieu de fournir de la chaux, comme dans le cas du ciment Portland, la réaction pouzzolanique en consomme et améliore la résistance du béton en milieu acide.
- Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons par affinage de ces pores capillaires et par transformation des gros cristaux de CH en un produit d'hydratation faiblement cristallisé (affinage des grains). [32]

## II.6. EFFET DE LA POUZZOLANE

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes :

### II.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.

**II.6.2. 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. [26]

**II.7. PROPRIETES DE LA POUZZOLANE NATURELLE**

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux.

**II.7.1. Propriétés hydrauliques**

La pouzzolane est capable de réagir en présence d'eau avec de l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stable, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes. [27]

**II.7.2. Propriétés physiques de remplissage**

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

**II.7.3. L'utilisation de la pouzzolane**

La pouzzolane est utilisée essentiellement.

- L'hiver, elle sert pour le sablage des routes verglacées.
- Dans les travaux publics elle est utilisée comme matériau de remblai léger, pour la réalisation de terrains de sport : piste d'athlétisme, amendement terrains gazonnée, carrière à chevaux.
- Dans l'industrie ajoutée au ciment elle permet la confection de matériaux réfractaires comme les boisseaux de cheminées de parpaing de béton léger très utile pour la construction de bâtiment ; elle entre dans la fabrication d'argiles à tuiles.
- Elle possède des propriétés intéressantes pour l'isolation thermique et phonique [28].

## II.8. LA PERLITE

### II.8.1. Définition et genèse

La perlite est une roche volcanique acide, vitreuse et hydratée, de couleur gris clair, verdâtre ou noirâtre, appartenant à la famille des rhyolites. Fréquemment, la roche présente un aspect lustré, avec un débit caractéristique en perles à structure concentrique en pelures d'ognon, mais elle peut également se présenter sous d'autres textures. Elle se distingue des autres verres naturels par une teneur en eau chimique de constitution de 2 à 6% dans la structure vitreuse.

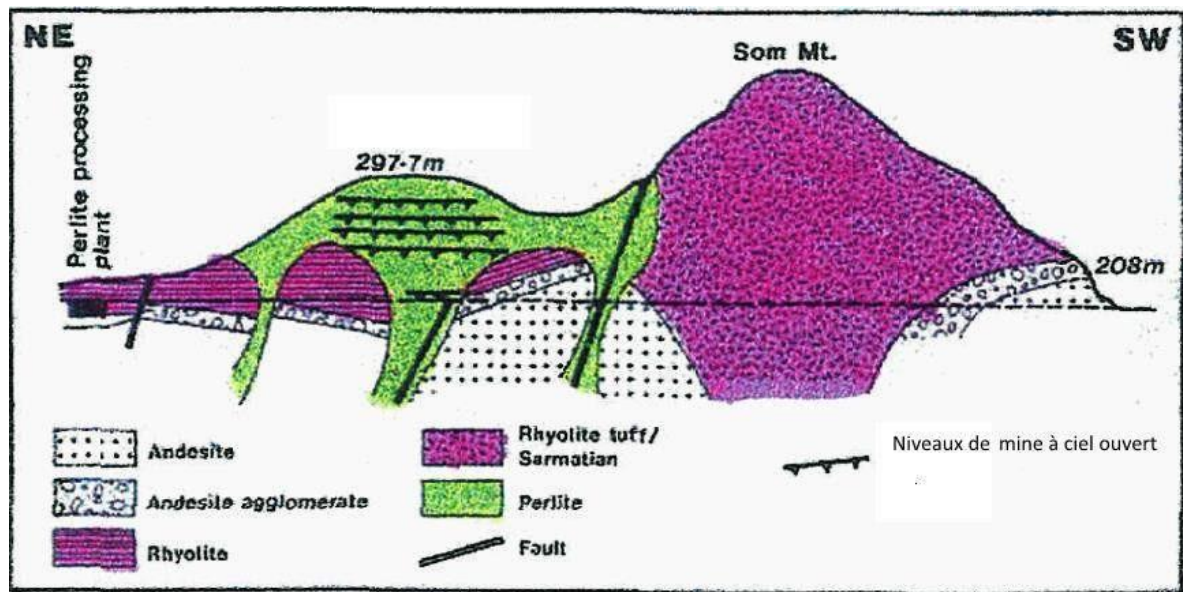


**Figure II.10 :** Exemple typique d'une roche de perlite. [36]

Les poches de refroidissement lent de magma acide qui ont été piégés sous la surface de la terre formeront le granit. L'éruption et congélation au-dessus de la surface de la terre du magma acide fondu qui n'a pas ou peu de quantité de gaz, formera la rhyolite. L'éruption peut également former une mousse créant la pierre ponce qui a de grands pores dans sa structure provoquée par le mouvement des bulles de gaz. La pierre ponce n'a pas d'eau dans sa structure en raison de sa nature très poreuse. La présence d'eau et de quantité modérée de gaz dans la masse fondue modifie le scénario. La fonte qui s'écoule à travers un environnement qui a des eaux actives venant des lacs, des marécages, des cours d'eau ou des pluies continues, s'éteindra rapidement en formant du verre d'obsidienne naturelle. A ce stade, une certaine quantité d'eau absorbée peut être maintenue dans le verre.

Dans les années subséquentes, l'obsidienne se transformera en une roche grise vitreuse par l'hydratation causée par l'absorption de l'eau pendant et après le refroidissement à des débits variables, dépendant de l'environnement, de la chimie du verre et de la température. L'absorption d'eau commence le long des fractures de refroidissement dans l'obsidienne et se déroule en tant que cercles concentriques s'éloignant des fractures vers les noyaux solides de roche non fractionnée résultant en l'érosion et la rupture des liaisons de la structure de verre. La quantité d'eau dans l'obsidienne hydratée peut varier, mais elle est généralement inférieure à 4%. Cette roche nouvellement formée est connue sous le nom de «perlite».

La figure II.11 montre un exemple de gisement de perlite à Pálháza (Hongrie) [Molnar 1989].



**Figure II.11** : Coupe géologique schématique du gisement de perlite de Pálháza, Mont Tokaj, Hongrie. [36]

L'eau à l'intérieur de la perlite brute, se présente sous deux formes principales. 94 à 98% de cette eau a été insérée dans les fins capillaires de la perlite par des moyens physiques, dont cette partie d'eau représente simplement l'humidité de la roche (eau libre). Le reste d'eau, 2 à 6%, rentre dans la composition chimique du verre volcanique comme molécules, et par conséquent uni avec le verre volcanique ('eau combinée'). Le verre ne peut pas être cristallisé en raison de la présence d'eau active dans sa structure.

### II.8.2. Caractéristiques physique, chimique et minéralogique de la perlite

Les différentes variétés de perlites se sont formées d'un même magma acide, fortement différencié, de nature essentiellement rhyolitique, plus rarement rhyodacitique. En ce qui concerne la texture des perlites, on admet qu'elle correspond au stade final du processus de formation, au moment où le magma s'est solidifié en roche. La composition chimique des différentes variétés de perlites est déterminée par les processus de différenciation ayant eu lieu dans le magma au cours de son ascension, tandis que leur composition minéralogique est conditionnée par la vitesse ascensionnelle du magma, les paramètres thermiques et les conditions de solidification de la roche.

La perlite moins hydratée ou moins perlitisée a une couleur noire et la perlite plus hydratée ou perlitisée prend la couleur grise avec la présence des perles en verre (Figure II.12 Différents degrés de perlitisation).

