

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

People's Democratic republic of Algeria

Ministry of Higher Education and Scientific Research



جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Abdelhamid Ibn Badis University of Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology



قسم الهندسة المدنية
Department of Civil Engineering

N° d'ordre: M/GC/2022

Mémoire de Master académique

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structure

Etude du comportement physico-mécanique des mortiers
à base de 10 et 20% de perlite naturelle de Maghnia

Présenté par :

BOUZIDI Chahrazed
BOUTADJINE Zahira

Soutenu le 06/07/2022 devant le jury composé de :

Président :	MEBROUKI Abdelkader	Pr.	Université de Mostaganem
Examineur :	BELARIBI Omar	MCB	Université de Mostaganem
Encadrante :	BELAS Nadia	Pre.	Université de Mostaganem
Invité :	Hamadache Miloud	MCA	Université de Relizane

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH TOUT PUISSANT, qui nous a donné la force, le courage, la volonté et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier sincèrement notre encadrante **Mme. BELAS NADIA**, sans oublier **Mr. BELARBI OMAR** pour leurs aides et leurs encadrements durant toute la période de préparation de ce mémoire. Ils ont toujours été attentifs et disponibles durant la période de réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, les conseils et le temps qu'ils nous ont bien voulu nous consacrer.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Nous vifs remerciements aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.

Nos sincères remerciements à nos enseignants et tout le département de génie civil, et également l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation.

Nos remerciements vont également aux Docteurs CHIHAOUI Ramdane et HAMADACHE Miloud ainsi qu'au Doctorant de l'Université d'El Bayadh ACHOUR Mokhtar et aux Doctorants de l'Ecole Nationale Polytechnique Maurice Audin d'Oran NEFOUSSI Hamid, BELMOKRETAR Mohamed et ABDELHADI Houari sans oublier les techniciens des laboratoires du génie civil (Université Abdelhamid Ibn Badis) à Mostaganem, et du Laboratoire Matériaux (LABMAT) de l'ENPO. Enfin, nous sommes reconnaissants à Mr. MARREF Mohamed Responsable du groupe Gica, Mr. AOUAR Abdelhamid de la société Adwan (Chemicals compagany) et Mme. CHAOUCHI Fatiha de SIKA ALGERIE de nous avoir fournis le ciment, le sable et le plastifiant BV 40 respectivement.

Enfin, nous remercions tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de cette étude.

DÉDICACES

**J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail à
Mes chers parents
Abdelkader, Karima**

**Malgré tout ce que je fais ou je dis, je ne peux pas vous remercier comme
je le devrais. Vous étiez toujours à mes côtés pour me soutenir et
m'encourager. Vous êtes toujours ma source de force pour affronter les
différents obstacles.**

A mes très chères sœurs et mon cher frère

Kheira, Sara, Hosna et Mohamed

A la mémoire de mon grand père

A toute ma grande famille

A tous mes amis

Zahira, Asma, Sara, Fatima, Rania, Nawel, Hafsa

**A toute la promotion 2022 et tous les étudiants de la Faculté des Sciences
et Technologie de l'Université de Mostaganem.**

Chahrazed Bouzidi

DÉDICACES

C'est avec grand plaisir que je dédie ce modeste travail

Aux être les plus chers de ma vie, mes parents Ahmed et Zohra.

Qui ont fait de moi la personne que je suis.

A mes grands-parents qui m'invoquent toujours dans leurs prières.

A mes chers Frères et Sœur, Bendhiba, Amine et Sara

A mes amies

Chahrazed, Asma, Sara, Nawal, Fatima, Rania, Hafsa.

A tous mes collègues de promotion de 2 année Master Structure.

A toute personne qui occupe une place dans mon cœur.

A tous les membres de ma famille.

Je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite

Zahira Boutadjine

RESUME

L'Algérie possède un potentiel appréciable en matériaux pouzzolaniques naturels notamment la perlite issue de Hammam Boughrara à Maghnia (Tlemcen). Néanmoins, il reste non exploité jusqu'à l'heure actuelle. La perlite est un verre volcanique qui contient un taux élevé de silice et d'alumine dans sa composition chimique. Finement broyée, ses propriétés lui donnent le privilège d'être utilisée comme un ajout minéral actif dans la production du ciment.

L'objectif de ce projet est de fournir davantage de données sur l'utilisation de la perlite comme substitut partiel au ciment pour confectionner des mortiers (0%, 10% et 20%) dont les comportements à l'état frais (consistance, maniabilité et prise) et à l'état durci (absorption capillaire, propriétés thermo-physiques et résistances mécaniques) ont été étudiés.

Les résultats de l'étude expérimentale prouvent que la perlite de Maghnia influe positivement sur les propriétés des mortiers. La possibilité de l'employer à des dosages allant jusqu'à 20% dans le but de diminuer le taux du ciment implique un avantage économique et écologique. Par ailleurs un comportement mécanique à la traction et compression satisfaisant à long terme pour un taux de perlite de 20% et une très bonne résistance thermique pour un taux de 10%, offrent l'opportunité de valoriser la perlite en tant que matériau de construction à part entière comme composant des matériaux cimentaires performants mécaniquement et efficaces énergétiquement.

Mots-clés : Perlite, Mortiers, Absorption capillaire, Caractéristiques thermophysiques, Résistances mécaniques.

ABSTRACT

Algeria has a significant potential in natural pozzolanic materials including perlite from Hammam Boughrara in Maghnia (Tlemcen). Nevertheless, it remains unexploited until now. Perlite is a volcanic glass which contains a high rate of silica and alumina in its chemical composition. Finely ground, its properties give it the privilege of being used as an active mineral addition in the production of cement.

The objective of this project is to provide more data on the use of perlite as a partial substitute for cement to make mortars (0%, 10% and 20%) whose behavior in the fresh state (consistency, workability and setting time) and in the hardened state (capillary absorption, thermo-physical properties and mechanical strength) were studied.

The results of the experimental study prove that Maghnia perlite has a positive influence on mortars properties. The possibility of using it at dosages up to 20% in order to decrease the rate of cement implies an economic and ecological advantage. In addition, a mechanical behavior to traction and compression satisfactory in the long term for a rate of 20% perlite and a very good thermal resistance for a rate of 10%, offer the opportunity to value the perlite as a building material in its own right as a component of cementitious materials performing mechanically and energetically efficient.

Keywords: Perlite, Mortars, Capillary absorption, Thermophysical characteristics, Mechanical strength.

المخلص

تتمتع الجزائر بإمكانيات ملحوظة في المواد الطبيعية البوزولانية، ولا سيما بيرلايت حمام بوغرارة في مغنية (تلمسان). ومع ذلك، فإنها لا تزال غير مستغلة حتى الآن. البيرلايت عبارة عن زجاج بركاني يحتوي على نسبة عالية من السيليكا والألومينا في تركيبته الكيميائية. خصائصه تمنحه امتيازاً لاستخدامه كمادة مضافة معدنية نشطة في إنتاج الأسمنت.

الهدف من هذا المشروع هو توفير المزيد من البيانات حول استخدام البيرلايت كبديل جزئي للأسمنت في صناعة الملاط (0%، 10% و20%) في الحالة الطازجة (القوام، اللبونة، الوقت المحدد) وفي الحالة الصلبة (الامتصاص الشعري، الخصائص الحرارية والفيزيائية والمقاومة الميكانيكية).

أثبتت نتائج الدراسة التجريبية بأن بيرلايت مغنية لها تأثير إيجابي على خواص الملاط. إن إمكانية استخدامها بكميات تصل حتى 20% من أجل تقليل معدل الأسمنت، تعتبر ميزة اقتصادية وبيئية إيجابية. بالإضافة إلى ذلك، فإنها تعطي نتائج مرضية بالنسبة للسلوك الميكانيكي في الشد والانضغاط على المدى الطويل لمعدل 20% من البيرلايت ومقاومة حرارية جيدة جداً للملاط ذات 10% من البيرلايت. تتيح الدراسة الفرصة لتثمين البيرلايت كمادة بناء ومكون لمواد إسمنتية ذات كفاءة ميكانيكية وكفاءة طاقة.

الكلمات المفتاحية: البيرلايت، الملاط، الامتصاص الشعري، الخصائص الحرارية الفيزيائية، الخصائص الميكانيكية.

Sommaire

Remerciements	I
Dédicaces	II
RESUME.....	IV
ABSTRACT	V
الملخص	V
LISTE DES TABLEAUX	IX
LISTE DES FIGURES	XII
LISTES DES FORMULES	XVI
Liste des abréviations et symboles	XVII
INTRODUCTION GENERALE	XVIII

Partie I : RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA PERLITE.....	1
I.1. INTRODUCTION	1
I.2. LA PERLITE NATURELLE.....	1
I.2.1. Définition	1
I.2.2. Origine de la perlite.....	2
I.2.3. Caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques de la perlite.....	3
I.2.4. Réserves, production et consommation de la perlite dans le monde	7
I.2.5. La perlite en Algérie.....	7
I.2.6. Traitement et méthodes d'exploitation	12
I.3. CONCLUSION	13
CHAPITRE II : ETUDE DES CARACTERISTIQUES THERMO-PHYSIQUES DES MORTIERS A BASE DE PERLITE.....	14
II.1. INTRODUCTION	14
II.2. NOTION DE BASE SUR LA THERMIQUE.....	14
II.2.1. Le confort thermique	14
II.2.2. Parvenir au confort thermique avec des travaux d'isolation	15
II.2.3. Différence entre chaleur et température.....	15
II.3. NOTION DE TRANSFERTS THERMIQUES	15
II.3.1. La conduction	16
II.3.2. La convection.....	16
II.3.3. Le rayonnement	17
II.3.4. La fuite de la chaleur – le flux thermique : φ	17
II.4. Les caractéristiques thermo-physiques.....	18

II.4.1. La conductivité thermique λ	18
II.4.2. La résistance thermique d'un matériau R	19
II.4.3. La résistance superficielle d'une paroi : R_{se} et R_{si}	20
II.4.4. La résistance thermique d'une paroi homogène R_{paroi}	20
II.4.5. La chaleur spécifique (chaleur massique)	21
II.4.6. Diffusivité thermique.....	21
II.4.7. L'effusivité thermique	21
II.5. METHODES DE MESURE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE.....	22
II.5.1. Mesures en régime stationnaire	22
II.5.2. Mesures en régime transitoire	24
II.6. LES RECHERCHES SUR LES PROPRIETES THERMIQUES DES MORTIERS A BASE DE MATERIAUX POUZZOLANIQUES.....	26
II.3.1. Etude des propriétés thermiques des mortiers à base de perlite (33)	26
II.3.2. Etude thermo-physique des bétons à base de granulats légers (perlite expansée et pierre ponce) (34)	27
II.3.3. Étude d'un mortier à base de perlite avec étude thermique et acoustique (36)	28
II.3.4. Les Propriétés physico-thermiques des mortiers à base des agrégats composites "PET-sable siliceux " (39)	29
II.3.5. Étude des propriétés mécaniques et conductivité thermique du béton léger à base de perlite expansée (40)	30
II.3.6. Fabrication de briques d'argile contenant la perlite résistante à haute température (41)	31
II.3.7. La conductivité thermique apparente de béton à base de pouzzolane (42)	31
II.4. CONCLUSION	32
CHAPITRE III : SYNTHÈSE DES RECHERCHES SUR LES MORTIERS A BASE DE PERLITE.....	33
III.1. INTRODUCTION	33
III.2. FORMULATIONS ETUDIÉES.....	33
III.2.1. Formulations de Hamadache (15).....	33
III.2.2. Formulations de Chihaoui (5)	33
III.2.3. Formulation de Bourroubey (43).....	34
III.2.4. Formulations de Maamar Benhadjar et al (44)	34
III.2.4. Formulations de Guenanou (17)	34
III.3. SYNTHÈSE DES ETUDES SUR MORTIERS A BASE DE PERLITE	35
III.3.1. Étude à l'état frais	35
III.3.2. Étude à l'état durci	42
III.4. CONCLUSION	51
PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	53

Partie II : PROGRAMME EXPERIMENTAL

CHAPITRE I : MATERIAUX UTILISES	55
I.1. INTRODUCTION	55
I.2. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES.....	55
I.2.1. Le ciment	55
I.2.2. Perlite naturelle.....	58
I.2.3. Le sable.....	59
I.2.4. Adjuvant	63
I.5. CONCLUSION	63
CHAPITRE II : LES METHODES EXPERIMENTALES SUR LES MORTIERS A BASE DE LA PERLITE.....	64
II.1. INTRODUCTION	64
II.2. FORMULATION ET PREPARATION DES MELANGES	64
II.2.1. Formulation et préparation des pâtes	64
II.2.2. Formulation et préparation des mortiers	64
II.3. Méthodes d'essais.....	66
II.3.1. Les essais à l'état frais	66
II.3.2. Essais à l'état durci	72
II.4. CONCLUSION	79

Partie III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

CHAPITRE I : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT FRAIS.....	81
I.1. INTRODUCTION	81
I.2. RESULTATS DES ESSAIS SUR PATES NORMALISEES	81
I.2.1. Essais de consistances	81
I.2.2. Essais de prise.....	82
I.3. RESULTATS DES ESSAIS SUR MORTIERS FRAIS	83
I.3.1. Essai de maniabilité	83
I.4. CONCLUSION	84
CHAPITRE II : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT DURCI	85
II.1. INTRODUCTION	85
II.2. CARACTERISATION DU MORTIER DURCI	85
II.2.1. Résultats de l'essai d'absorption capillaire	85
II.2.2. Résultats de l'étude thermique.....	86
II.2.3. Résistances mécaniques des mortiers.....	92
II.3. CONCLUSION	95

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES..... 96
Références bibliographiques 98
Annexes 105

LISTE DES TABLEAUX

Partie I : RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA PERLITE

Tableau I.1. Compositions chimiques d'une sélection de perlites typiques commercialisées(7)	3
Tableau.I.2. Propriétés physiques de la perlite brute(2).....	4
Tableau.I.3. La composition chimique typique de la perlite brute(1)	4
Tableau.I.4. Conformité de la perlite selon la norme ASTM C618(17).....	6
Tableau.I.5. Réserves et productions mondiales de la perlite (mille tonne) [USGC, 2018]	7
Tableau.I.6. Les principaux gisements de la perlite en Algérie(18)	8
Tableau.I.7. Composition chimique élémentaire de la perlite de Hammam Boughrara (%) (17)	10
Tableau.I.8. Conformité de PR selon la norme ASTM C618.(17).....	11
Tableau.I.9. Caractéristiques physiques de perlite(17).....	11