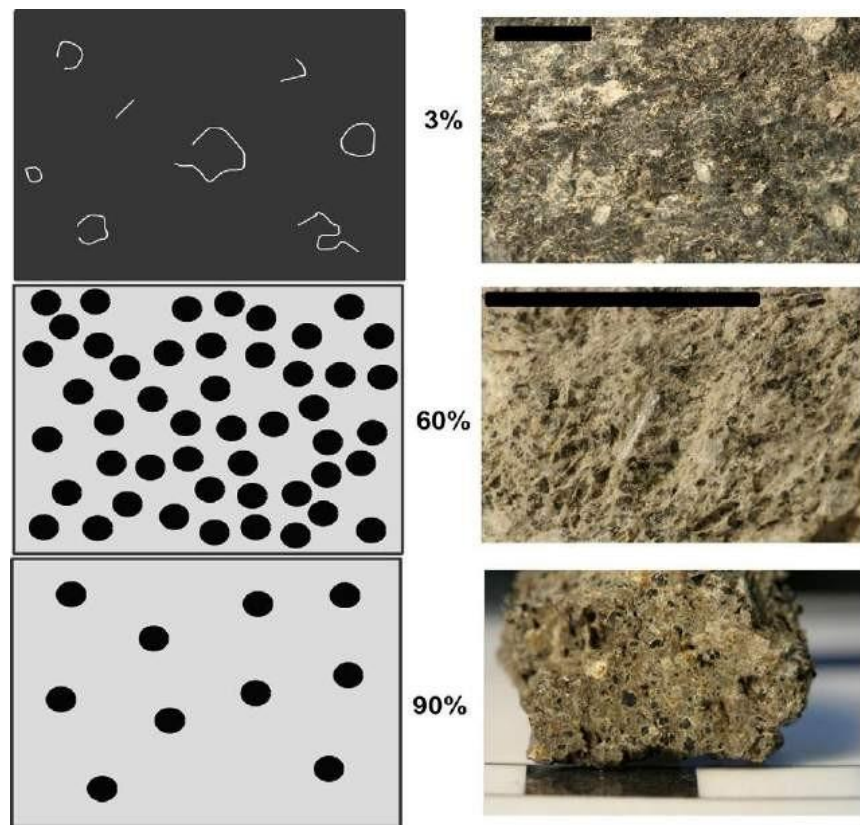


Figure II.12 : Différents degrés de perlitisation. [33]

Les plus importantes propriétés physiques de la perlite sont énumérées dans le tableau II-7. (Propriétés physiques de la perlite brute)

Désignation	Propriété
Couleur	Grise, brune, noire, verte
Masse volumique absolue	2,3 à 2,8 g/cm <sup>3</sup>
Masse volumique apparente	1,2 à 2,35 g/cm <sup>3</sup>
Dureté	5,5 à 7 (échelle de Mohs)
Point de fusion	760 à 1320 °C
Température d'expansion	600 à 1100 °C
Rapport d'expansion	10 à 20 (volume)

Tableau II.7 : Propriétés physiques de la perlite brute. [33]

Une série d'analyses chimiques de minerais de perlite prélevée dans plusieurs endroits du monde est donnée dans le tableau II-8 (Analyses chimiques (% en masse) de perlite brute de divers pays.

Origin	US	Greece	Turkey	Hungary	Yemen	Korea	Bulgaria	Slovakia
SiO <sub>2</sub>	65-77.5	71-75	71-75	68-75	65-75	68-69	70-80	68-73
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11-18	12-16	12.5-18	10-15	9.4-12.8	11.95-15.8	10-15	7.5-15
Na <sub>2</sub> O	2.4-4.6	3.0-4.0	2.9-4.0	2.8-4.5	3.37-4.25	3.2-4.4	<10	2.5-5.0
K <sub>2</sub> O	1.4-5.7	4.0-5.0	4.0-5.0	3.2-4.5	3.6-4.1	2-3.94	<10	2-5.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5-2.2	0.5-2.0	0.1-1.5	1.0-2.5	2.68-3.66	0.7-1.63	<1.5	1.0-2.0
MgO	0.1-0.7	0.2-0.7	0.03-0.5	0.2-1.5	0.5-0.93	0.35-0.48	<1.0	<1.0
CaO	0.5-3.6	0.5-1.5	0.5-2.0	1.5-2.0	0.87-1.84	1.57-1.89	<1.5	0.5-2.0
Loss on ignition	2-5	2-5	4.1	2.0-5.0	0.35-3.94	NR	<5	3.0-4.1

**Tableau II.8 :** Analyses chimiques (% en masse) de perlite brute de divers pays. [33]

### II.8.3. La perlite en Algérie

La perlite existe dans les roches volcaniques et sédimentaires au Nord-Ouest algérien, exactement dans la localité de Hammam Boughrara, près de Maghnia. La localisation de son gisement est montrée en annexe B sur la carte des potentialités minières, établie par l'Office National de Recherche Géologique et Minière.

Les perlites de Maghnia sont des roches intrusives, légères, massives, dures, formées dans les zones de fin de contact des massifs intrusifs acides de Rhyolite (Liparite) suite au refroidissement rapide et la cristallisation en subsurface. Deux sites situés au Nord-Est de Maghnia sont reconnus comme gisement de la perlite (voir tableau I-9. Les principaux gisements de la perlite de Maghnia). Ils forment des petits corps lenticulaires d'épaisseur 6 à 29 m et une longueur de 150 à 300 m (N° 93 et 94).

N° de gisement	Réserves ou paramètres estimatifs en tonnes	Conditions techniques et minières	Composition chimique (%) ou propriétés physico-mécaniques
93	Secteur principal: 142 500 Secteur Bab: 196 000 Secteur Roussel: 15 000	Favorables (Inexistence de roches de recouvrement)	SiO <sub>2</sub> = 71,68    Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 12,69 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 1,34    CaO = 1,08 MgO = 0,55    K <sub>2</sub> O = 3,91 Na <sub>2</sub> O = 3,62    FeO = 0,49 SO <sub>3</sub> = 0,08    P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> = 0,05 PF = 3,53 (Perte aux feux %)
94	considérables	Favorables	SiO <sub>2</sub> = 71,38    Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 14,25 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 2,19    CaO = 0,7 MgO = 0,35    K <sub>2</sub> O = 3,30 Na <sub>2</sub> O = 4,00    FeO = 1,15

**Tableau II.9 :** Les principaux gisements de la perlite de Maghnia. [33]

*II.8.3.1. Les étapes préparation de la perlite*

**Figure II.13 :** Séchage : L'échantillon est d'abord séché par passage à l'étuve (105 oc) afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage ainsi que son tamisage.



**Figure II.14 :** Concassage et broyage

## **CONCLUSION**

Au terme de ce chapitre, nous pouvons retenir que les ajouts cimentaires pouzzolaniques sont caractérisés par une teneur élevée en dioxyde de silicium seul ou, en dioxyde de silicium et en oxyde d'aluminium combiné. Ils peuvent réagir avec la chaux hydratée (portlandite), libérée lors de l'hydratation du ciment Portland pour former des composés ayant des propriétés liantes. Ces hydrates, se nomment en tant que produits de la réaction pouzzolanique et sont très semblables aux produits issus de l'hydratation du ciment Portland.

La synthèse bibliographique relative aux ajouts minéraux pouzzolaniques nous a permis de recenser les réactions chimiques en jeu et l'interaction chimique qui existe en l'occurrence entre l'activité pouzzolanique des additions et l'hydratation du clinker. Les effets des ajouts concernent aussi bien l'état frais que l'état durci des matériaux cimentaires.

*CHAPITRE III :*

*SYNTHESE DES  
ETUDES SUR  
LES PROPRIETES  
PHYSICO-MECANIQUES  
DES MORTIERS A BASE  
DE POUZZOLANE ET DE PERLITE*

**CHAPITRE III : SYNTHÈSE DES ÉTUDES SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUES DES MORTIERS À BASE DE POUZZOLANE ET DE PERLITE**

**III.1.INTRODUCTION**

Ce chapitre consiste en une synthèse de recherche sur les travaux effectués sur les mortiers à basse d'ajouts pouzzolanique tels que la perlite et la pouzzolane. Les résultats présentés dans ce chapitre concernent le comportement mécanique et l'absorption capillaire des mortiers à base de différents pourcentages de perlite naturelle ou de pouzzolane de Béni-Saf.

**III.2.ABSORPTION CAPILLAIRE**

Des essais d'absorption capillaire ont été menés [32] sur des éprouvettes de mortiers témoin et contenant 10% et 20% de perlite naturelle. Ils ont été réalisés conformément à la norme NF EN 480-5 Janvier 2006 [39].

Les résultats obtenus à chaque échéance sur trois éprouvettes (4x4x16 cm<sup>3</sup>) de chaque mortier sont exprimés sous forme de moyenne des trois valeurs mesurées. Le tableau III.10 et la figure III.15 représentent les résultats obtenus de l'essai d'absorption capillaire après 1 jour et 7 jours de contact avec l'eau.