CHAPITRE III : SYNTHÈSE DES RECHERCHES SUR LES MORTIERS A BASE DE PERLITE

Tableau.III.1. Formulations des mortiers(15).	33
Tableau.III.2. Formulations des mortiers(5).	33
Tableau.III.3. Formulations des mortiers(43).	34
Tableau.III.4. Formulations des mortiers(44).	34
Tableau.III.5. Formulations des mortiers(17).	34
Tableau.III.6. Dosages du plastifiant des mortiers à base de perlite.(43).....	35
Tableau.III.7. Influence de la perlite naturelle sur la maniabilité des mortiers à E/C=0,50.(15)	36
Tableau.III.8. Proportions des mélanges de différents mortiers (5).	36
Tableau.III.9. Dosages du plastifiant des mortiers à base de perlite.(44).....	37
Tableau.III.10. Les essais de consistances, début et fin de prise des pâtes de ciment(15).....	38
Tableau.III.11. Temps de prise de différentes pâtes de ciment(5).	40
Tableau.III.12 . Résultats de consistance pour chaque composition de pâte.(43)	40
Tableau.III.13. Caractéristiques physiques des différentes pâtes de ciment(17).....	42
Tableau.III.14. Résistance à la compression en fonction de l'âge des différents mortiers. (17)..	48
Tableau.III.15. Résistance à la flexion en fonction de l'âge des différents mortiers (17).....	51

Partie II : PROGRAMME EXPERIMENTAL

CHAPITRE I : MATERIAUX UTILISES

Tableau.I.1. Composition chimique élémentaire de ciment (CRS) (%) (GICA).	56
Tableau.I.2. Composition minéralogique du clinker.....	56
Tableau.I.3. Les caractéristiques physico-mécaniques du ciment.	56
Tableau.I.4. Caractéristiques physiques du ciment CRS.....	58
Tableau.I.5. Composition chimique élémentaire de la perlite naturelle.....	58
Tableau.I.6. Caractéristiques physiques de la perlite naturelle(5).	59
Tableau.I.7. Composition chimique du sable (Adwan).	60

Tableau.I.8. Les caractéristiques physiques du sable siliceux.....	62
Tableau.I.7. La granulométrie du sable utilisé.....	62
Tableau.I.8. Caractéristiques physiques et chimique de l'adjuvant.....	63

CHAPITRE II : LES METHODES EXPERIMENTALES SUR LES MORTIERS A BASE DE LA PERLITE

Tableau.II.1. Détails des différents liants composés.....	64
Tableau.II.2. Formulations des mortiers.....	65
Tableau.II.3. Conduite des opérations du malaxage.....	65
Tableau.II.4. Opérations du malaxage [LA NORME EN 196-3].....	67
Tableau.II.5. Classe de consistance selon la durée d'écoulement [LA NORME EN 206-1].	69
Tableau.II.6. Les opérations du malaxage [LA NORME EN 196-1].	70

Partie III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

CHAPITRE I : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT FRAIS

Tableau.I.1. Formulation des pâtes.....	81
Tableau.I.2. Temps de début et fin de prise et temps de prise	82
Tableau.I.3. Maniabilité des mortiers (temps de vibration en (secondes)).	83
Tableau.I.4. Dosages du plastifiant des mortiers à base de perlite.	83

CHAPITRE II : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT DURCI

Tableau.II.1.Coefficients d'absorption capillaire des différents mortiers	86
Tableau.II.2.Conductivités thermiques	87
Tableau.II.3.Chaleurs massiques	88
Tableau.II.4.Diffusivités thermiques	89
Tableau.II.5.L'effusivités thermiques.....	89
Tableau II.6. Résistance thermique.....	90
Tableau.II.7.Résistances à la traction (MPa).....	92
Tableau.II.8.Résistances à la compression (MPa)	93

LISTE DES FIGURES

Partie I : RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA PERLITE

Figure .I.1. ATD des mortiers à 7 jours 1-Témoin 2-Perlite 3- Cendre volante(13).....	5
Figure .I.2. Localisation des ajouts pouzzolaniques selon le graphe de Frattini [15].....	6
Figure .I.3. Gisement Bab à Hammam Bouhrara (Tlemcen)(17).....	7
Figure .I.4. Localisation du gisement de Hammem Bouhrara (TLEMCEM).....	8
Figure .I.5. Perlite naturelle (a), concassée (b), broyée (c)(17)	9
Figure .I.6. L'analyse aux rayons X de la perlite(17)	9
Figure .I.7. Superposition des DRX de la perlite(17)	10
Figure .I.8. Photo MEB et EDS de perlite brute(17)	12
Figure .I.9. Photo MEB de perlite broyée(17).....	12

CHAPITRE II : ETUDE DES CARACTERISTIQUES THERMO-PHYSIQUES DES MORTIERS A BASE DE PERLITE

Figure .II.1. La différence entre la température et la chaleur	15
Figure .II.2. La conduction	16
Figure .II.3. La convection.....	16
Figure .II.4. Le rayonnement.....	17
Figure .II.5. Les trois modes de transfert.	17
Figure .II.6. Le flux thermique.....	18
Figure .II.7. La conductivité thermique.	18
Figure .II.8. Conductivités thermiques de quelques matériaux.	19
Figure .II.9. La résistance thermique d'un matériau	19
Figure .II.10. La résistance superficielle d'une paroi.....	20
Figure .II.11. La résistance thermique d'une paroi homogène	20
Figure .II.12. Dispositif de plaque chaude gardée à deux éprouvettes (gauche) et fluxmètre à une éprouvette (droite).....	23
Figure .II.13. Schéma de la méthode flash	24
Figure .II.14. Schéma de la méthode Hot Disk — Source Plane Transitoire.....	25
Figure .II.15. Schéma de la méthode Fil chaud.	25
Figure .II.16. Effet de la teneur en EPA,	27
Figure .II.17. Effet de la teneur en EPA,	27
Figure .II.18. Evolution des caractéristiques acoustiques en fonction du pourcentage de la perlite expansée.....	28
Figure .II.19. Variation des caractéristiques thermiques et acoustiques en fonction du pourcentage de la perlite expansée	29
Figure .II.20. La variation de la conductivité thermique (λ), la capacité calorifique (ρC_p), la diffusivité thermique (a) des différents mortiers chapes WPLAX.....	30
Figure .II.21. Evolution des propriétés thermiques dynamiques en fonction des pourcentages de substitution.....	30

CHAPITRE III : SYNTHESE DES RECHERCHES SUR LES MORTIERS A BASE DE PERLITE

Figure .III.1 .la maniabilité des mortiers (temps de vibration)(43)	35
Figure .III.2. Variation de l'étalement en fonction des différentes teneurs pouzzolaniques(15)..	36
Figure .III.3. Temps d'écoulement en fonction du dosage en Perlite des mortiers(44).....	37
Figure .III.4. Variation de la consistance des pâtes de ciment en fonction des teneurs en perlite (15)	38
Figure .III.5. Variation de temps de prise des pâtes de ciment en fonction des différentes teneurs pouzzolaniques(15)	39
Figure .III.6. Variation E/C pour avoir des pâtes à consistance normale(5)	39
Figure .III.7. Évolution des temps de prise des différentes pâtes(5).....	40
Figure .III.8. Variation des rapports E/L en fonction du dosage en perlite(43).	41
Figure .III.9. Temps de prise des pâtes à base de perlite(43).	41
Figure .III.10. Temps de début et de fin de prise des différents types de liants(17).....	42
Figure .III.11. Évolution des coefficients d'absorption capillaire des différents mortiers(43)....	43
Figure .III.12. Évolution des coefficients d'absorption capillaire des différents mortiers(44)....	43
Figure .III.13. Evolution de l'absorptivité des différents mortiers(17).	44
Figure .III.14. La conductivité thermique en fonction du temps des mortiers à l'air libre(15)..	44
Figure .III.15. Variation de la résistance thermique en fonction du temps à l'air libre (15).....	45
Figure .III.16. Variation de la conductivité thermique, résistance thermique en fonction des teneurs pouzzolaniques à l'air libre à 300 jours(15).	45
Figure .III.17. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers à base de perlite(15).....	46
Figure .III.18. Evolution des résistances à la compression (MPa) [43].....	46
Figure .III.19. Evolution des résistances à la compression (MPa)(44).....	47
Figure .III.20. Evolution de la résistance à la compression des différents mortiers(5).....	47
Figure .III.21. Variation des résistances des mortiers à la perlite en fonction du taux de substitution(5)	48
Figure .III.22. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des différents mortiers (17).....	48
Figure .III.23. Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des mortiers à base de perlite(15)	49
Figure .III.24. Evolution des résistances à la traction (MPa)(43).	50
Figure .III.25. Evolution des résistances à la traction (MPa)(44),	50
Figure .III.26. Evolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des différents mortiers. (17).	51

Partie II : PROGRAMME EXPERIMENTAL

CHAPITRE I : MATERIAUX UTILISES

Figure .I.1. La masse volumique apparente du ciment.	57
Figure .I.2. Masse volumique absolue du ciment CRS CEM I 42.5 R.	57
Figure .I.3. (a) Roche de la perlite naturelle avant broyage, (b) Poudre de la perlite naturelle après broyage(5).	58
Figure .I.4. Le diffractogramme aux rayons X de la perlite naturelle(5).	59

Figure .I.5. Le sable siliceux de la société Adwan.....	59
Figure .I.6. La masse volumique apparente du sable.....	60
Figure .I.6. La masse volumique absolue du sable.	60
Figure .I.7. Équivalent de sable visuel.	61
Figure .I.8. Équivalent de sable avec piston.	61
Figure .I.9. Courbe granulométrique du sable.	62

CHAPITRE II : LES METHODES EXPERIMENTALES SUR LES MORTIERS A BASE DE LA PERLITE

Figure .II.1. Essai de consistance et de prise avec appareil de Vicat.	67
Figure .II.2. Essai de prise avec appareil de Vicat.	67
Figure .II.3. Maniabilimètre.....	68
Figure .II.4. Procédure de l'essai de maniabilité.	69
Figure .II.5. Procédure de l'essai de maniabilité.	69
Figure .II.6. Les étapes du malaxage du mortier.....	70
Figure .II.7. Remplissage d'éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm ³	71
Figure .II.8. Les éprouvettes après démoulage et conservation.	71
Figure .II.9. Eprouvettes dans le récipient en position verticale avec un niveau d'eau constant 3mm.	72
Figure .II.10. La pesée des éprouvettes après 7 jours.	73
Figure .II.11. Conductivimètre au laboratoire LABMAT	74
Figure .II.12. Machine d'essais de résistance à la traction	76
Figure .II.13. Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.	77
Figure II.14. Essai de résistance à la flexion.....	77
Figure .II.15 : Dispositif de rupture en compression.....	78
Figure .II.16. Rupture en compression.....	78

Partie III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

CHAPITRE I : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT FRAIS

Figure .I.1. Variation des rapports E/L en fonction du dosage en perlite.....	81
Figure .I.2 : Temps de prise des pâtes à base de perlite.....	82
Figure .I.3. Temps d'écoulement en fonction du dosage en Perlite des mortiers.	84

CHAPITRE II : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT DURCI

Figure .II.1. Evolution des coefficients d'absorption capillaire des différents mortiers.....	86
Figure .II.2. Variation de la conductivité thermique en fonction du pourcentage de perlite à l'air libre et à 28 j.....	87
Figure .II.4. Variation de la diffusivité thermique en fonction du pourcentage de la perlite à l'air libre à 28 j.....	89
Figure .II.5. Variation de l'effusivité thermique en fonction du pourcentage de la perlite à l'air libre à 28 j.....	90
Figure .II.6. Variation de la résistance thermique en fonction du dosage de perlite.....	91

Figure .II.7. Variation de la conductivité thermique, résistance thermique en fonction des teneurs de perlite	91
Figure .II.8. Evolution des résistances à la traction en fonction du temps.....	92
Figure .II.9. Evolution des résistances à la compression en fonction du temps.	93
Figure .II.10. Evolution de la résistance des mortiers à base de perlite par rapport au mortier témoin	94

LISTES DES FORMULES

Partie I : RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE II : ETUDE DES CARACTERISTIQUES THERMO-PHYSIQUES DES MORTIERS A BASE DE PERLITE

(II.1)	la formule du flux de chaleur φ (phi) .	17
(II.2)	la formule de la résistance thermique d'un matériau	19
(II.3)	la formule de la résistance thermique totale d'une paroi homogène.	20
(II.4)	la formule de la chaleur spécifique d'un corps	21
(II.5)	la formule de la diffusivité thermique la formule:	21
(II.6)	la formule de l'effusivité thermique	21

Partie II : PROGRAMME EXPERIMENTAL

CHAPITRE II : LES METHODES EXPERIMENTALES SUR LES MORTIERS A BASE DE LA PERLITE

(II.1)	la formule d'absorption capillaire (C)	73
(II.2)	la formule de L'indice d'activité,	73
(II.3)	la formule de flux thermique Φ	75
(II.4)	la formule de la résistance thermique surfacique	75
(II.5)	la formule de la résistance thermique de la paroi 1 m ²	75
(II.6)	la formule de le moment de rupture en flexion	77
(II.7)	la formule de la contrainte de traction	77
(II.8)	la formule de la résistance à la flexion	77
(II.9)	la formule de la contrainte de rupture en compression.	78
(II.10)	la formule de la résistance à la compression	78

Liste des abréviations et symboles

ASTM	: American society for testing and materials
C-S-H	: Silicates de calcium hydratés
NaOH	: Hydroxyde de sodium
NaCl	: Chlorure de sodium
Na₂SO₄	: Sulfate de sodium
MgSO₄	: Sulfate de magnésium
C₃S	: Silicate tricalcique
C₂S	: Silicate bicalcique
C₃A	: Aluminate tricalcique
C₄AF	: Alumino-ferrite tétracalcique
CaO	: Chaux libre
MgO	: Oxyde de magnésium
CaCO₃	: Calcite
Ca (OH)₂, (CH)	: Hydroxyde de calcium (Portlandite)
CaSO₄.2H₂O	: Gypse
Mg (OH) 2	: Brucite
DRX	: Diffraction des rayons X
CEMI	: Pâte de ciment 42,5N son ajout
CEM II	: Pâte de ciment 42,5N son ajout
CRS	: ciments résistants aux sulfates
P10P	: Pâte de ciment avec 10% de perlite
P20P	: Pâte de ciment avec 20% de perlite
P30P	: Pâte de ciment avec 30% de perlite
M0	: Mortier son ajout
M10P	: : Mortier avec 10% de perlite
M20P	: Mortier avec 20% de perlite
M30P	: Mortier avec 30% de perlite
ATG/TD	: Analyse Thermo-Gravimétrique couplée avec l'Analyse Thermique Différentielle
MEB	: Microscope Electronique à Balayage
EDS	: Spectromètre de Dispersion d'Energie
<i>i (p)</i>	: Indice d'activité
<i>f_p(t)</i>	: Résistance à la compression du mortier contenant une fraction P
<i>f₀(t)</i>	: Résistance à la compression du mortier de référence

INTRODUCTION GENERALE

Dans l'industrie cimentaire, la recherche d'un liant moins coûteux et écologique en utilisant des ajouts industriels et des ressources naturelles est devenue une préoccupation majeure pour les technologues du domaine. Le ciment est un ingrédient crucial du mortier, néanmoins son processus particulièrement polluant est doublement émetteur de CO₂. D'une part, il recourt à des énergies fossiles pour faire fonctionner ses fourneaux. D'autre part, le chauffage du calcaire et de l'argile à très haute température pour créer le "clinker", liant de base du ciment, libère lui-même du CO₂ par réaction chimique.