La formule pour calculer l'absorption capillaire C selon [32] :

$$C = \frac{M_j - M_0}{16}$$

Avec :

La moyenne de 3 pesées des échantillons,  $M_0 = 563.4g$

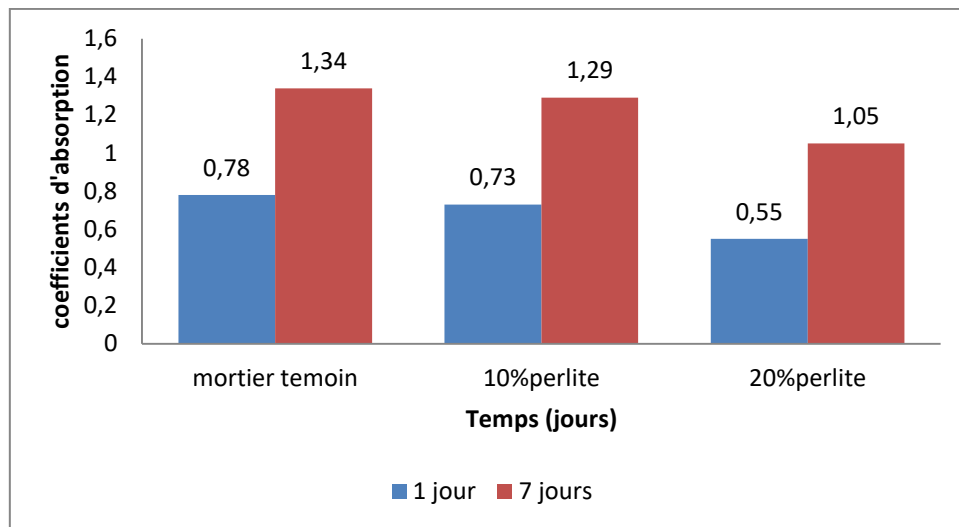
Après 7 jours, la moyenne des 3 échantillons  $M_7 = 584.8g$

Donc :

$$C = \frac{584.8 - 563.4}{16} = 1.34 \text{ g/cm}^2$$

Les différents mortiers	Absorption capillaire (g/cm <sup>2</sup> )	
	1 jour	7 jours
Mortier témoin	0.78	1.34
10 % la perlite	0.73	1.29
20 % la perlite	0.55	1.05

**Tableau III.10 :** Coefficients d'absorption capillaire. [32]



**Figure III.15 :** Evolution des coefficients d'absorption capillaire des différents mortiers. [32]

Les résultats ont montré que :

- Après un jour, le mortier témoin absorbe un peu plus d'eau que les autres mortiers.
- A 7 jours d'essai, tous les mortiers continuent leur ascension dans l'absorption d'eau, seul le mortier à **20%** est très avantageux. Cela est dû au fait que les pores dans la pâte durcie et les interfaces entre cette dernière et les grains de sable sont remplis par la perlite et les pores capillaires sont ainsi réduits.

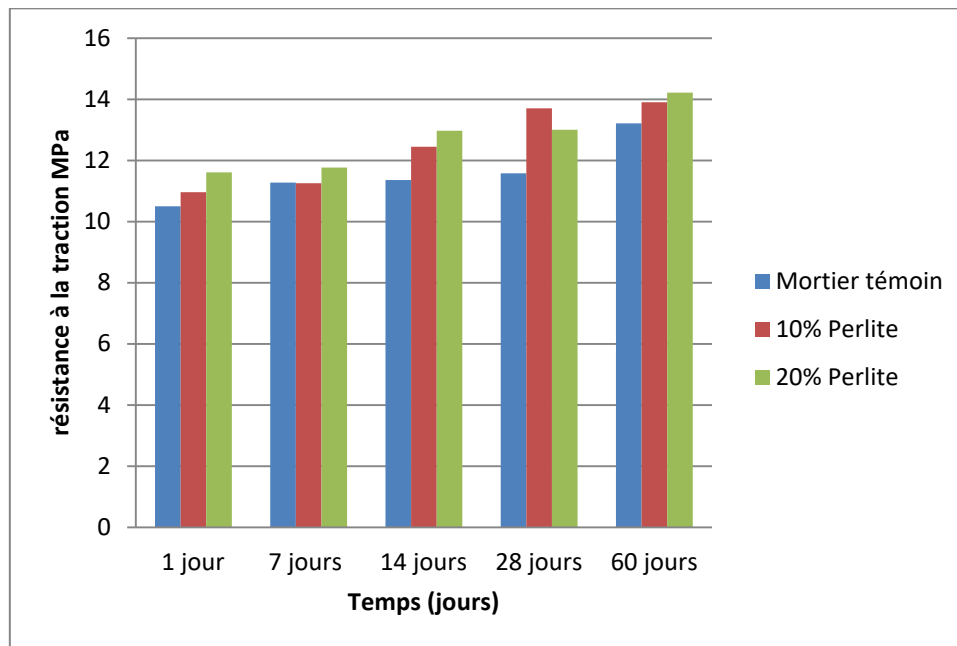
L'influence de la perlite naturelle sur l'absorption d'eau des mortiers à l'âge de 1 et 7 jours est apparente, l'incorporation de la perlite à des taux de 10 et 20 % respectivement au ciment CPJ est très avantageuse puis qu'elle permet une réduction importante d'absorption capillaire grâce à la densification de la matrice par la perlite et ainsi la réduction des pores.

### **III.3.RESISTANCES MECANIQUES DES MORTIERS**

#### **III.3.1. Résistances à la traction**

Des mesures de résistances à la traction ont été obtenus par rupture à la flexion trois points des éprouvettes ( $4*4*16\text{cm}^3$ ) à base de 10 % et 20% de perlite et celles du mortier témoin. [32]

La figure III.16 présente les résultats des résistances à la traction en MPa en fonction du temps et du dosage en perlite.

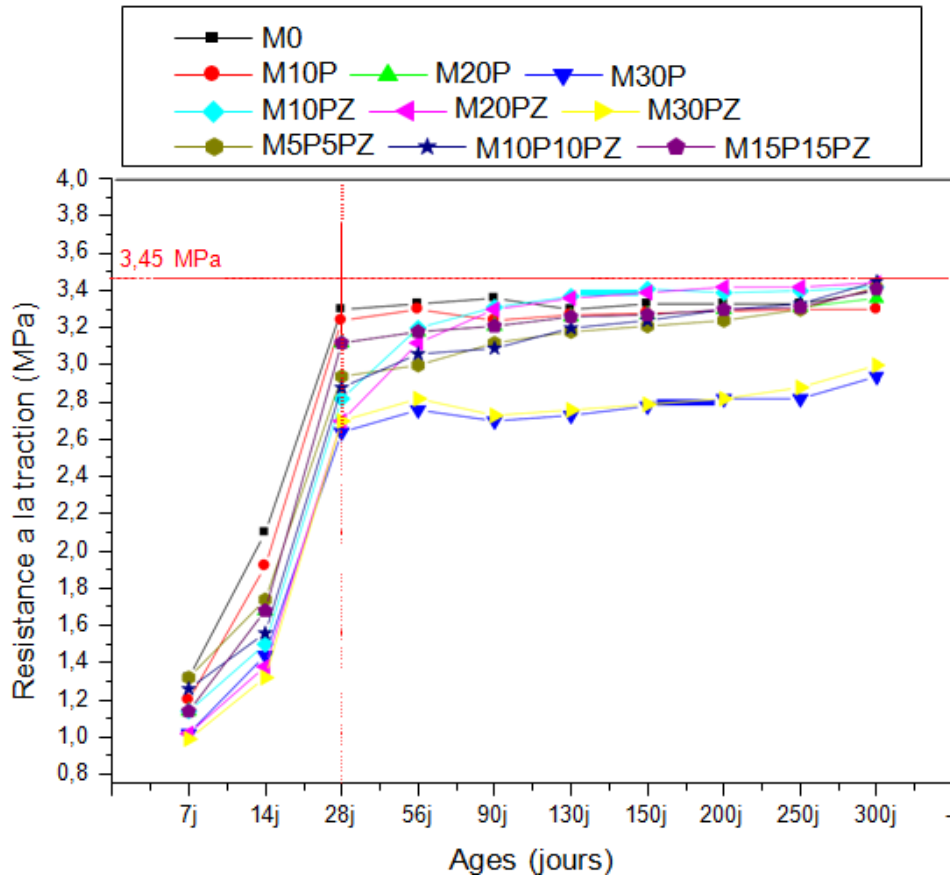


**Figure III.16 :** Evolution des résistances à la traction (MPa).[32]

La figure III.16 montre l'influence de l'incorporation de la perlite sur la résistance à la traction des mortiers à l'âge de 3, 7, 14, 28 et 60 jours. Il a été constaté que les résistances des mortiers avec ajout sont supérieures par rapport à celles du mortier témoin :

- La résistance à la flexion augmente avec l'augmentation du pourcentage en perlite à l'âge 3, 7, 14 et 60 jours.
- A 28 jours le mortier à 10% de perlite affiche des résistances supérieures à celles des autres mortiers.
- À long terme la résistance des mortiers à 20% perlite est supérieure à celle des mortiers à 10% de perlite et au mortier de référence

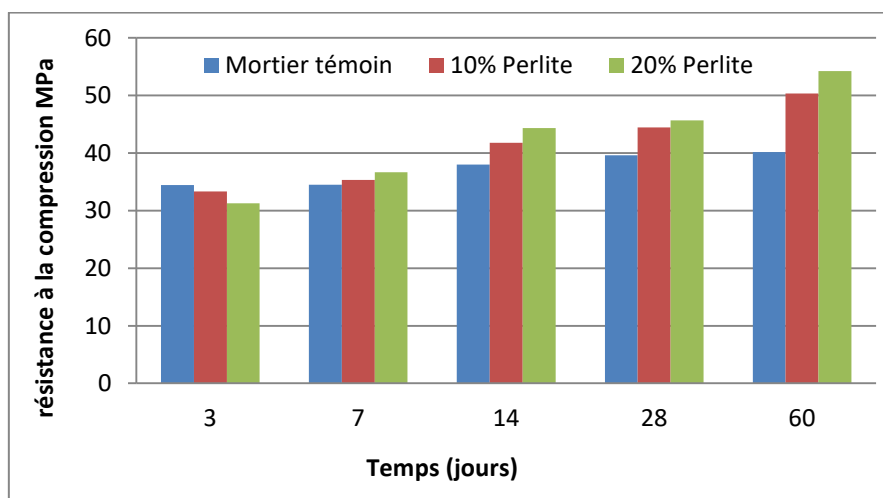
Selon l'étude Hamadache [38] concernant l'influence de la présence d'ajouts pouzzolaniques tels que la perlite de Maghnia et la pouzzolane naturelle de Béni-Saf sur le comportement mécanique à la traction, il a été démontré (figure III.17) que la résistance à la traction de tous les mortiers augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute avant 28 jours, au-delà de cette échéance il y a une augmentation lente sauf néanmoins une chute de résistance pour les mortiers avec 30% d'ajout de pouzzolane naturelle et de 30% d'ajout de la perlite est observée..



**Figure III.17 :** Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des mortiers dans l'eau saturée en chaux. [38]

### III.3.2. Résistance à la compression des mortiers à base de perlite

Les résistances à la compression des mortiers à base de perlite [32] sont reportées sur figure III.18.



**Figure III.18 :** Evolution des résistances à la compression (MPa). [32]

L'analyse de la figure III.18 a permis d'apporter les commentaires suivants :

Les résistances à la compression des mortiers élaborés avec les différents taux de substitution de la perlite sont inférieures à celle du mortier témoin au très jeune âge (3 jours), deviennent comparables à 7 jours et surpassent celles du témoin à moyen et long terme (14, 28 et 60 jours).

Ce gain de résistance peut être attribué aux rôles complémentaires de l'effet filler de perlite et l'effet pouzzolanique de l'ajout perlite au sein de la matrice cimentaire. L'effet filler réduit la porosité de la zone de transition pâte-granulat et l'effet pouzzolanique contribue à la formation de gels de **C-S-H** d'où une structure plus dense, plus compacte et par conséquent une pâte plus résistante.

Selon les recherches de HAMADACHE [38] il a conclu que selon les résultats donnés par la figure III.19 :

- La résistance à la compression de tous les mortiers augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute.
- Les résistances augmentent rapidement au jeune âge jusqu'à l'âge de 28 jours, après quoi ces résistances augmentent légèrement à long terme et ce pour tous les mortiers.
- Les résistances à la compression diminuent en général avec l'augmentation du pourcentage des ajouts pouzzolaniques.

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.

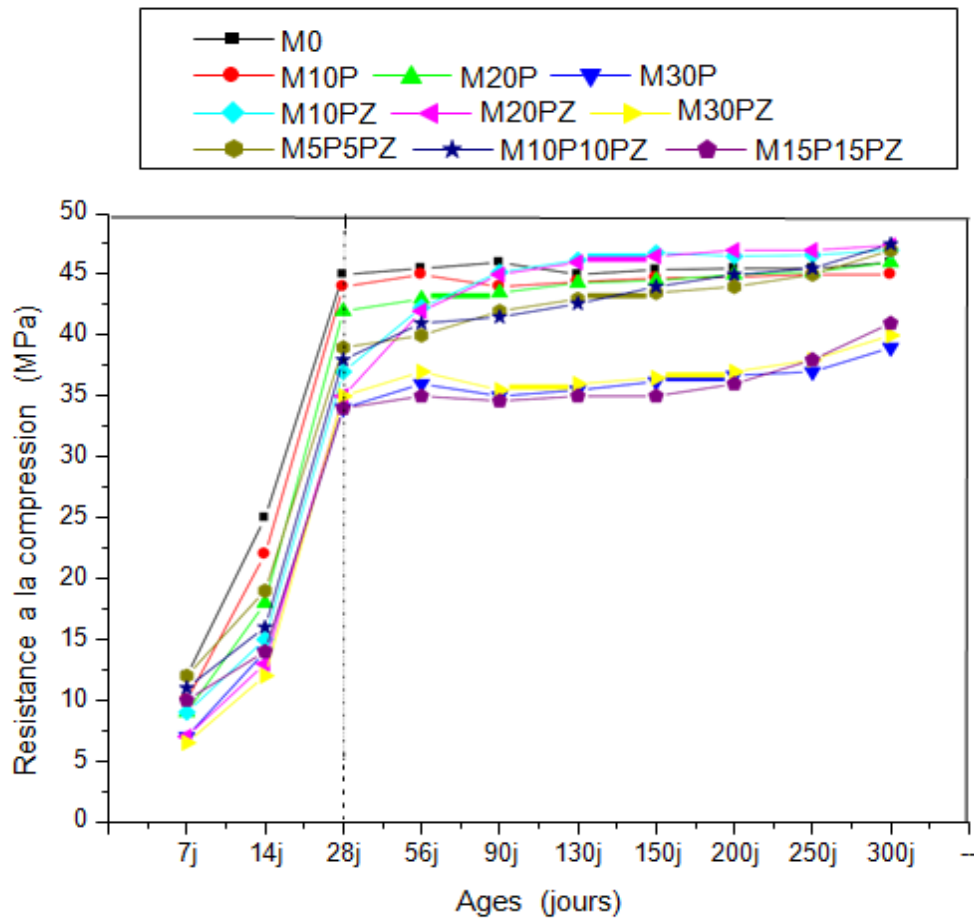


Figure III.19 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers dans l'eau saturée en chaux. [38]

## **CONCLUSION**

Ce chapitre avait pour objectif de comparer les résistances mécaniques des mortiers à base de perlite naturelle de Maghnia, et le mortier témoin, et de comparer l'effet de l'incorporation de la perlite avec des différents pourcentages par rapport à un mortier témoin, sur l'absorption capillaire

Les résultats menés à travers ces études permettent de dégager que la substitution d'un ciment composé par un taux de 20% d'ajout améliore les résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers au jeune âge et à long terme.

Pour l'absorption capillaire, le mortier témoin a absorbé une quantité d'eau importante par rapport au mortier à base de 10 20 % d'ajout. Cela est dû au remplissage des pores capillaires de la matrice cimentaire par la perlite et les pores sont ainsi réduits.

# *CHAPITRE IV :*

## *ETUDE THERMIQUE DES MORTIERS CONTENANT LA PERLITE ET LA POUZZOLANE*

## **CHAPITRE IV : ETUDE THERMIQUE DES MORTIERS CONTENANT LA PERLITE ET LA POUZZOLANE**

### **IV.1. INTRODUCTION**

Ce travail expérimental étudie les avantages et la possibilité de substitution partielle du ciment par ajout pouzzolanique (pouzzolane et perlite) dans le mortier. Cette étude expérimentale est tirée d'une recherche effectuée par Hamadache [38], consiste à préparer un mortier par remplacement d'un pourcentage de ciment par un ajout pouzzolanique substitué à divers pourcentage (10%PZ, 20%PZ, 30%PZ, 10%P, 20%P, 30%P, 5%PZ+5%P, 10%PZ+10%P, 15%PZ+15%P). Dans cette étude, il voulait faire varier le pourcentage de l'ajout pouzzolanique dans le mortier par la méthode de substitution (remplacement partiel du ciment par un ajout pouzzolanique) afin d'étudier son effet sur les propriétés thermique du mortier. Il utilise un matériau local comme substituant par rapport au ciment.