Dans le cadre de la problématique de la réduction des gaz à effet de serre, les producteurs de ciment utilisent de plus en plus d'ajouts minéraux. Cette approche permet de diminuer le contenu en ciment et par conséquent les émissions totales de CO₂ associées à la fabrication du ciment et du béton. Dans ce contexte, il est important de mieux comprendre l'influence des ajouts minéraux sur le comportement des matériaux cimentaires.

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

L'Algérie est l'un des pays qui possède une quantité appréciable de matériaux pouzzolaniques d'origine volcanique, qui s'étend de façon sporadique le long de 160 km entre la frontière Algéro-Marocaine et le Sahel d'Oran. Leur utilisation dans la fabrication des ciments est limitée malgré la présence des matériaux pouzzolaniques en quantité massive. Notre pays possède un gisement important de perlite près de Hammam Boughrara (Tlemcen), il est très intéressant d'étudier cette roche comme une addition minérale.

De nombreux travaux de recherches précédents ont montré des améliorations sur le plan des caractéristiques mécaniques et thermiques des mortiers contenant cette addition. L'ensemble des résultats obtenus permettent ainsi de conclure que l'utilisation de la perlite améliore les performances des mortiers et conduit à l'obtention d'un nouveau matériau de construction économique et écologique.

De par, l'ensemble de ses propriétés, l'étude des mortiers à base de perlite est un domaine de recherche à fort potentiel de développement. Cependant, malgré l'intérêt croissant des chercheurs pour ce matériau (la perlite), les mortiers à base de perlite ne sont pas encore acceptés comme matériau de construction et leur utilisation reste encore limitée. Il présente des propriétés intéressantes à l'état frais et à l'état durci, il est par conséquent important pour un tel mortier qu'il soit employé dans l'industrie du bâtiment.

Notre objectif est d'étudier la possibilité d'utiliser la perlite comme substituant partiel au ciment dans le mortier, et évaluer son effet sur les résistances mécaniques et les propriétés thermiques.

Ce travail est présenté en trois parties : une partie bibliographique, une partie expérimentale et une partie pour les résultats.

La première partie relative à la synthèse bibliographique est subdivisée à son tour en trois chapitres concernant l'état de connaissance. A la fin de cette partie, nous avons évoqué la problématique et l'objectif de notre étude :

- **Le chapitre I** présente des informations sur la perlite de Hammam Bouhrara (Tlemcen). Ainsi que son origine et ces caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques, sa production dans le monde et précisément en Algérie, ainsi que son activité pouzzolanique confirmée par plusieurs chercheurs.
- **Le chapitre II** évoque l'étude des caractéristiques thermo-physiques des mortiers à base de perlite, présente les définitions, les notions de base ainsi que les modes de transferts thermiques (conduction, convection, rayonnement et changements de phase) et les différentes propriétés physico-thermiques des matériaux. De plus, il résume les recherches précédentes concernant les propriétés thermiques des mortiers à base de matériaux pouzzolaniques.
- **Le chapitre III** donne une synthèse des recherches sur les mortiers à base de perlite, il présente les différents résultats des essais à l'état frais et à l'état durci effectués par certains chercheurs. Il s'agit de l'essai de consistance, de prise, de maniabilité sur des compositions de mortiers avec perlite à l'état frais et des mesures d'absorption capillaire, des caractéristiques thermo-physiques et les essais mécaniques de traction compression à l'état durci.

La deuxième partie consacrée à l'étude expérimentale, est constituée de deux chapitres :

- **Le chapitre I** décrit les matériaux qui ont été utilisés durant notre étude et l'identification des caractéristiques physico-chimiques de chaque matériau (ciments, perlite, sable, adjuvant).
- **Le chapitre II** détaille les différents essais réalisés au cours de notre étude, ainsi que leurs modes opératoires (les essais sur mortier à l'état frais et durci).

La troisième partie renferme les résultats et leurs analyses répartis sur deux chapitres :

- **Le chapitre I** est consacré aux résultats des essais sur mortier frais (essai de consistance (début et fin de prise) et la maniabilité).
- **Le chapitre II** concerne l'analyse des résultats des études à l'état durci (l'absorption capillaire, étude thermique, et les essais mécaniques traction compression)

Enfin, cette étude sera clôturée par une conclusion générale et des perspectives de recherche futures.

PARTIE I

Recherche bibliographique

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA PERLITE

I.1. INTRODUCTION

L'industrie cimentaire à une importance primordiale pour l'Algérie comme tout pays en voie de développement. Comme la production du ciment est une grande consommatrice d'énergie, elle pose des problèmes écologiques (dégagement des gaz à effets de serre : CO₂, CO, NOX, ...etc.), l'utilisation des ajouts minéraux est une solution pour augmenter la production, réduire le prix de ciment et régler les problèmes d'environnement. L'Algérie est riche en gisements volcaniques, comme le gisement de pouzzolane naturelle de Béni Saf qui est employé comme ajout minéral actif dans les usines locales de fabrication du ciment. D'autres gisements des roches volcaniques vitreuses se trouvent au Nord-Ouest de l'Algérie, tel que la perlite de Hammam Boughrara qui doit subir un traitement qui ne demande pas beaucoup d'énergie avant son utilisation.

La perlite est une roche volcanique aluminosilicate, en raison de sa nature vitreuse et de sa composition chimique (70-75% SiO₂ et 12-18% Al₂O₃) (1) (2). Elle peut être utilisée comme ajout pouzzolanique (3) (1) (4) (5). Il est très intéressant d'étudier cette roche en tant que matière première pour l'utiliser comme ajout minéral actif.

Dans ce chapitre on va présenter un état de l'art sur la perlite. On s'intéressera seulement à l'effet de la perlite comme ajout pouzzolanique.

I.2. LA PERLITE NATURELLE

I.2.1. Définition

La perlite est une roche volcanique naturelle formée de lave siliceuse ou de cendre. En raison d'un refroidissement rapide, la lave ou les cendres se solidifient en une roche vitreuse. Pendant des dizaines de milliers d'années, les eaux de surface et souterraines emprisonnées dans la roche se retrouvent piégées dans une structure semblable à celle du verre. Lorsqu'elle est chauffée à haute température (750 à 1250°C), la perlite se dilate de quatre à vingt fois son volume d'origine sous l'effet de l'évaporation de l'eau (6). La pierre volcanique éclate comme du pop-corn, ce qui entraîne la formation d'innombrables petites bulles d'air. Cette porosité confère à la perlite des propriétés physiques remarquables telles qu'une faible conductivité thermique ainsi qu'une incroyable légèreté pour la perlite expansée.

Ces caractéristiques exceptionnelles sont recherchées pour de nombreuses applications dans le domaine de la filtration, de la cosmétique, de la construction et de l'horticulture.

Dans l'industrie de la construction, la perlite est un bon isolant thermo-acoustique pour les murs creux et un additif retardateur de flamme à faible densité très utile. Elle répond idéalement aux critères de légèreté recherchés actuellement pour les matériaux de construction et le béton.

I.2.2. Origine de la perlite

Les perlites sont issues de l'hydratation secondaire d'une obsidienne (roche magmatique effusive entièrement vitreuse) après son dépôt. La teneur en eau des perlites véritables varie de 2 à 5 %. L'eau y est sous forme libre (molécules H₂O) ou hydroxylée (ions OH⁻) (7).

La composition chimique globale d'une perlite est celle d'une rhyolite (roche magmatique effusive acide), avec une teneur en SiO₂, supérieure à 72 % et pouvant atteindre 75 %, une teneur en Al₂O₃, de 12 à 15%, et une teneur en K₂O d'environ 4 à 5% (7) (Tableau I.1). Cette composition chimique influence directement sur le taux d'hydratation de l'obsidienne originelle. Mais la composition chimique de certaines perlites peut également correspondre à un verre andésitique ou dacitique¹, ces dernières variétés ayant toutefois une importance commerciale négligeable.

Outre la phase vitreuse, la perlite peut renfermer des minéraux résiduels, tels des phénocristaux de quartz, de feldspath, de biotite et de hornblende, et des microcristaux de magnétite, d'ilménite et d'hématite : tous ces minéraux ne peuvent être expansés par chauffage. Certains faciès de perlite contiennent des reliquats d'obsidienne sous forme de petits corps arrondis de verre noir dénommés « marekanites ou larmes d'apache ».

D'une manière générale, Les obsidiennes² qui renferment naturellement moins de 2 % d'eau, s'expansent mal et à une température plus élevée que la perlite proprement dite. Il en est de même des pechsteins (rhyolites vitreuses brunâtres contenant environ 10 % d'eau).

Dans un gisement, après formation de la perlite, les pressions hydro et lithostatique conduisent progressivement au cours du temps à une dévitrification partielle puis totale du dépôt perlitique. Cette dévitrification se manifeste en particulier par la cristallisation de tridymite³, de quartz et de feldspath dans les lithophyses⁴ originelles de la coulée perlitique, et par la formation de sphérolites⁵ plus ou moins abondants et volumineux, jusqu'au stade d'un assemblage microcristallin de quartz et de feldspath.

Le gisement peut également subir une altération hydrothermale conduisant à la formation de minéraux argileux et de zéolites, en particulier de smectite et de clinoptilolite (8).

D'une manière générale, les minéraux issus de la dévitrification (quartz, tridymite et feldspath), les minéraux argileux et les zéolites sont considérés comme des matériaux stériles, car ils ne s'expansent pas.

¹ L'**andésite** est une roche volcanique, de composition intermédiaire et généralement de couleur grise. Appartenant à la série magmatique calco-alcaline, elle est caractéristique du volcanisme des zones de subduction (convergence).

² L'**obsidienne** est une roche volcanique vitreuse et riche en silice, de couleur grise, vert foncé, rouge ou noire elle est issue d'une lave acide.

³ **Tridymite** est l'une des silices cristallines elles sont pratiquement inexistantes à l'état naturel et très peu.

⁴ Les **lithophyses** sont une des formes de la silice. La silice se rencontre dans la nature d'une façon commune sous divers aspects, les lithophyses se rencontrent sous formes de géodes, extérieurement brunâtres, verdâtres, avec des formes sphériques.

⁵ Une **sphérolite** est une structure cristalline en forme de sphère ou éventail elle se forme par cristallisation lors du refroidissement de la roche fondue.

En raison de cette dévitrification progressive au cours du temps, les gisements de perlite de qualité commerciale sont généralement d'âge tertiaire ou début quaternaire et sont rarement plus anciens que l'Oligocène⁶. Des gisements d'âge crétacé⁷ sont toutefois exploités, notamment en Chine, mais les occurrences plus anciennes, trop dévitrifiées, ne présentent pas d'intérêt commercial. Les obsidiennes trop récentes n'ont également pas d'intérêt, car elles ne sont pas à un stade d'hydratation suffisamment avancé.

Le tableau I.1 donne les compositions chimiques des différentes perlites issues de plusieurs pays.

Tableau I.1. Compositions chimiques d'une sélection de perlites typiques commercialisées (7)

		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O ⁺
Grece	(Milos)	74.20	12.30	0.95	0.08	0.85	0.13	4	4.40	2.80
Turquie	(Biga)	73	13.80	0.70	0.20	0.70	0.25	3.25	4.50	3.70
Italie	(Monte, sparau, sardaigne)	72.80	13.80	2.10	0.30	0.90	0.40	3.30	5.60	Nd
Bulgarie	(schupenata)	73.80	12.8	0.56	0.07	0.50	0.03	3	4.90	4
Hongrie	(palhaza)	73.50	13	1.80	-	1.50	0.40	3.50	3.80	3
USA	No Agua (nouveaeau Mexxique)	72.10	13.50	0.80	0.06	0.89	0.50	4.60	4.40	372.
	Pioche (nevada)	73.10	12.80	0.70	0.08	0.90	0.20	3	4.70	3.90
	Fish Springs (californée)	75	13.20	0.70	n.d	0.50	trac	4.30	4.60	3.20
Argentine	Rio Negro	72.30	13.40	1	0.08	0.59	0.30	3.40	4.70	3.70
Arménie	Aragafs	73	12.40	0.70	0.05	0.40	0.10	4.50	4.90	3.50
Russie	Sibérie	72.80	14.15	0.17	n.d	0.82	-	2.50	4.35	?
Japon	Akita	74.20	12.90	0.68	0.06	0.45	0.05	4.10	4	3.30
chine	Xinyang (henan)	72	12.31	1.34	n.d	1	0.14	3.29	4.67	?

I.2.3. Caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques 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 (9).

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 (10).

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 (5).

⁶ L'Oligocène est une époque géologique.

⁷ Crétacé est une époque géologique.

I.2.3.1. Caractéristiques physiques de la perlite

Les plus importantes propriétés physiques de la perlite sont énumérées dans le tableau I.2

Tableau. I. 2. Propriétés physiques de la perlite brute (2).

Désignation	Propriété	Désignation	Propriété
Couleur	Grise, brune, noire, verte.	Dureté	5.5 à 7(échelle de Mohs)
Masse volumique absolue	2.3 à 2.8 g/cm ³	Point de fusion	1260-1343°C
Masse volumique apparente	1.2 à 2.35g/ cm ³	Température d'expansion	600 à 1100°C
Rapport d'expansion	10 à 20 (volume)	Rétention d'eau	35 à 50%
pH	6,5 à 8,0	Densité	2,2 à 2,4
Densité apparente	32-400 kg/m ³	Chaleur spécifique	387 J/kg K
Point de ramollissement	871-1093°C	Conductivité thermique (à 24 °C)	0,04 à 0,06 W/m·K

I.2.3.2. Caractéristiques chimiques de la perlite

La composition chimique typique de la perlite brute montrée dans le tableau I.3. Il apparaît une prédominance de la silice, élément déclencheur de la réaction pouzzolanique, suivie de l'alumine.

Tableau I.3. La composition chimique typique de la perlite brute (1)

Désignations	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	H ₂ O
Teneur (%)	71,0 à 75,0	12,5 à 16	2,9 à 4	4,0 à 5,0	0,2 à 0,5	0,5 à 1,45	0,03 à 0,5	3,05 à 5,16

I.2.3.3. L'activité pouzzolanique de la perlite

Depuis longtemps, l'activité pouzzolanique des ajouts a été associée à la phase vitreuse. Des procédés industriels ont même été mis en œuvre afin d'obtenir cette structure particulière (formation de métakaolin⁸ ou de laitiers métallurgiques vitrifiés⁹) (11). Les ajouts minéraux peuvent être constitués d'une structure amorphe¹⁰ ou cristallisée, en fonction du degré d'ordre

⁸ **Métakaolin** est une roche argileuse blanche constituée principalement de silicate d'alumine amorphes ayant des propriétés pouzzolaniques.

⁹ **Laitiers métallurgiques vitrifiés** il s'agit d'un mélange composé essentiellement de silicates, d'aluminates et de chaux avec divers oxydes métalliques.

¹⁰ Un matériau **amorphe** est une substance dans laquelle les atomes ne respectent aucun ordre à moyenne et grande distance ce qui distingue des composés cristallisés.

de leur arrangement atomique. La silice peut se présenter sous la forme vitreuse (verre siliceux, silica gel, fumée de silice) ou cristallisée (quartz, cristoballite) (12).