### **IV.2. LES PROPRIETES THERMIQUES**

#### **IV.2.1. Mesure de la conductivité thermique**

Pour mesurer la conductivité thermique des mortiers un appareil type Isomet 2104 » (figure IV.20) a été utilisé.

C'est un instrument de mesure portable pour la mesure directe 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.



**Figure IV.20 : Conductivimètre au laboratoire LABMAT (ENP Oran)**

La mesure est basée sur l'analyse de la réponse de la température du matériau analysé pour chauffer impulsions de flux.

Le flux de chaleur est excité par chauffage électrique de chauffe résistance inséré dans la sonde qui est en contact thermique direct avec l'échantillon testé.

L'évaluation de la conductivité thermique et la capacité calorifique volumique est basé sur les enregistrements de température périodiquement échantillonnés en fonction du temps, à condition que la propagation de la chaleur se produise dans un milieu illimité.

#### ***Facteurs influant sur la précision***

La mesure des propriétés thermo physiques par ISOMET peut être, comme toutes les autres mesures, influencée par les conditions de mesure.

Les facteurs qui influencent la mesure sont :

- La qualité du contact thermique entre la sonde et l'échantillon.
- Les dimensions de l'échantillon.
- Non-homogénéité de l'échantillon.
- Anisotropie de l'échantillon.
- L'humidité de l'échantillon.

#### **IV.2.2. Mesure de la résistance thermique $R_{th}$**

La résistance thermique  $R$  d'une paroi traduit la résistance aux transferts thermiques. Elle est liée au flux thermique  $\Phi$  en W à travers la paroi et à la différence de température  $\Delta\theta$  entre les 2 faces par :

$$\Phi = \frac{\Delta\theta}{R} \quad (II.6)$$

On définit également la résistance thermique surfacique  $R_s$ , telle que :

$$R = \frac{R_s}{s} \quad (II.7)$$

C'est la résistance thermique de la paroi pour une surface de  $1 \text{ m}^2$ .

Dans le cas d'une paroi constituée de plusieurs couches de matériaux différents, les résistances thermiques s'additionnent, la formule de  $R_{th}$  en fonction de la conductivité thermique est :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda} \quad (II.8)$$

Où  $e$  : épaisseur de la couche de matériau.

**Remarque** : Plus la valeur de la résistance thermique  $R_{th}$  d'une paroi est grande, plus le matériau est isolant.

### **IV.2.3. Choix de la méthode de mesure des propriétés thermo physiques**

La conductivité thermique et la chaleur volumique sont des propriétés caractérisant le transfert thermique des milieux. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux mesures de propriétés thermiques notamment de la conductivité thermique des milieux granulaires. Les mesures de cette dernière sont souvent complexes car elles dépendent de plusieurs paramètres.

Le choix d'une méthode de mesure de la conductivité thermique dépend de certains paramètres. À prendre en compte :

- Le type de produit : milieu granulaire, milieu semi-infini.
- Le type de régime thermique car il peut être stationnaire, transitoire, ou quasi établi.
- Le type de forme géométrique du milieu (2D, 3D, axisymétrique, ...)
- Les dimensions et les rapports de dimensions.
- La simplicité de la méthode.

On distingue les méthodes entre elles par le régime thermique temporel du milieu et peuvent être classées en deux grandes catégories : Les méthodes de mesures stationnaires, et instationnaires.

### **IV.3. MESURE DES PROPRIETES THERMIQUES DES MORTIERS**

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>.

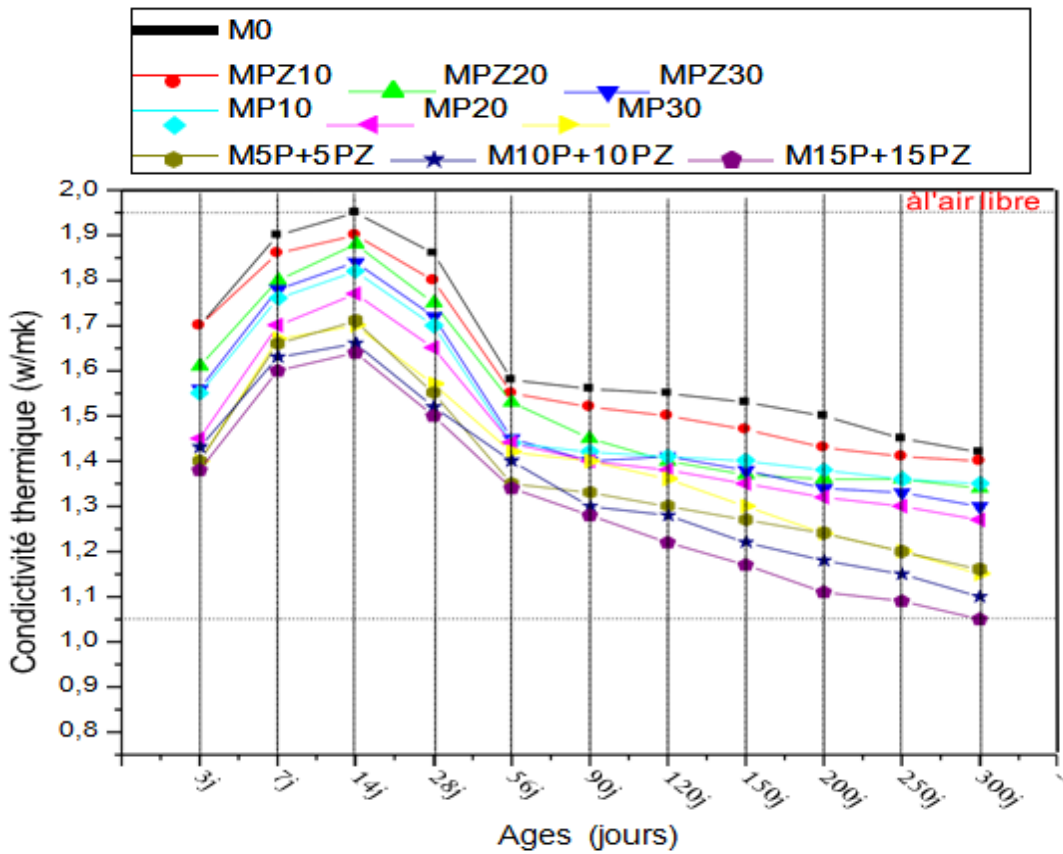
L'étude [ref] met en relief l'influence de la substitution partielle du ciment par la pouzzolane naturelle de Béni- Saf et la perlite de Hammam Boughrara sur la conductivité thermique des mortiers à l'aide d'un appareil type "Isomet 2104".

C'est un instrument de mesure portable pour la mesure directe 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.

#### **IV.3.1. Mesure de la conductivité thermique des mortiers à l'air libre**

La figure IV.21, illustre la variation de la conductivité thermique des mortiers pouzzolaniques et du mortier témoin en fonction du temps à l'air libre.

Trois phases de la conductivité thermique se distinguent :



**Figure IV.21 :** Variation de la conductivité thermique en fonction du temps des mortiers à l'air libre.

L'intervalle compris entre 3 jours et 14 jours 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

IV.3.2. Mesure de la conductivité thermique des mortiers conservés dans l'eau

La figure IV.22 montre la variation de la conductivité thermique des différents mortiers en fonction du temps conservés dans l'eau.