Il existe des méthodes pour estimer l'activité pouzzolanique des additions minérales, citons quelques-unes :

- L'indice d'activité Chapelle selon la norme [NF P18-513] : Cette méthode consiste à suivre la quantité d'hydroxyde de calcium fixée par la pouzzolane dans des conditions très précises en déterminant la quantité d'hydroxyde de calcium résiduelle après une conservation de 24 heures du matériau dans une solution contenue de chaux à 90°C. Cette détermination peut donner des indications utiles pour suivre la cinétique de fixation et la quantité d'hydroxyde de calcium « fixable » condition nécessaire à l'activité pouzzolanique.
- Test de Frattini selon la norme [NF EN196-5]. La pouzzolanité est appréciée en comparant la quantité d'hydroxyde de calcium (CH) présente dans la solution aqueuse au contact du ciment hydraté, après une période de temps déterminée, avec la quantité de CH pouvant saturer une solution de même alcalinité. L'essai est considéré comme positif si la concentration de CH en solution est inférieure à la concentration de saturation. L'expérience a montré qu'en opérant avec 20g de ciment pour 100mL d'eau à la température de 40°C, l'équilibre est atteint après une période de 8 jours ou 15 jours.
- Fixation d'hydroxyde de calcium pendant le durcissement (DRX ou ATG/TD). L'activité pouzzolanique est évaluée par la consommation de la chaux des pâtes. Le degré d'activité est évalué par des observations des pâtes par DRX à différentes échéances. La consommation de chaux est quantifiée par ATG/TD.

Ray et al. (13) Ont montré par analyse thermique différentielle ATD (Figure I.1) que la réactivité de la perlite est semblable aux deux ajouts étudiés : la fumée de silice et la cendre volante.

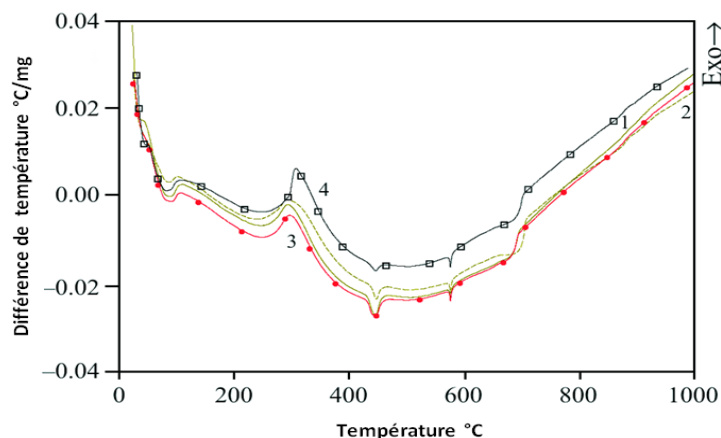


Figure I.1. ATD des mortiers à 7 jours 1-Témoin 2-Perlite 3- Cendre volante(13)

D'autres chercheurs (14) ont étudié l'influence de 5% de filler calcaire (mortier témoin), 5% de la perlite et 5% de cendre volante comme substitution en poids de ciment, par l'analyse DRX, ATG/TD et les photos MEB. Ils ont trouvé qu'à 28 jours, les hydrates dans les trois mortiers sont les mêmes (portlandite, CSH et ettringite), avec une diminution de la portlandite dans les mortiers à base de perlite et de la cendre volante par rapport au mortier de référence, cela est due à l'activité pouzzolanique de ces deux ajouts.

Hamadache (15) a testé l'activité pouzzolanique de la perlite et de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf selon la norme NF EN196-5. La perlite satisfait à l'essai de pouzzolanité, le point tracé se trouve au-dessous de la courbe de concentration de saturation d'ions calcium (Figure I-2).

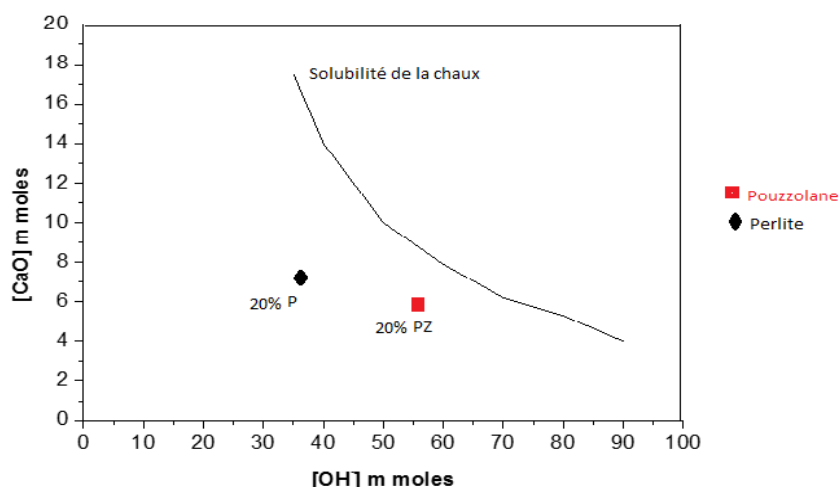


Figure I.2. Localisation des ajouts pouzzolaniques selon le graphe de Frattini [15]

Chihaoui (5) a testé l'activité pouzzolanique de la perlite par l'essai Chapelle. Le résultat obtenu concernant la consommation de la chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) par la perlite est 705 mg de $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ fixés par un gramme de perlite. En comparant le degré de consommation de la chaux par la perlite à ceux rapportés par Senhadji (16), on trouve qu'il est supérieur à celui de la pouzzolane naturelle (580 mg/g), comparable à celui du métakaolin (700 mg/g) et inférieur à celui de la fumée de silice (980 mg/g).

La perlite répond aux exigences de la norme [ASTM C618] et elle peut être considérée comme ajout pouzzolanique (Tableau I.4)

Tableau I.4. Conformité de la perlite selon la norme ASTM C618(17)

Propriétés	[Chihaoui, 2018]	[Erdem T. K. et al, 2007]	ASTM C 618
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	88,65	87,52	Min. 70,0
SO_3 (%)	0,01	0,04	Max. 4,0
Perte au feu (%)	4,20	4,22	Max. 10,0
Refus 45 μm (%)	14	31	Max. 34
Indice d'activité			
7-jours (%)	/	80,3	Min. 75
28-jours (%)	86	81,9	Min. 75
Demande en eau (%)	105	103	Max. 115

I.2.4. Réserves, production et consommation de la perlite dans le monde

Les réserves de la perlite sont généralement situées dans les régions volcaniques du début tertiaire ou quaternaire. Des informations détaillées sur les réserves et la production de la perlite sont résumées dans le tableau I.5.

Tableau I.5. Réserves et productions mondiales de la perlite (mille tonne) [USGC, 2018]

Pays	Production			Réserve Totale
	2015	2016	2017	
Etats-Unis	459	513	520	50 000
Chine	1800	1800	1800	EI
Grèce	1000	1490	1550	120 000
Bulgarie	40	30	50	28 000
Iran	60	60	60	EI
Mexico	26	28	40	EI
Turquie	925	950	1000	57 000
Autres	70	115	120	EI
Total	4380	5000	5100	EI

EI : Estimation indisponible

Les principaux producteurs de perlite dans l'ordre décroissant en 2016, sont la Chine, la Grèce, la Turquie et les Etats-Unis avec 35%, 30%, 20% et 10% de la production mondiale respectivement. Bien que la Chine soit le principal producteur, la majeure partie de sa production de perlite était consommée intérieurement. La Grèce et la Turquie sont restées les principaux exportateurs de perlite [USGC, 2018].

I.2.5. La perlite en Algérie

La perlite existe dans les roches volcaniques et sédimentaires au Nord-Ouest de Tlemcen près de Hammam Boughrara (Maghnia) (Figure I.3). Les gisements sont localisés près des routes et peuvent apparemment être exploités à ciel ouvert (Tableau 1.6) [LSUNMA, 1999].



Figure I.3. Gisement Bab à Hammam Boughrara (Tlemcen) (17)

Tableau I.6. Les principaux gisements de la perlite en Algérie (18)

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

I.2.5.1. Volcanisme de la région de Hammam Bouhrara

Les formations volcaniques de la région sont représentées par des rhyolites et des basaltes. Sadran (19) distingue dans cette région quatre pitons rhyolitiques indépendants qui coupent les sédiments du miocène synchro-nappe. Ces pitons sont les suivants :

Ain Torba, Hammam Bouhrara, Oued el Maleha, Bled el Rekiza. Ils sont souvent associés à des argiles smectiques (dépôts pyroclastiques) et à des matériaux rhyolitiques remaniés.

Parmi les 4 pitons ceux d'Ain Torba et de Hammam Bouhrara sont les plus importants par leur taille avec un volume d'environ 1km³(61). Ils apparaissent sous forme de massifs érodés assez bien développés et bien visibles dans le paysage et sur les cartes géologiques (figure I.4). Le piton d'Ain Torba est associé au gisement de bentonite exploitée dans la région (carrière roussel).

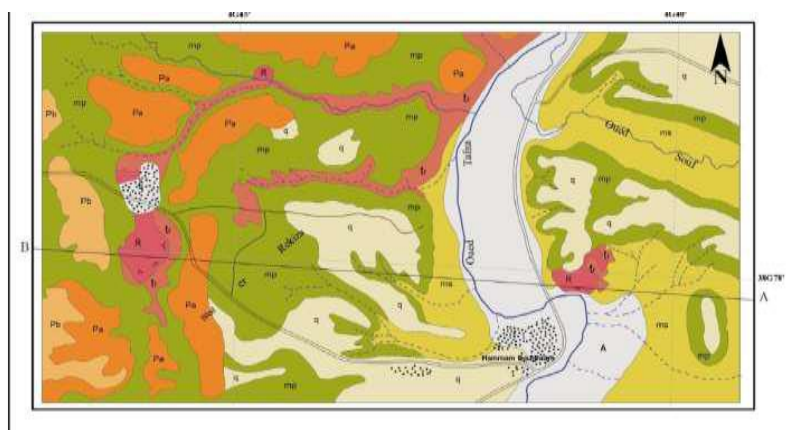


Figure I.4. Localisation du gisement de Hammem Bouhrara (TLEMCCEN)(17)

Cette perlite est extraite sous forme de roches de diamètres variant de 20 à 50 cm, de couleur grise, à l'aspect d'un verre avec des reflets argentés, elle réfléchit la lumière suivant certains plans internes et elle se fragmente en petites sphères ou perles d'où vient son nom « perlite » (Figure I.5.a).

Elle est concassée (Figure I.5.b) puis étuvée pendant 24 heures à une température de 80°C afin d'éliminer toute éventuelle humidité, ensuite broyée et tamisée à travers un tamis de 80 µm (Figure I.5.c). Le passant sera utilisé en substitution du ciment Portland.



Figure I.5. Perlite naturelle (a), concassée (b), broyée (c)(17)

La composition minéralogique de perlite, obtenue par un diffractomètre à Rayon X (DRX) effectuée au laboratoire de la cimenterie de Lafarge-Holcim, a donné les résultats illustrés dans la figure I.6.

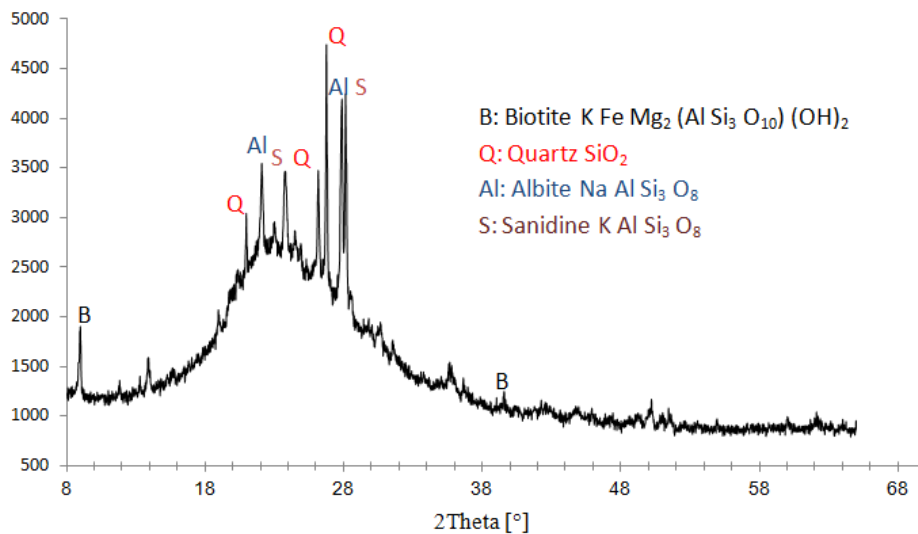


Figure I.6. L'analyse aux rayons X de la perlite(17)

L'analyse aux rayons X de perlite présente une remarquable bosse qui signifie une importante teneur en silice amorphe et des pics qui caractérisent la phase cristalline tel que la biotite le quartz, l'albite et le sanidine.

La superposition des trois DRX de la perlite, PZ¹¹ et FS¹² est illustrée dans la figure I.7. D'après Cyr (12), la diminution de l'intensité des pics dans le DRX indique l'augmentation du degré de désordre dans un matériau (phase amorphe). Nous observons que l'intensité des pics du DRX de perlite est moins importante que l'intensité des pics de DRX du PZ. Aussi, le DRX de perlite

¹¹ PZ : pouzzolane

¹² FS : la fume de silice

présente une remarquable bosse par rapport à ce du PZ. L'absence de la phase cristalline pour la FS est la présence d'une remarquable bosse, indiquant que la FS est un matériau totalement vitreux. D'après la superposition des DRX, nous pouvons classer la teneur en verre de la perlite (PR) entre la PZ et la FS.

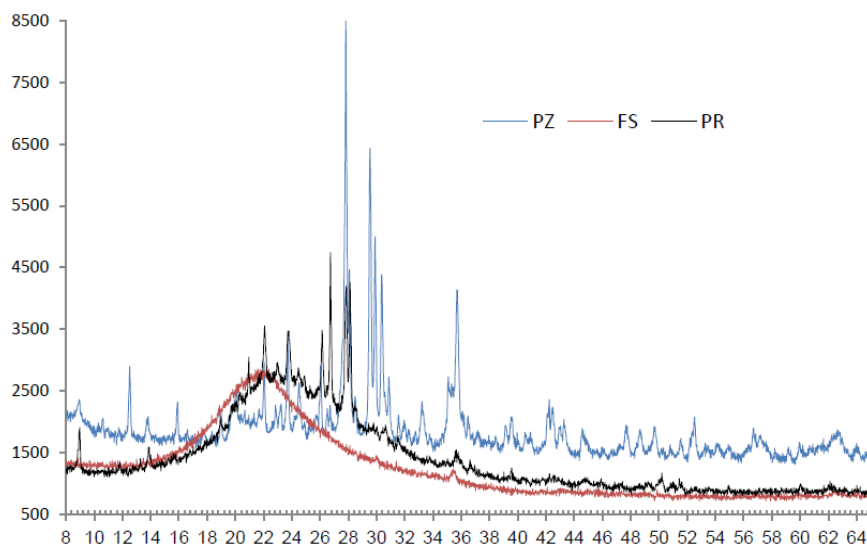


Figure I.7. Superposition des DRX de la perlite, pouzzolane et fumée de silice (17)

I.2.5.2. La composition chimique de la perlite broyée

La composition chimique de la perlite, est obtenue par la méthode de fluorescence X en utilisant le spectromètre de fluorescence X du laboratoire de la cimenterie de Lafarge-Holcim (Tableau I.7).

Tableau I.7. Composition chimique élémentaire de la perlite de Hammam Boughrara (%) (17)

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Cl	PAF
0.14	72.01	15.70	1.81	0.01	4.10	1.70	0.20	0.014	3.99

La qualité d'une pouzzolane est liée à sa teneur en verre. Les teneurs en silice et en chaux sont les deux éléments qui influent sur le résultat de la teneur en verre. Un critère chimique simple est proposé par la littérature (20) pour la sélection des pouzzolanes sur la base de leur teneur en phase vitreuse : il s'agit de la différence entre les teneurs brutes en silice et en chaux ($SiO_2 - CaO$), facile à déterminer par les méthodes chimiques courantes. Lorsque cette différence est inférieure à une valeur seuil, voisine de 34 %, les pouzzolanes ne comportent pas de phase vitreuse. Les pouzzolanes les plus acides, c'est-à-dire contenant une teneur importante en silice et peu de chaux, sont en général les plus vitreuses.

L'analyse chimique a montré que la perlite contient 72,01 % de silice et environ 0,14 % de chaux (Tableau II.4). Nous pouvons donc affirmer que cette perlite contient une grande phase vitreuse, la différence entre la silice et la chaux est de 71,87 %, nettement supérieure à 34 %. Selon la norme ASTM C 618, cette perlite peut être considérée comme ajout pouzzolanique de classe N (Tableau I.8).

Tableau.I.8. Conformité de PR selon la norme ASTM C618.(17)

Propriétés	Perlite	ASTM C 618
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	89.52	Min. 70,0
SO ₃ (%)	0.01	Max. 4,0
Perte au feu (%)	3.99	Max. 10,0
Refus 45 µm (%)	19.2	Max. 34
Indice d'activité		
7-jours (%)	78	Min. 75
28-jours (%)	80	Min. 75
Demande en eau (%)	104.7	Max. 115

Les caractéristiques physiques de la perlite utilisée déterminées au laboratoire de la cimenterie de Lafarge-Holcim sont regroupées dans le tableau I.9, montre le résultat d'analyse granulométrique par laser de la perlite.

Tableau I.9. Caractéristiques physiques de perlite(17)

Désignation	PR	Appareillages et normes
Surface spécifique de Blaine (cm²/g)	4180	Perméabilimètre de Blaine, Norme NF EN 196-6
Masse volumique Absolue (g/cm³)	2,43	Densimètre à l'hélium
Refus 45 µm (%)	19,2	Norme NF EN 196-6

La photo MEB et l'analyse EDS de perlite brute sont effectuées au laboratoire LMESM de l'USTO/MB et celles de PR broyé au laboratoire LSTGP de l'USTO/MB.

La photo MEB de perlite brute illustrée dans la figure I.9 indique que cette perlite à une porosité élevée, et l'analyse EDS confirme la teneur importante en silice et en alumine par rapport aux autres oxydes. Après broyage de perlite, les grains prennent une forme angulaire (Figure I.8).

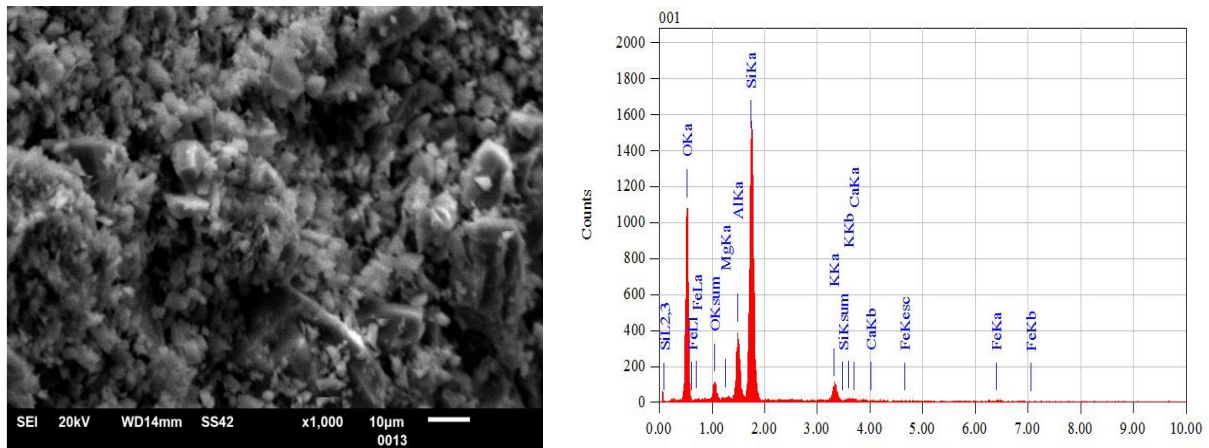


Figure I.8. Photo MEB et EDS de perlite brute (17)

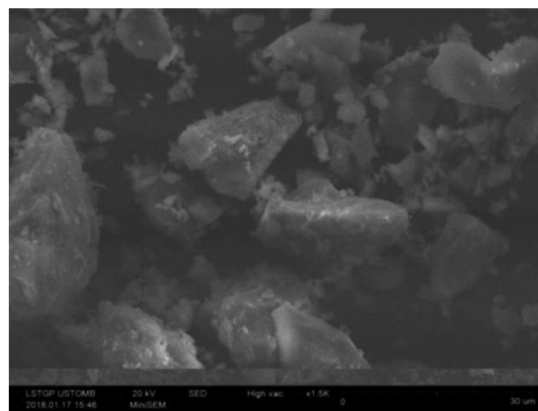


Figure I.9. Photo MEB de perlite broyée (17)

I.2.6. Traitement et méthodes d'exploitation

L'exploitation à ciel ouvert est la seule méthode d'extraction économique. La plupart des exploitations de perlite utilisent soit le ripage, soit l'explosif, ou une combinaison des deux procédés. Quand le minerai perlitique est suffisamment tendre et friable, l'utilisation d'un ripeur est la plus économique. En revanche, lorsque le minerai est résistant, la création de gradins et l'utilisation d'explosifs sont nécessaires. Dans ce cas, il faut veiller à ce que la fragmentation du massif ne produise pas trop de fines ou, à l'inverse, de blocs de grandes dimensions.

Le minerai est ensuite chargé sur des camions ou, lorsque la forme du plancher de la carrière le permet, il peut être directement récupéré par un scraper, puis transporté jusqu'à l'installation de broyage de l'usine de traitement. Une extraction sélective est couramment effectuée lorsque la qualité du minerai est variable ou les substances contaminants (argile, obsidienne) sont abondantes. Dans certains cas, lorsque le gisement renferme des minerais perlitiques de textures variables, ces derniers peuvent être mélangés pour produire un minerai composite présentant des caractéristiques de broyage constantes et, en définitive, des propriétés régulières pour les utilisateurs.

I.3. CONCLUSION

Ce chapitre regroupe des informations sur la perlite de Hammam Boughrara (Tlemcen). Il nous a permis de découvrir l'origine de la perlite et ces caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques, sa production dans le monde et précisément en Algérie, ainsi que son activité pouzzolanique confirmée par plusieurs chercheurs.

Les travaux de recherche sur l'activité pouzzolanique de la perlite montrent clairement que ce matériau est très réactif avec le ciment par conséquent il est possible de l'utiliser comme substitution partielle au ciment et le considérer comme composant des matériaux cimentaires.

CHAPITRE II : ETUDE DES CARACTERISTIQUES THERMO-PHYSIQUES DES MORTIERS A BASE DE PERLITE

II.1. INTRODUCTION

Le rôle premier d'un bâtiment est d'assurer à ses occupants un climat intérieur agréable et peu dépendant des conditions extérieures, notamment météorologiques et acoustiques. Nombreux matériaux isolants existants permettent une bonne isolation quel que soit le matériau des murs de départ, en neuf comme en rénovation. Les plus utilisés sont la laine de verre, la laine de roche, le béton cellulaire, le polystyrène, le polyuréthane...

D'autres matériaux, biosourcés¹³ ou recyclés viennent s'ajouter : chanvre, liège expansé, fibres textiles..., il est possible de les combiner ou de les varier dans la maison pour obtenir une isolation optimale et faire d'importantes économies d'énergie.

La perlite s'inscrit dans la catégorie des isolants minéraux. Elle provient en effet de silices volcaniques qui ont été récoltées, broyées puis chauffées à très haute température afin d'extraire toute trace d'humidité. La perlite doit son nom à son apparence de petits grains qui forment des perles. Elle peut tout autant être utilisée comme isolant thermique que phonique. Sa conductivité thermique (λ) oscille en effet entre 0,065 et 0,095 W/m.K (21).

Ce chapitre présente les définitions, les notions de base ainsi que les modes de transferts thermiques (conduction, convection, rayonnement et changements de phase) et les différentes propriétés physico-thermiques des matériaux (conductivité thermique, résistance thermique, diffusivité thermique, chaleur massique). De plus, il résume les recherches précédentes concernant les propriétés thermiques des mortiers à base de matériaux pouzzolaniques.

II.2. NOTION DE BASE SUR LA THERMIQUE

II.2.1. Le confort thermique

Le confort thermique pourrait se définir comme un sentiment de bien-être vis-à-vis d'un environnement thermique.

À la maison, le confort thermique est généralement atteint en dépit des températures extérieures défavorables. Il s'agit donc d'avoir suffisamment chaud en hiver et d'être suffisamment au frais en été, malgré le climat extérieur. Et pour parvenir au confort thermique sois avec le renouvelant d'installation ou par la domotique, et par des travaux d'isolation (22).

¹³Les matériaux **biosourcés** sont issus de la matière organique renouvelable, d'origine végétale ou animale. Ils peuvent être utilisés comme matière première dans des produits de construction et de décoration, de mobilier fixe et comme matériau de construction dans un bâtiment.

II.2.2. Parvenir au confort thermique avec des travaux d'isolation

Si l'objectif est de limiter les déperditions de chaleur, alors des travaux d'isolation de la toiture, des sols et des murs sont recommandés car les pertes de chaleur pourraient atteindre 5 à 30%, et générer des courants d'air et des variations désagréables de température.

Par ailleurs, afin d'améliorer le renouvellement de l'air dans une habitation et de lutter contre l'humidité par condensation, l'idéal est d'envisager des travaux de ventilation (22).

II.2.3. Différence entre chaleur et température

Il est très courant de confondre la chaleur et la température, et bien que ces notions soient liées, elles sont à distinguer.

La chaleur correspond au transfert de l'énergie d'un corps à un autre. Par contre La température est l'agitation de l'atome. C'est sa vitesse d'agitation au sein de la structure solide ou liquide qui la contient, ou bien sa vitesse de déplacement dans un gaz (Figure II.1).

L'énergie thermique contenue dans un corps, et la chaleur produite dépend de la constitution de ce corps (eau, bois, roche...), de sa taille (un plus gros objet chauffera plus longtemps qu'un petit), et sa température (22).

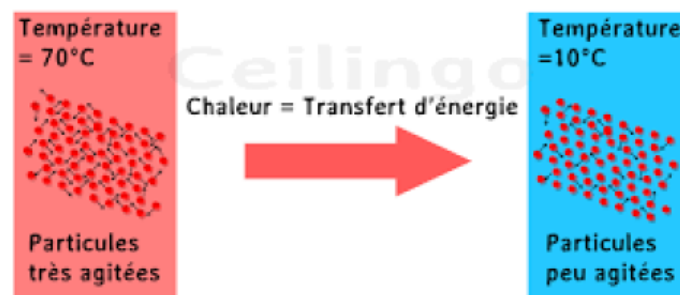


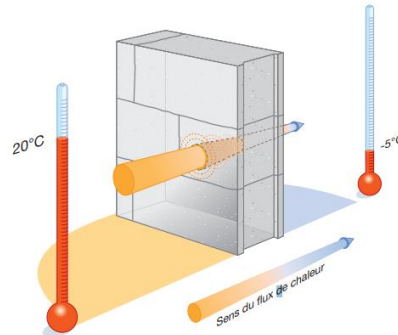
Figure II.1. La différence entre la température et la chaleur (22)

II.3. NOTION DE TRANSFERTS THERMIQUES

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 appelé transfert thermique. Le but de l'isolation est donc de le freiner fortement. Dans le domaine du bâtiment, les échanges de chaleur se font principalement selon trois modes de transmission : la conduction (majoritaire), la convection et le rayonnement.

II.3.1. La conduction

C'est 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, qui consiste en la propagation de la chaleur par diffusion des particules chaudes vers les particules froides (22) (Figure II.2).

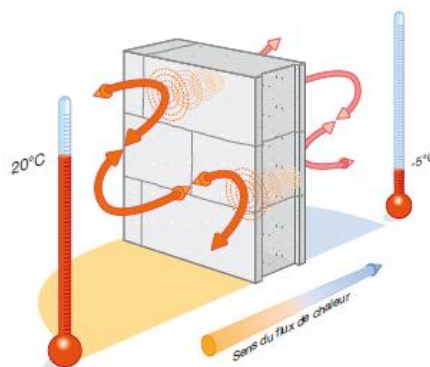


Plus le matériau est isolant moins il y a de conduction.

Figure II.2. La conduction (64)

II.3.2. La convection

Ce mécanisme de transfert de chaleur est propre aux fluides (gaz ou liquide). Intervient quand un fluide circule autour d'un corps solide (22), 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 du quel il perd sa chaleur créant ainsi un mouvement vertical qui accélère les échanges thermiques entre les deux éléments (Figure II.3).

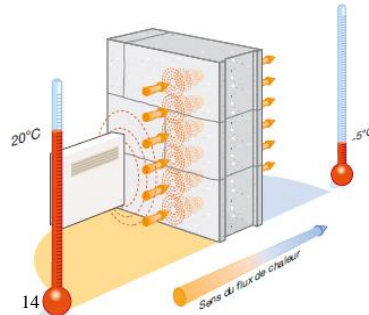


Plus l'air est immobile moins il y a de convection.

Figure II.3. La convection (64)

II.3.3. Le 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 II.4).



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

Figure II.4. Le rayonnement. (64)

Les trois modes peuvent intervenir en même temps (Figure II.5).

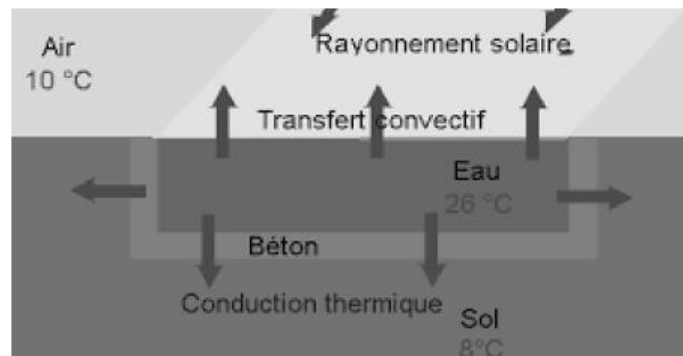


Figure II.5. Les trois modes de transfert (22).