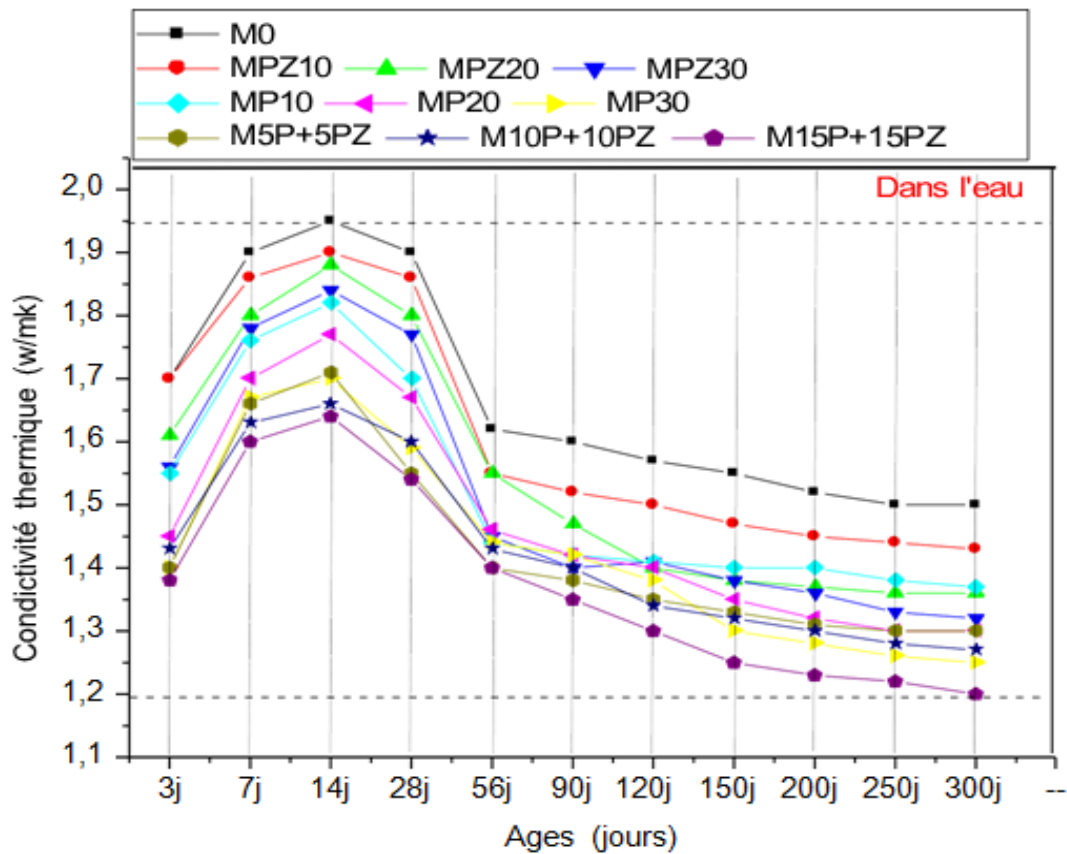


Figure IV.22 : Variation de la conductivité thermique en fonction du temps des mortiers conservés dans l'eau

De même l'intervalle compris entre 3 jours à 14 jours 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.

En comparant les figures IV.21 et IV.22, une bonne amélioration de l'isolation thermique est enregistrée. Elle est due essentiellement à la faible conductivité thermique des échantillons exposés à l'air par rapport à ceux conservés dans l'eau.

**IV.3.3. Mesure de la résistance thermique ( $R_{th}$ ) des mortiers à l'air libre et dans l'eau**

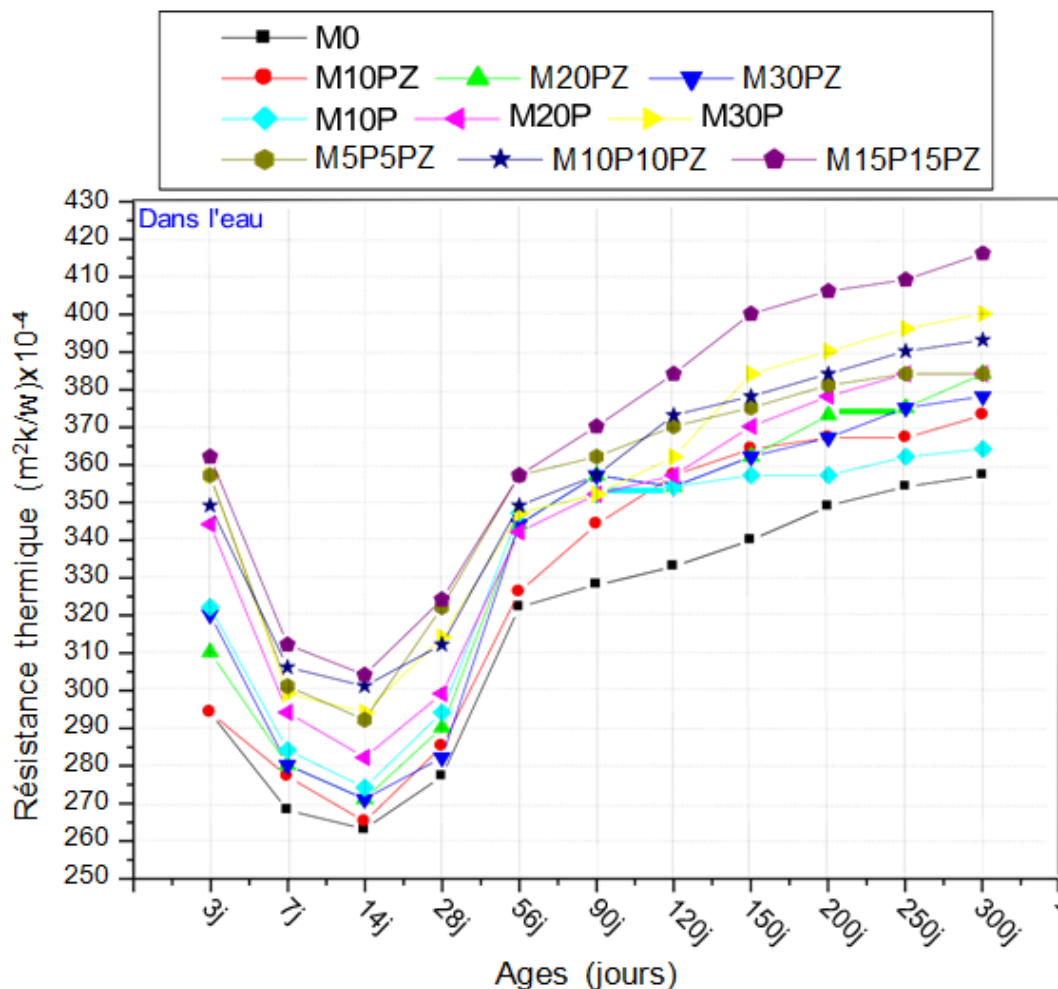
Les figures IV.23 et 24 montrent les variations de la résistance thermique ( $R_{th}$ ) des différents mortiers en fonction du temps ; On utilise la formule suivant :  $R_{th} = \frac{e}{\lambda}$

Où,

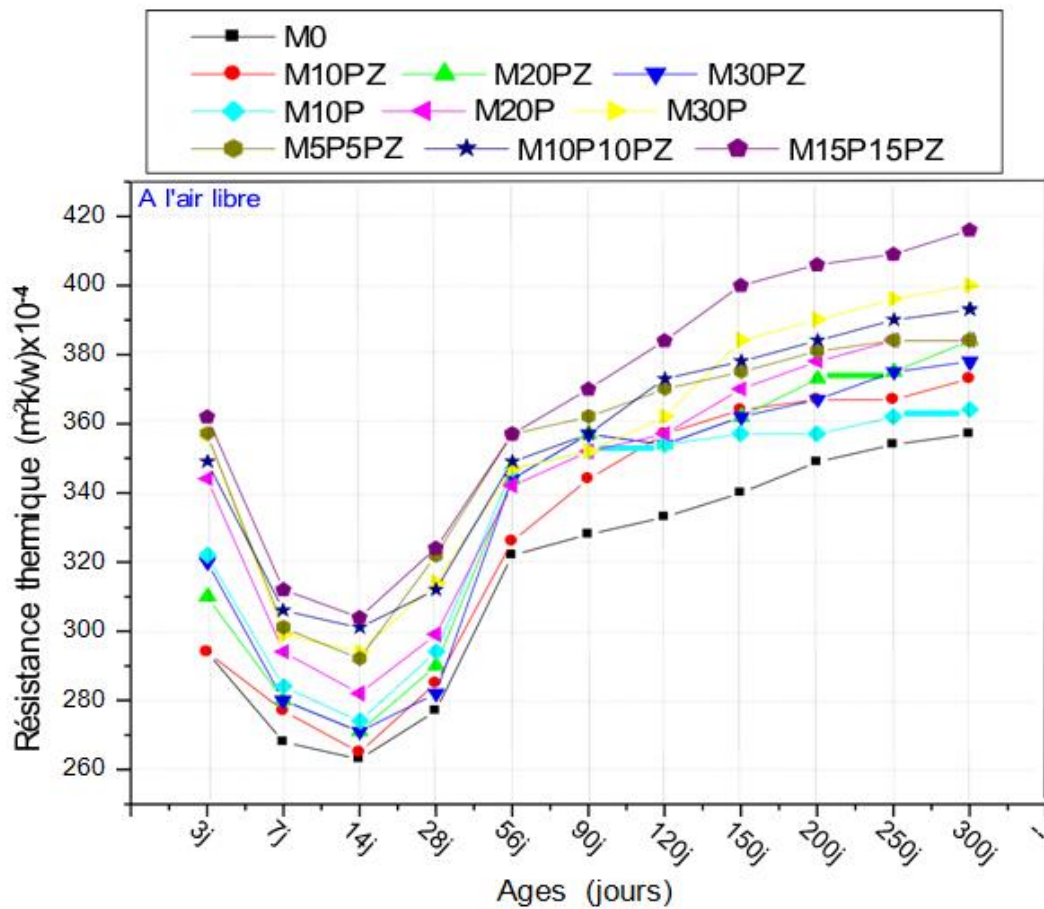
$e$  : épaisseur de la couche du matériau. On prend  $e = 0,05$  m.