II.3.4. La fuite de la chaleur – le flux thermique : φ

Le flux de chaleur φ (phi) est la quantité d'énergie ou de chaleur passant au travers de $1m^2$ de paroi pendant une seconde lorsqu'il existe un écart de température entre ses deux faces (Figure II.6). Il s'exprime en W/m^2 (Formule II. 1).

$$\varphi = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{e} \tag{II.1}$$

Avec

λ : La conductivité thermique.

ΔT : L'écart de température.

¹⁴ L'émissivité est la capacité d'un corps ou d'une surface à absorber et à mettre l'énergie rayonnée, plus l'émissivité est faible (proche de 0), plus cela signifie que les matériaux est isolant.

e : l'épaisseur de la paroi.

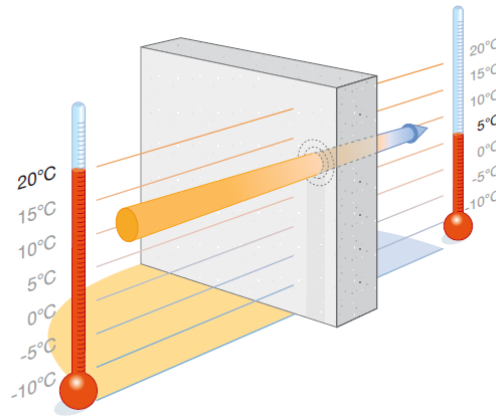


Figure II.6. Le flux thermique (64)

La quantité de chaleur s'échappant d'une paroi simple diminue : lorsque la conductivité thermique décroît, lorsque l'écart de température entre les deux 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.

II.4. Les caractéristiques thermo-physiques

II.4.1. La conductivité thermique λ

La conductivité thermique est le flux de chaleur qui traverse une surface unité pour un matériau soumis à un gradient de température égal à l'unité (22). (Figure II.7), pour une différence de 1 degré de température. Elle s'exprime en $W/(m.K)$. Elle représente l'aptitude du matériau à se laisser traverser par la chaleur. C'est une caractéristique constante intrinsèque aux matériaux homogènes. Dans une même famille d'isolants on peut trouver des produits avec des performances variables (exemples : pour les laines minérales ou le polystyrène expansé la conductivité thermique λ varie de 0,04 à 0,03 $W/(m.K)$). Plus la conductivité est faible plus un matériau est isolant.

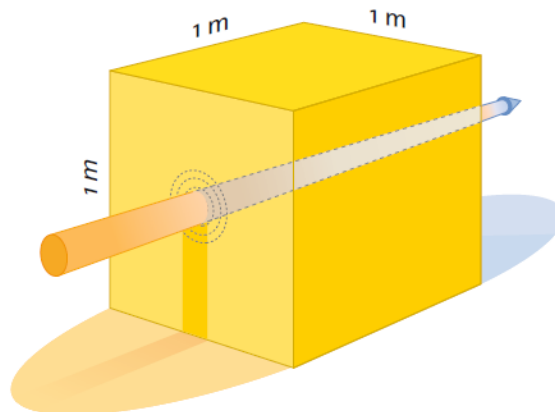


Figure II.7. La conductivité thermique (64).

La figure II.8 illustre la différence de conductivité thermique de quelques matériaux usuels.

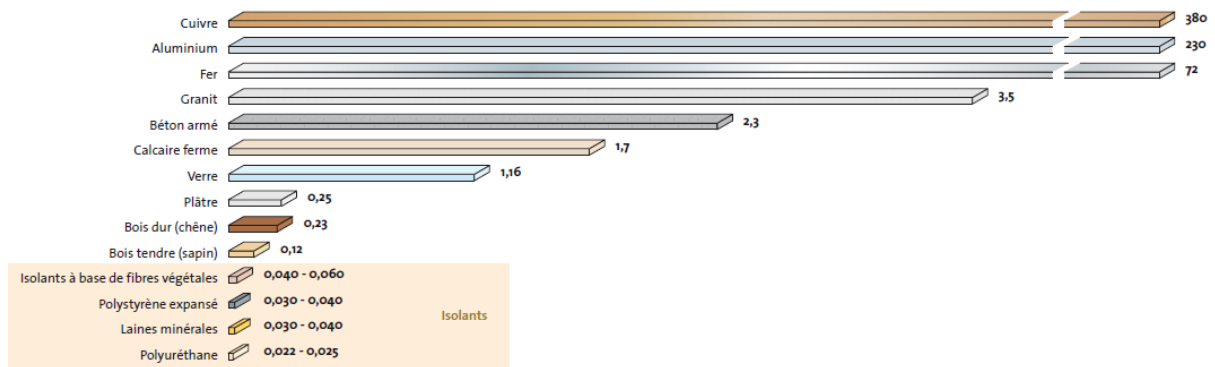


Figure II.8. Conductivités thermiques de quelques matériaux. (64)

II.4.2. La résistance thermique d'un matériau R

La résistance thermique d'un matériau caractérise sa capacité à ralentir le transfert de chaleur par conduction (Figure II.9). Elle s'exprime en $m^2 \cdot K/W$, elle est calculée avec la formule II. 2

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (II.2)$$

Avec

R : résistance thermique en $m^2 \cdot K /W$.

e : épaisseur du matériau en mètre.

λ : conductivité thermique du matériau en $W/(m.K)$.

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

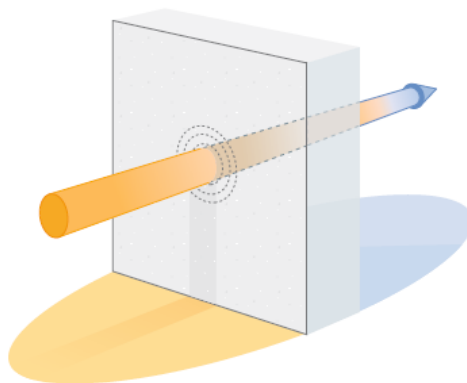


Figure II.9. La résistance thermique d'un matériau (64)

II.4.3. La résistance superficielle d'une paroi : R_{se} et R_{si}

La résistance superficielle d'une paroi caractérise la part des échanges thermiques qui se réalise à la surface des parois par convection et rayonnement. Elle dépend du sens du flux de chaleur et de l'orientation de la paroi ; R_{si} pour les échanges sur la surface de paroi interne et R_{se} pour les échanges sur la surface de paroi externe (Figure II.10). Elle s'exprime en $m^2.K/W$.

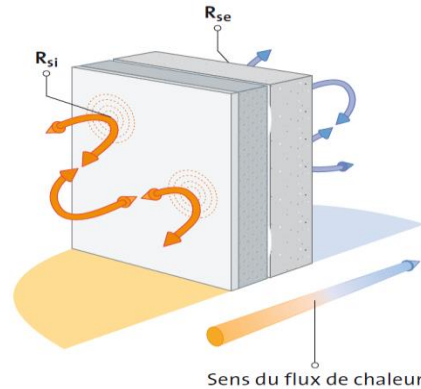


Figure II.10. La résistance superficielle d'une paroi (64)

II.4.4. La résistance thermique d'une paroi homogène¹⁵ R_{paroi}

La résistance thermique totale d'une paroi homogène caractérise la somme des transferts de chaleur réalisés par conduction au sein des matériaux et des échanges thermiques superficiels réalisés par convection et rayonnement (Figure II.11). Elle se calcule en additionnant les résistances thermiques des différents constituants de la paroi et les résistances superficielles correspondantes et s'exprime en $m^2. K /W$ (Formule II. 3).

$$R_{paroi} = \sum R + R_{si} + R_{se} \tag{II.3}$$

Plus la résistance thermique de la paroi est élevée plus la paroi est isolante.

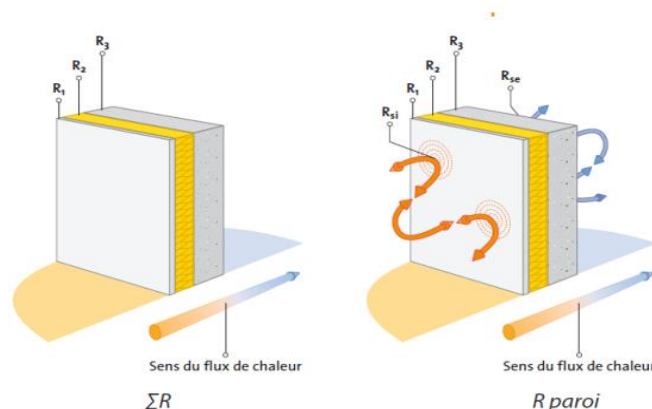


Figure II.11. La résistance thermique d'une paroi homogène (64)

¹⁵On appelle une paroi homogène toute paroi dont les interfaces sont continuées (sans lame d'air ventilée) et ne sont traversées par aucun accessoire, appui ou ossature métallique.

II.4.5. La chaleur spécifique (chaleur massique)

La chaleur spécifique d'un corps est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1K la température de l'unité de masse de ce corps La chaleur massique s'exprime en $J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$ ou $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ (Formule II. 4) (22).

$$C = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (II.4)$$

D'où

Q : la quantité de chaleur

m : masse du produit en kg

ΔT : Élévation ou diminution de la température du produit en °C.

II.4.6. Diffusivité thermique

La diffusivité thermique est définie comme la vitesse à laquelle un matériau répond à un changement de température (23). La diffusivité thermique notée 'a' est exprimé en m^2/s est définie par la formule II. 5:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C} \quad (II.5)$$

Avec

λ : la conductivité thermique.

C : la capacité calorifique à pression constante.

ρ : la masse volumique.

Pour un matériau avec une diffusivité thermique élevée, la propagation de la chaleur est plus rapide.

II.4.7. L'effusivité thermique

Sa valeur permet de quantifier l'aptitude d'un matériau à changer de température (plus ou moins rapidement) lorsqu'il reçoit un apport d'énergie thermique distribué de manière non uniforme (par exemple pour un cube, contact par une seule de ses faces à un autre corps à une température plus élevée). Deux phénomènes se conjuguent alors simultanément : l'énergie est absorbée localement en fonction de la capacité thermique (C) du matériau et cette énergie est transférée aux régions voisines en fonction de la conductivité thermique (λ) du matériau. Cette grandeur était appelée autre fois coefficient d'arrachement thermique. La mesure se fait par des méthodes d'apport d'énergie par contact ou sans contact (énergie d'un rayonnement), la Formule II. 6 Elle s'exprime en $J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot s^{-1/2}$.

$$E = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C} \quad (II.6)$$

Plus la valeur d'effusivité est élevée, le matériau absorbe rapidement beaucoup d'énergie sans se réchauffer notablement en surface (métal, pierre, faïence...). A l'inverse une valeur d'effusivité faible indique que le matériau se réchauffe rapidement en surface en absorbant peu de chaleur (isolant, bois...).

II.5. METHODES DE MESURE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE

Degiovanni (24) propose une classification des méthodes de mesure de conductivité thermique suivant le régime de mesure. On distingue donc les méthodes de mesure en régime stationnaire et celles en régime transitoire. Dans les premières, le facteur temps n'intervient pas et elles permettent de mesurer la conductivité thermique uniquement. En revanche, pour la seconde famille, ces techniques permettent également d'identifier de manière simultanée la diffusivité thermique de l'échantillon, et de remonter ainsi aux autres propriétés caractérisant le transfert conductif en régime transitoire (capacité thermique ou effusivité thermique). Nous donnons dans ce qui suit une brève description de quelques méthodes appartenant à chacune des deux familles. Chacune présente son lot d'avantages et d'inconvénients.

II.5.1. Mesures en régime stationnaire

Ces méthodes reposent sur l'établissement d'un flux unidirectionnel en régime permanent et permettent de mesurer la résistance thermique d'un échantillon ; permettant ainsi de remonter à sa conductivité thermique, les éprouvettes étant prismatiques. Le modèle et la méthode d'identification sur lesquels reposent ces méthodes sont élémentaires dans la mesure où il s'agit d'écrire une relation de proportionnalité entre la densité de flux et la différence de température aux bornes de l'éprouvette (25). Nous citons ici la méthode de la plaque chaude gardée, dite méthode de mesure absolue, et la méthode fluxmétrique, dite relative. Ces deux techniques sont régies par les normes françaises [NF EN 12664] et [NF EN 12 667].

II.5.1.1. Méthode de la plaque chaude gardée

Il s'agit d'imposer à un échantillon plan un flux de chaleur unidimensionnel de telle manière à ce qu'il soit considéré comme une plaque de largeur infinie délimitée par deux plans parallèles, tout en mesurant la différence de température aux bornes de l'éprouvette (26). Dans le cas de la plaque chaude gardée, le flux est obtenu directement en mesurant la puissance dégagée dans l'enroulement principal des plaques chauffantes (Figure II.12).

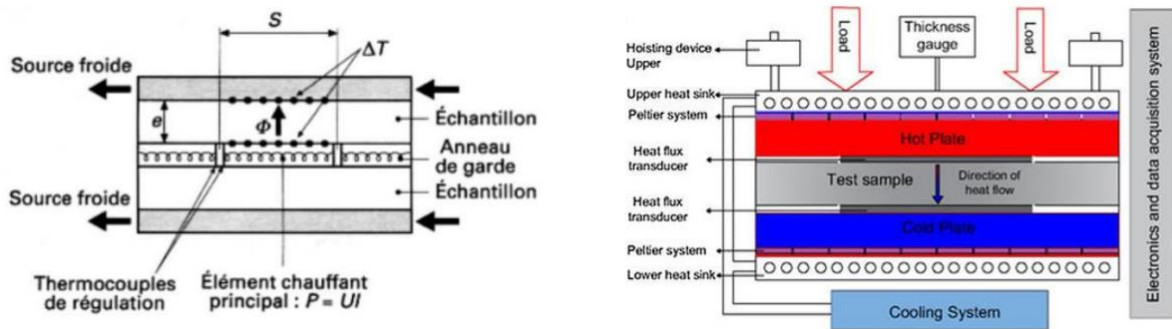


Figure II.12. Dispositif de plaque chaude gardée à deux éprouvettes (gauche) et fluxmètre à une éprouvette (droite). (48)

II.5.1.2. Méthode fluxmétrique

Pour la méthode fluxmétrique, le principe de fonctionnement est le même que celui d'un fluxmètre thermique à gradient : la thermopile délivre une force électromotrice proportionnelle à la différence de température aux bornes de l'éprouvette (Figure II.12). La densité de flux est donc obtenue indirectement par une constante d'étalonnage ; celle-ci est déterminée sur un matériau étalon de référence dont la résistance thermique a été préalablement déterminée par la méthode de la plaque chaude gardée.

II.5.1.3. Comparaison entre les deux méthodes

Ces méthodes sont parfois onéreuses en temps de mesure. En effet, les temps nécessaires pour établir un régime permanent au sein de l'éprouvette ainsi qu'un flux unidirectionnel peuvent parfois être longs (de l'ordre de quelques heures). A ceci nous pouvons également ajouter certaines limitations par rapport à la différence de température imposée aux bornes de l'éprouvette ainsi qu'à l'épaisseur de celle-ci. Il est parfois difficile de mesurer de faibles écarts de température même si ceux-ci impliquent des dissipations de puissance électrique plus faibles. En général, une différence de 20 K est établie pour des matériaux isolants, et l'on descend jusqu'à 10 K ou 5 K pour des matériaux relativement conducteurs tels que le béton (25). L'épaisseur de l'échantillon à tester est bornée afin de pouvoir limiter les déperditions thermiques latérales et de garantir une résistance thermique minimale.

Néanmoins, lorsque les contraintes relatives à la géométrie sont bien maîtrisées, ces méthodes offrent l'avantage de pouvoir garantir un degré d'incertitude de mesure et une répétabilité très intéressante qui ne peuvent être obtenus que sur des éprouvettes de grandes dimensions et par une analyse en régime stationnaire. La plaque chaude gardée offre la meilleure incertitude de mesure ; environ $\pm 2 \%$ pour des températures proches de l'ambiante et $\pm 5 \%$ pour des températures plus hautes ou plus basses. L'incertitude de la méthode fluxmétrique est, en revanche, au mieux égale à celle de la plaque chaude gardée utilisée pour la définition des étalons. En contrepartie, on lui retrouve une excellente répétabilité ; meilleure que $\pm 1 \%$ pour des températures ambiantes. Cette qualité est très appréciée lors des contrôles de qualité industriels, où la meilleure répétabilité possible est recherchée pour détecter les écarts éventuels.(48)

II.5.2. Mesures en régime transitoire

Les méthodes en régime variable consistent à appliquer une perturbation thermique sur un échantillon à l'équilibre et à mesurer une sortie de type thermique en fonction du temps. Ces méthodes diffèrent entre elles par rapport au type de perturbation choisi, au choix de la sortie de mesure (une ou plusieurs températures, ou flux thermique) ainsi que la géométrie du problème (24).

Les méthodes en régime transitoire sont peu coûteuses en temps de mesure et permettent de déterminer simultanément deux propriétés thermiques du matériau. Il reste toutefois que l'interprétation des résultats obtenus pour des matériaux hétérogènes peut être délicate étant donné que l'incertitude des mesures est difficilement inférieure à 10 %.

Parmi les techniques les plus communément utilisées, on peut citer la méthode flash, hot disk-source plane transitoire ou encore celle du fil chaud

II.5.2.1. La méthode flash

La méthode flash (Figure II.13), parfois appelée flash face arrière, a été initialement proposée par Parker et al en 1961 (27) puis reprise et améliorée par Degiovanni (24). Elle consiste à imposer un flux impulsionnel à un échantillon cylindrique plan et à mesurer l'élévation de la température en fonction du temps sur sa face arrière. Cette réponse est dénommée le thermogramme de l'échantillon, qui permet de remonter aux propriétés thermiques du matériau par analyse inverse en utilisant un modèle théorique adapté (28). Les principales limitations de la méthode sont atteintes lorsque les transferts convecto-radiatifs deviennent importants, en particulier pour les matériaux hautement poreux ($\geq 50\%$) comme cela a été mentionné précédemment. Elle reste néanmoins applicable pour des matériaux composites de faible porosité et relativement « lourds », tels que le béton cellulaire ou de granulats légers (29).

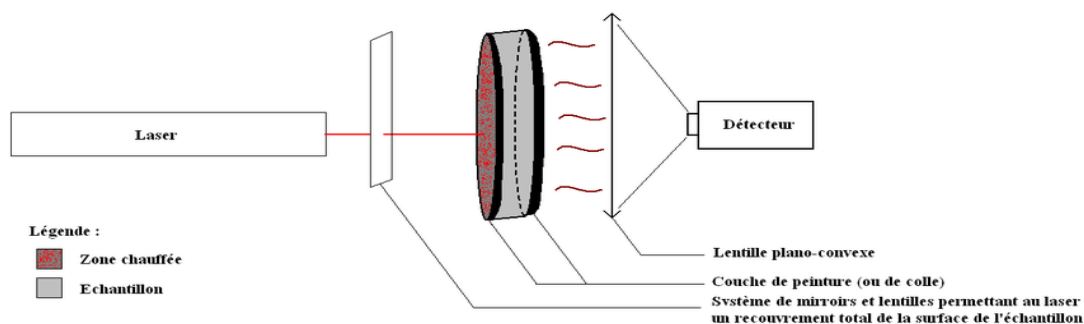


Figure II.13. Schéma de la méthode flash (28)

II.5.2.2. La méthode Hot Disk-source plane transitoire

La méthode Hot Disk est la méthode la plus robuste pour la mesure directe et absolue de la conductivité thermique. Elle permet de mesurer tous types de matériaux. Le principe repose sur une variation de résistance électrique liée à une variation de température. Une sonde Hot Disk est placée entre deux échantillons du même matériau à mesurer. Cette sonde est utilisée à la fois comme source de chaleur et comme capteur de température. En effet, une puissance constante

est fournie à la sonde pendant un temps limité, ce qui crée un échauffement de quelques degrés des échantillons sur un certain volume autour de cette sonde (Figure II.14). Cette élévation de température engendre une variation de résistance électrique de la sonde mesurée via un pont de Wheastone très précis. Ces variations (régime transitoire) sont enregistrées précisément puis analysées afin de déterminer la conductivité thermique et la diffusivité thermique du matériau.

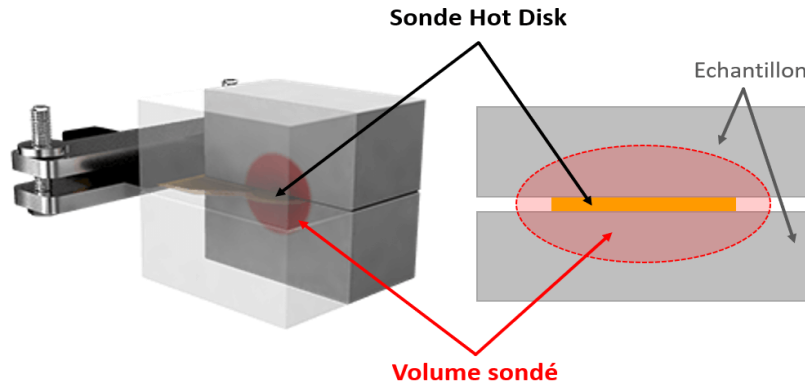


Figure II.14. Schéma de la méthode Hot Disk — Source Plane Transitoire. (65)

II.5.2.3. La méthode du fil chaud

La méthode du fil chaud, d'autre part, a été initialement développée par Carslaw et Jaegar (30) pour la mesure de la conductivité thermique des liquides, puis fut étendue aux solides isolants. Cette technique consiste en la mesure de l'élévation de température d'une source de chaleur de longueur infinie et de diamètre infinitésimal (un fil chaud) encastré dans l'éprouvette de mesure. Une puissance constante correspondant à un échauffement local faible (quelques degrés au-dessus de l'ambiante) est délivrée en même temps que la température du fil chaud est relevée. Les mesures par la méthode du fil chaud (Figure II.15) se font généralement sur des éprouvettes de taille réduite et sur des temps très courts, faisant de la rapidité l'un de ses principaux avantages (31). Cependant, le contact imparfait entre le fil chaud et l'éprouvette peut représenter une source importante d'erreur et la pertinence de la méthode pour des matériaux anisotropes ou semi-transparents est discutable (24), (25).

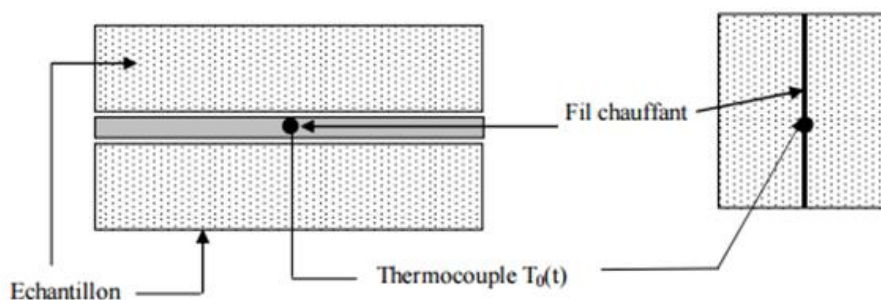


Figure II.15. Schéma de la méthode Fil chaud. (65)

Le conductivimètre est l'appareil le plus utilisé qui sert à faire les essais de conductivité thermique qui sont réalisés en régime transitoire à l'aide d'un conductivimètre 'Quicklinne TM 30', qui permet de faire les mesures de conductivité thermique, la diffusivité thermique et la

chaleur massique en régime transitoire. Assurer un meilleur contact entre la surface de l'appareil et la surface de l'échantillon, ces échantillons sont d'abord séchés à 60 °C jusqu'à stabilisation de masse (32).

La mesure de la conductivité thermique s'appuie sur la technique du fil chaud. Il s'agit d'une méthode qui mesure le transfert d'un flux de chaleur unidirectionnel. Le fil chaud était chauffé par une source d'alimentation externe, puis la température des échantillons augmentait en fonction de la chaleur dégagée par le fil chaud. En se basant sur la variation de cette température en fonction du temps, l'appareil calcul et affiche la valeur de la conductivité thermique, la diffusivité et la chaleur massique de l'échantillon à la fin de l'essai (32).

II.6. LES RECHERCHES SUR LES PROPRIETES THERMIQUES DES MORTIERS A BASE DE MATERIAUX POUZZOLANIQUES

II.3.1. Etude des propriétés thermiques des mortiers à base de perlite (33)

L'objectif de l'étude est de fournir davantage de données sur l'utilisation de la perlite située dans la région de l'ouest de l'Algérie comme substituant au ciment pour confectionner des mortiers avec différents pourcentages de 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 CO₂ durant les opérations de production de ciment, maîtriser l'impact environnemental des produits sur leur cycle de vie complet. L'étude consiste à étudier l'efficacité des ajouts 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. Ces grandeurs permettent 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, on 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,
- 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 suivies à l'air libre et dans l'eau pour différents teneurs en perlite (P : 10%, 20%, 30%) pour différentes échéances. Les résultats trouvés permettent de mettre en évidence l'effet bénéfique la perlite comme isolant thermique en les comparants avec d'autres matériaux isolants.

II.3.2. Etude thermo-physique des bétons à base de granulats légers (perlite expansée et pierre ponce) (34)

La porosité est l'un des facteurs affectant la conductivité thermique du béton et les pores fermés réduisent la conductivité en raison de la faible conductivité thermique de l'air.

La réduction la plus importante de la conductivité thermique du béton s'est produite au niveau de la perlite expansée (50%). Pour un remplacement à 10 %, 20 %, 30 %, 40 % et 50 % d'EPA¹⁶, les réductions de la conductivité thermique étaient de 22,96, 38,01, 64,23, 74,36 et 81,48 %, respectivement. Pour 10 %, 20 %, 30 %, 40 % et 50 % de remplacement de l'AP¹⁷, les réductions étaient de 21,68, 34,13, 61,28, 72,30 et 79,23 %, respectivement, par rapport aux échantillons témoins correspondants.

Cela dû à une augmentation significative de la porosité apparente, mais également à la conductivité thermique la plus faible de la perlite et de la pierre ponce eux-mêmes. La chaleur spécifique est une propriété qui mesure l'indice de la capacité avec laquelle le béton peut subir des changements de température. Le béton à une chaleur spécifique élevée est bénéfique pour augmenter la stabilité thermique d'une structure. Pour le béton ordinaire, la plage courante de valeurs se situe entre 840 et 1170 J/kg.K. La chaleur spécifique d'un béton est fortement influencée par la teneur en humidité, les types d'agrégats utilisés et sa densité (35).

La figure II.16 présente l'effet de la teneur en perlite, pierre ponce sur la chaleur spécifique. Comme le montre cette figure, les valeurs de chaleur spécifique ont augmenté de 709,07, pour l'échantillon témoin, à 966,95 et 991,80 J/kg.K pour les échantillons contenant 50 % de, perlite et pierre ponce, respectivement. Les résultats indiquent clairement que la chaleur spécifique des granulats dépend non seulement de la densité mais aussi du type de granulats (35). On peut décider que la chaleur spécifique des échantillons de pierre ponce augmente davantage avec l'augmentation de la teneur en pierre ponce par rapport à la perlite. Les valeurs de diffusivité thermique du béton ordinaire varient entre 0,55 et 1,55 mm²/sec selon le type de granulat utilisé dans le béton (35). Les résultats ont démontré que l'EPA, le PA dans les mélanges réduisaient la diffusivité thermique en raison de l'augmentation de la porosité totale, comme le montre la figure II.17 les réductions de la diffusivité thermique des bétons étaient ; 17,45, 29,88, 55,95,

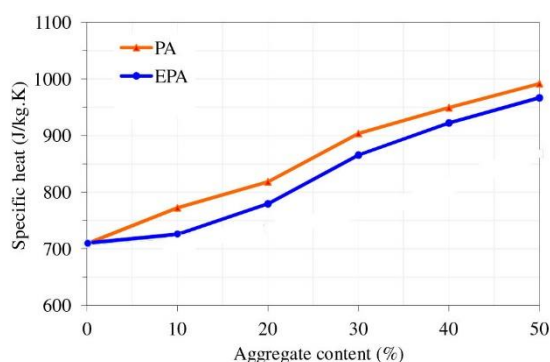


Figure II.16. Effet de la teneur en EPA, PA et sur la chaleur spécifique (34)

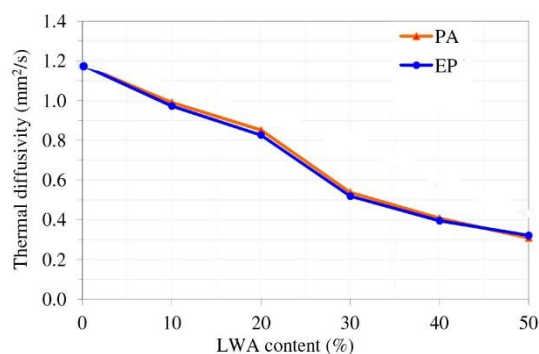


Figure II.17. Effet de la teneur en EPA, PA sur la diffusivité thermique (34)

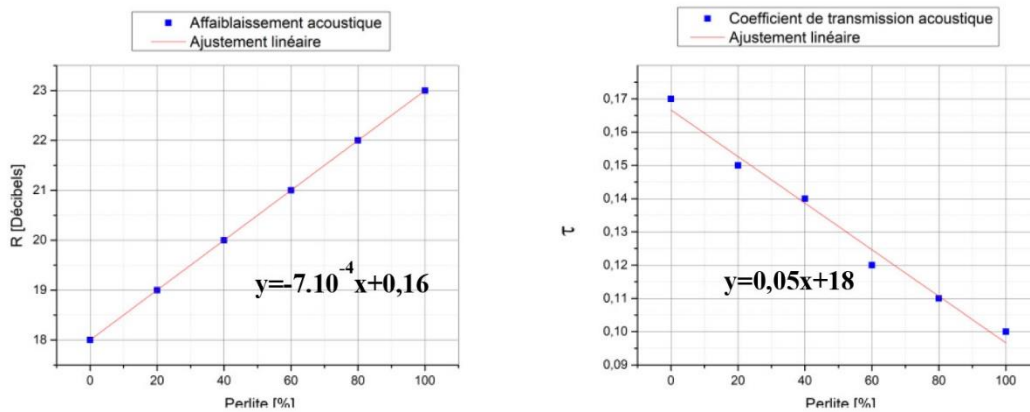
¹⁶ EPA : perlite expansée

¹⁷ PA : la pierre ponce

66,43, 72,75 %, 15,93, 27,71, 54,33, 65,36, 73,82 %, 9,92, 23,17, 33,31, 50,38, 63,35 % lorsque 10 %, 20 %, et 30 % en volume l'agrégat normal a été remplacé par perlite, pierre ponce, respectivement. Bien que les échantillons de béton contiennent de la pierre ponce (50 %) ayant une conductivité thermique plus élevée que la perlite (50 %), la réduction maximale de la diffusivité thermique (Figure II.17) s'est produite au niveau des échantillons de béton pierre ponce. Cela peut être dû au fait d'avoir la plus grande chaleur spécifique de pierre ponce. On peut observer à partir des résultats que la densité est le paramètre le plus efficace qu'il existe une relation directe entre la chaleur spécifique, la conductivité thermique et la diffusivité thermique du matériau. En réduisant la densité du béton, une faible conductivité thermique et une faible diffusivité thermique mais une chaleur spécifique plus élevée peuvent être obtenues.