$\lambda$  : 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 IV.23 :** Variation de la résistance thermique en fonction du temps conservés dans l'eau

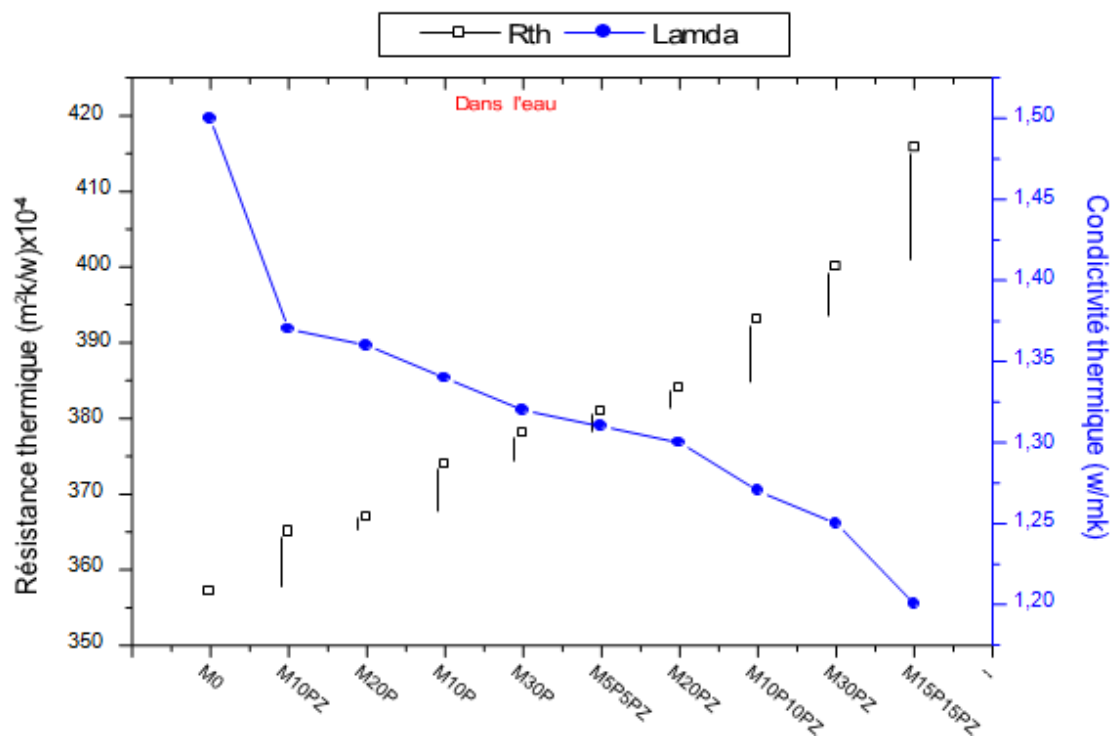


**Figure IV.24 :** Variation de la résistance thermique en fonction du temps à l'air libre

Il apparaît que plus la valeur de la résistance thermique  $R_{th}$  d'une paroi est grande, plus le matériau est isolant. En comparant les deux figures IV.23 et IV.24, une bonne amélioration de l'isolation thermique est observée, due essentiellement à une grande résistance thermique des échantillons exposés à l'air par rapport à ceux conservés dans l'eau.

#### IV.3.4. Comparaison entre la résistance thermique ( $R_{th}$ ) et la conductivité thermique des mortiers à l'air libre et dans l'eau

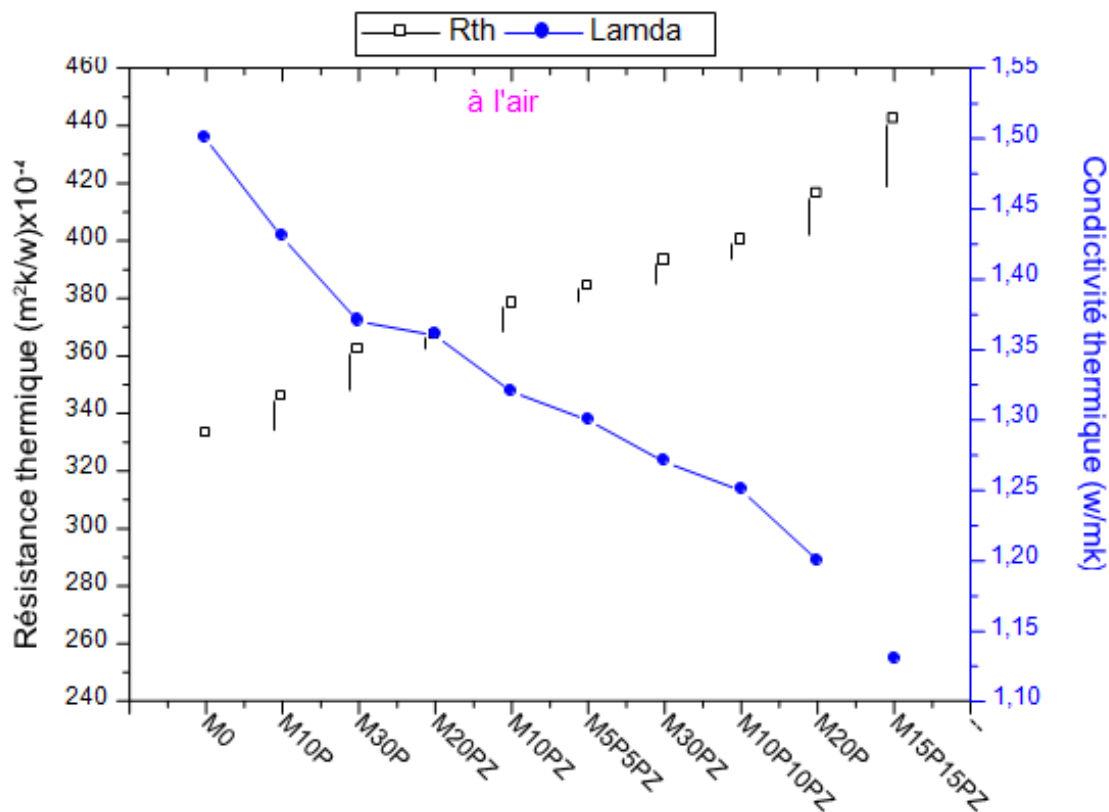
Les figures IV.25 et IV.26 représentent les variations de la résistance thermique, conductivité thermique des différents mortiers en fonction des teneurs pouzzolaniques à 300 jours,



Mortier à diffèrent teneur pouzzolanique à 300j

**Figure IV.25 :** Variation de la conductivité thermique, résistance thermique en fonction des teneurs pouzzolaniques (après 300 jours de conservation dans l'eau)

La figure IV.25 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



Mortier à diffèrent teneur pouzzolanique à 300j

**Figure IV.26 :** Variation de la conductivité thermique, résistance thermique en fonction des teneurs pouzzolaniques à l'air libre à 300 jours

La figure IV.26 exhibe la même variation des courbes que la figure IV.25. Sauf que le classement des mortiers pouzzolaniques à l'air libre diffère que leurs conservées dans l'eau. Le nouveau classement est comme suit :

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

## **CONCLUSION**

Les résultats de l'étude de HAMADACHE ont montré une meilleure valeur de la conductivité thermique à l'âge de 300 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, il a été déduit une meilleure isolation thermique.

La conclusion principale a démontré que c'est le matériau substitué (mélange de pouzzolane et perlite) au ciment Portland qui a conféré au mortier une meilleure conductivité thermique. Les mortiers pouzzolaniques peuvent être recommandés comme matériaux isolants thermiques parce que la conductivité thermique des échantillons est faible en fonction du temps quand la teneur en pouzzolane augmente. D'où, l'efficacité énergétique de ces matériaux.

Les conclusions tirées de cette recherche sont :

- 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 ;
- Une grande résistance thermique de tous les mortiers exposés à l'air 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.

# *CONCLUSION GENERALE*

### V. CONCLUSION GENERALE

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. En ce qui concerne l'évaluation de l'activité pouzzolanique de ces matériaux (perlite, pouzzolane naturelle), on a conclu ce qui suit :

- Les mortiers pouzzolaniques développent des résistances inférieures à celles du mortier de contrôle. La résistance à la flexion des mélanges contenant de la pouzzolane diminue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout au jeune âge.
- Bien que la résistance à la compression au jeune âge des mortiers soit 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 naturelle au CPA s'avère efficace puisque la résistance du mortier devient comparable à celle du mortier témoin.
- 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. Cette réaction produit des gels C-S-H supplémentaires qui contribuent à l'amélioration de la résistance des mortiers pouzzolaniques
- Le remplacement d'une partie du ciment par la pouzzolane conduit à une augmentation des résistances entre 14 jours et 28 jours.
- 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 ;
- Une grande résistance thermique de tous les mortiers exposés à l'air 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.

Enfin, 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, qui ont tout de même l'avantage d'atteindre des performances acceptables du point de vue de la résistance à la compression, l'absorption capillaires et les propriétés thermiques.

## CONCLUSION GENERALE

---

Etant donné que la littérature est pauvre en documentation sur les caractéristiques thermiques des mortiers contenant la pouzzolane de Béni-Saf et la perlite de Maghnia il est urgent de procéder à une étude expérimentale sur les propriétés thermo-physiques (conductivité thermique, résistance thermique,...) des mortiers à base de différents pourcentages de perlite afin de définir le dosage optimal qui attribue au mortier les meilleures caractéristiques.

# *REFERENCES BIBLIOGRAPHIES*

## VI. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]: [www.controls-group.com/...php?url...62.../nomefile=6265\\_francia](http://www.controls-group.com/...php?url...62.../nomefile=6265_francia).
- [2]: TAYLOR, . « Cementchemistry.Telford,NewYork » . 1997.
- [3]: NICOLAS HYVERT : « Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton » (Thèse de doctorat -l'Université Toulouse III - Paul Sabatier-2009).
- [4]: [kennouche.e-monsite.com/medias/.../cours-les-liants-hydrauliques-1](http://kennouche.e-monsite.com/medias/.../cours-les-liants-hydrauliques-1).
- [5]: [www.ciment.com](http://www.ciment.com)
- [6]: BERRAIH MIMOUN : « Etude des mortiers contenant de la pouzzolane naturelle et des déchets de verre » (Mémoire de Magister- l'ENSET d'Oran-2010).
- [7]: (CNAT) les ciments rapport technique
- [8]: REUNION D'INGENIEUR, « matériaux de construction » , Edition Eyrolles 1979
- [9]: [www.groupglobalcompany.com/ggf/tipos-a.../production-de-ciment](http://www.groupglobalcompany.com/ggf/tipos-a.../production-de-ciment)
- [10]: CHIHAOUI RAMDANE : « Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif » (Mémoire de Magister- USTMB d'Oran -2008).
- [11] : H. RUMPF, AUFBER. Techn., 1973. 2: p. 59-71.
- [12]: A. A. GRIFFITH, «The Phenomena of Rupture and Flow in Solids». Phil . Trans. Roy. Soc, 1921. 163-198.
- [13]: H. DOMBROWE, B. HOFFMAN, AND W. SCHEIBE, «Mode of action and possibilities for use of grinding aids ». ZKG International, 1982. 35(11): p. 571-580.
- [14]: P. BLAZY, J. YVON, AND E. A. JDID, «Fragmentation» : Généralité, Théorie. Techniques de l'ingénieur, 1992. A5050.
- [15]: H.F.W. TAYLOR, «Cement chemistry». Thomas Telford publishing, 1998.
- [16]: CIMENTS FRANÇAIS, « La fabrication des ciments ». Eyrolles, 1993.
- [17]: C. GUERANDEL, E. MOUDILOU, AND S. TUSSEAU-NENEZ AND M. N. DE NOIRFONTAINE, « Modélisation thermodynamique du diagramme de phases du système CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ». rapport de fin d'étude ESIREM/CTG-Italcementi Group, 2006.
- [18]: YASSINE SENHADJI : « L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfatiques) » (Mémoire de Magister-USTMB d'Oran -2006).
- [19]: NORME ALGERIENNE : « Liants hydrauliques - ciments courants : composition, spécifications et critères de conformité », NA 442 : 2000, Deuxième Edditions, IANOR

[20]: I. ODLER, « hydratation, Setting, and Hardening of Portland Cement ». Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 1998.

[21]: ARTICLE INTERNET « les ciments » 2004.

[22]: CIMENTS FRANÇAIS, « La fabrication des ciments ». Eyrolles, 1993.

[23]: E. MOUDILOU, « Cinétiques et mécanismes de relargage des métaux lourds présent en traces dans les matrices cimentaires ». Thèse Université d'Orleans, 2000.Pozz

[24]: L'ACTIVITE POZZOLANIQUE, « Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées », n° 93, 1978, pp. 66-69

[25]: «Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements », in 6th International Congress on the Chemistry of Cement, Moscow, September 1974

[26]: A.MEBROUKI «influence de la pouzzolane de Beni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des mortiers » thèse de Magister- Université Mostaganem - juin 2003. : La pratique des ciments mortier et bétons « caractéristiques des liants des bétons mise en oeuvre des coulis et mortiers » (chapitre 1) Michel Vénuat 1989.

[27]: PUBLICATION INTERNET « [mailto:philippe.montel@auvergne\\_volcan.com](mailto:philippe.montel@auvergne_volcan.com) » 2004.

[28]: J.M.GEOFFRAY, R.VALLADEAU : Morphologie et couleur des pouzzolanes. Bulletin de liaison des Laboratoires de ponts et chaussées-92-nov-déc, 1977- réf. 2116. pp91- 94.

[29]: R.SERSALE : « Structure et caractérisation des pouzzolanes et des cendres volantes ». Sous thème IV-1.7eme Congrès International de la chimie des ciments. Vol I. Paris, 1980.

[30]: KAID NOURIA. « Etude de la durabilite des mortiers pouzzolaniques face aux milieux agressifs ». These pour l'obtention du diplome de doctorat en sciences 2002

[31]: T. Z. HARMATHY et L. W. ALLEN « CBD-140-F. Comportement thermique des murs de maçonnerie en béton sous l'action du feu » Institut de recherche de la construction de date de publication 01-01-1974.

[32] : BOURROUBEY CHAHRAZED «influence de la perlite naturelle sur les mortiers ».Mémoire de fin d'étude de master académique, juin 2019.

[33] : AOUIRA HAFSA, BOUHALI NOUR ELHOUDA «influence des ajouts pouzzolanique sur l'évolution de la propriété d'une matrice cimentaire » Mémoire de Master Académique, juin 2017

[34] : OULD MOUSSA MOURAD ; BOURAS NORA « fabrication du ciment » Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de licence Génie civil, juin 2018

[35] : BESSENOUCI MOHAMMED ZAKARIA « Impact et contribution thermo énergétique des matériaux de construction à base pouzzolanique dans l'habitat » Mémoire de magister, 2010

**[36]** : Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique Par: Ben Aouira Hafsa ; Bouhali Nour Elhouda Intitulé Etude de l'influence des ajouts pouzzolanique sur l'évolution du propriété d'une matrice cimentaire, juin 2017

**[37]**: BEN MOSTEFA FATIMA ; BOUHAFS KHEIRA. « Étude de la durabilité des mortiers à base de pouzzolane » Mémoire de master, juin 2017.

**[38]** : HAMADACHE MILOUD « intitule Résistances mécaniques, conductivité et résistance à la corrosion des mortiers pouzzolaniques ».These pour l'obtention du diplome de doctorat en sciences, 2018

**[39]** : NF EN 480-5, Norme européenne « méthode d'essai permettant de déterminer l'effet des adjuvants sur l'absorption capillaire des mortiers ». Janvier 2006.