II.3.3. Étude d'un mortier à base de perlite avec étude thermique et acoustique (36)

Selon les Caractéristiques thermiques qui sont présentés par la figure18. Il y a une diminution du coefficient de conductivité thermique, d'une façon presque linéaire, ce qui mène à l'augmentation de la résistance thermique, avec l'augmentation du pourcentage de la perlite dans le mortier avec un taux de 77% selon la figure 14.b. D'une manière exponentielle, cela est dû aux caractéristiques de la perlite expansée en termes d'isolation, ce qui peut la mettre en valeur pour éviter les déperditions thermiques, et construire des bâtiments qui sont chauffées avec une énergie minimale ce qui contribue à un écosystème sain. (37) et (38) montre que le matériau perlite expansée était efficace pour stabiliser la distribution de densité et réduire considérablement la conductivité thermique de 40% par rapport à l'échantillon témoin.



a)-L'affaiblissement acoustique

b)- Le coefficient de transmission acoustique

Figure II.18. Evolution des caractéristiques acoustiques en fonction du pourcentage de la perlite expansée. (36)

Selon les caractéristiques acoustiques, les résultats de l'essai effectué selon la norme NF EN [ISO 717-1 :2013], le coefficient de transmission acoustique diminue avec l'augmentation du pourcentage de la perlite expansée dans le mortier d'une façon linéaire, tandis que l'affaiblissement acoustique augmente linéairement.

La variation des caractéristiques thermiques et acoustiques en fonction du pourcentage de la perlite selon la figure II.19, montre que l'ajoutant de la perlite, améliore les performances thermiques et acoustiques d'une manière proportionnelle.

De ce fait, les meilleures performances sont à un dosage de 100% perlite sans tenir compte des caractéristiques mécaniques.

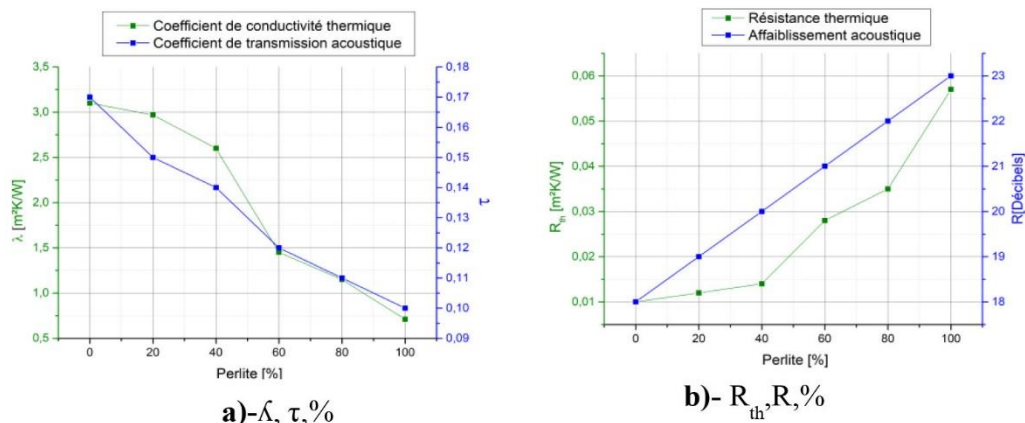


Figure II.19. Variation des caractéristiques thermiques et acoustiques en fonction du pourcentage de la perlite expansée (36)

II.3.4. Les Propriétés physico-thermiques des mortiers à base des agrégats composites "PET-sable siliceux " (39)

D'après la figure II.20, la valeur du mortier composite WPLA¹⁸25, tous les autres mortiers chape ont connus une baisse de la conductivité thermique par rapport au WPLA0 où ce mortier ne contient aucune proportion de l'agrégat composite PET¹⁹-sable siliceux, pour le WPLA50 11.20% de baisse a été enregistrée, 20.85% pour le WPLA75 et finalement 25.34% pour le WPLA100, par contre on constate une hausse de 12.29% pour le WPLA25.

En effet, l'augmentation des proportions de l'agrégat composite WPLA ($\lambda=0.589$ W/m.K), dont il est conçu à partir du PET ($\lambda =0.15$ W/m.K), par rapport au (SC) ($\lambda_{silice}=3.59$ W/m.K et $\lambda_{calcaire} > \lambda_{WPLA}$) contribue à la diminution de la conductivité des mortiers composites WPLAX. La capacité calorifique du WPLA0 atteint une valeur moyenne qui est nettement supérieurs à celle des autres mortiers composites. Les mortiers chapes WPLA25, WPLA50 WPLA75 et WPLA100 ont une capacité calorifique moindre par rapport au mortier WPLA0 avec un écart de 20.5 %, 16.5%, 14.8 % et 3.5% (Figure II.20), respectivement.

Cependant la diffusivité thermique, du mortier chape WPLA100 a une diffusivité de 0.41×10^{-6} m²/s en moyenne (Figure II.16), ceci s'explique par la teneur plus élevée en composite WPLA ($a=0.398 \times 10^{-6}$ m²/s) qui réduit la vitesse de propagation de la chaleur dans ce mortier.

On outre, l'effusivité affiche une variation inverse à celle de la diffusivité pour le WPLA0 et WPLA100 et une progression décroissante pour les autres mortiers chapes (Figure II.21). Plus la valeur de "a" est faible, plus la chaleur met de temps à traverser le matériau. L'effusivité mesure la capacité de conservation de chaleur d'un matériau en contact avec un autre. Plus l'effusivité est élevée, plus le matériau absorbe d'énergie sans se réchauffer notablement. Au contraire, plus elle est faible, plus vite le matériau se réchauffe.

¹⁸ **WPLA:** Waste PET Lightweight Aggregates.

¹⁹**PET:** polytéréphtalate d'éthylène.

Ainsi, que les chapes composites contenant du WPLA ont des propriétés d'isolation thermiques meilleures que celles du mortier témoin. En conséquence, ils pourront fournir de multiples applications, en particulier celle qui empêchent le transfert de chaleur et par conséquent économiser de l'énergie au sein d'un bâtiment conçu pour un développement durable.

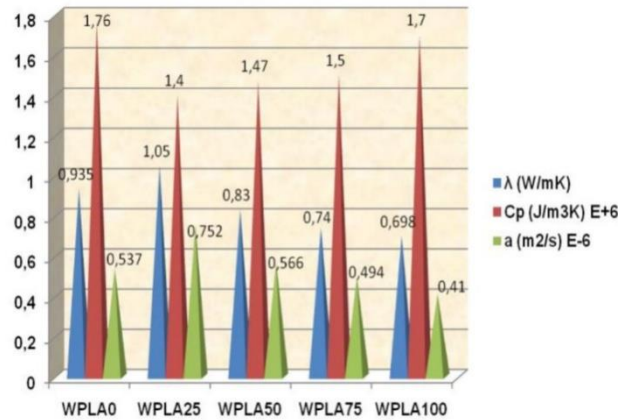


Figure II.20. La variation de la conductivité thermique (λ), la capacité calorifique (ρC_p), la diffusivité thermique (a) des différents mortiers chapes WPLAX. (39)

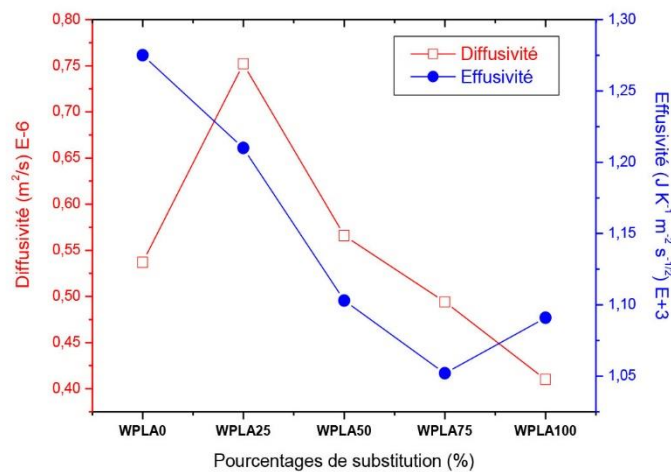


Figure II.21. Evolution des propriétés thermiques dynamiques en fonction des pourcentages de substitution.(39)

II.3.5. Étude des propriétés mécaniques et conductivité thermique du béton léger à base de perlite expansée (40)

L'objectif principal de cette étude est de fournir davantage des données sur les effets de la perlite expansée sur les propriétés mécaniques et conductivité thermique du béton léger. Dans le programme expérimental, les mélanges ont été préparés en remplaçant partiellement par des granulats naturels de perlite expansée et par conséquent, les poids unitaires de bétons légers à l'état frais ont varié entre 700 et 2000 kg / m³. Le rapport eau/ciment a été maintenu constant dans tous les mélanges. Les résistances à la compression, le module d'élasticité, coefficient d'absorption d'eau et des mélanges de capillarité ont été déterminées. La conductivité thermique des échantillons a également été obtenue. Les résultats montrent que la résistance à la

compression et le module d'élasticité diminue avec l'augmentation de la teneur en perlite. L'absorption d'eau et le coefficient d'absorption, cependant, augmente avec le contenu de perlite plus élevés. Les résultats obtenus ont montré que la conductivité thermique est sensiblement améliorée par l'utilisation de la perlite et une forte corrélation entre la conductivité thermique et le poids unitaire est obtenu.

II.3.6. Fabrication de briques d'argile contenant la perlite résistante à haute température (41)

Différentes méthodes ont été étudiées pour réaliser l'isolation thermique des bâtiments. La fabrication des matériaux de construction résistants à haute température est une partie importante de ces efforts de recherche. La perlite est un matériau extrêmement utile pour l'isolation thermique et 70% des réserves mondiales se trouvent en Turquie. Près de 65% de la perlite produite aujourd'hui est consommée par l'industrie de la construction. Son comportement thermique, sa légèreté et ses propriétés d'isolation acoustique font de la perlite un excellent matériau qui peut être utilisé comme agrégat léger dans la fabrication de briques.

La brique résistante à la chaleur élevée peut être produite en ajoutant la perlite dans l'argile pour la fabrication de briques classiques. La perlite de la région Eskişehir et l'argile ont été mélangées pour former un matériau résistant à haute conductivité thermique. Les matériaux de liaison tels que le ciment, le gypse, la chaux, le bitume et l'argile ont été utilisés pour la fabrication de brique de perlite. Des briques de dimension standard fabriquées à différents rapports d'argile et perlite unité de poids, résistance à la compression, la réduction du volume et des valeurs de conductivité thermique ont été obtenues. Ensuite, le mélange avec la meilleure combinaison des propriétés a été déterminé et l'optimisation des coûts a été décrite. Les résultats ont été examinés en fonction des propriétés de combinaison, et des spécialités de briques de perlite ont été déterminées à différents poids. Par conséquent, le meilleur mélange a été déterminé comme étant celui qui contient 30% de perlite.

II.3.7. La conductivité thermique apparente de béton à base de pouzzolane (42)

On étudie le développement récent de certains matériaux de construction légers, tels que le béton léger, peut jouer un rôle important comme un isolant, tout en maintenant des niveaux suffisants de performances mécaniques. La qualité de l'isolation à fournir dépend du climat, l'exposition des murs et également les matériaux utilisés dans la construction. Le choix d'un matériau à être utilisé comme un isolant, évidemment, dépend de sa disponibilité et son coût. Il s'agit d'une étude de pouzzolanes naturelles comme composants de base des matériaux de construction destinée à mettre en évidence leurs avantages thermiques. Il est économiquement avantageux d'utiliser la pouzzolane dans la substitution d'une partie du clinker comme des ajouts hydrauliques actifs, ainsi que dans des compositions de bétons légers dans la forme de mélanges agrégats pouzzolaniques, qui fournissent les forces mécaniques qui sont conformes aux normes actuelles.

Une étude théorique est menée sur la conductivité thermique apparente des matériaux de construction, à savoir en béton contenant la pouzzolane. La modélisation thermique, apparente

à celle couramment utilisée pour les matériaux poreux, a été appliquée au béton de pouzzolane. Les résultats expérimentaux sur des mesures de la conductivité thermique apparente de béton pouzzolane sont rapportés dans cette étude, en utilisant une approche qui considère que le béton est composé de deux composants solides, une matrice de liaison (pâte de ciment hydraté) et tous les agrégats. Une deuxième approche comparative théorique est utilisée pour le cas où le béton est constitué d'une phase solide et une phase fluide (air).

II.4. CONCLUSION

La thermique des bâtiments décrit les échanges thermiques qui se réalisent en un bâtiment et son environnement, dans ce chapitre nous avons illustré les différentes définitions de base de la thermo-physique de bâtiments, ainsi que les modes de transferts thermiques (conduction, convection, rayonnement et changements de phase) et les différentes propriétés physico-thermiques des matériaux (conductivité thermique, résistance thermique, diffusivité thermique, chaleur massique, effusivité thermique). De plus, on a résumé les recherches précédentes concernant les propriétés thermiques des mortiers à base de matériaux pouzzolaniques.

CHAPITRE III : SYNTHÈSE DES RECHERCHES SUR LES MORTIERS A BASE DE PERLITE

III.1. INTRODUCTION

Dans les années précédentes, plusieurs recherches ont été menées sur l'influence des différents pourcentages de perlite naturelle issue de Hammam Boughrara à Maghnia et ce sur les différents comportements des mortiers. Dans ce chapitre on va évoquer les différents résultats des essais à l'état frais et à l'état durci effectués par certains chercheurs, il s'agit de l'essai de consistance, de prise, de maniabilité sur des compositions de mortiers avec perlite à l'état frais et des mesures d'absorption capillaire, des caractéristiques thermo-physiques et les essais mécaniques de traction compression à l'état durci.

III.2. FORMULATIONS ETUDIÉES

III.2.1. Formulations de Hamadache (15)

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 de perlite. (Tableau III.1).

Tableau III.1. Formulations des mortiers (15).

Désignation du mortier		Perlite (g)	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)	E /L
M0	Mortier normal	0	450	1350	225	0.5
M10P	Mortier avec ciment binaire	45	405	1350	225	0.5
M20P		90	360	1350	225	0.5
M30P		135	315	1350	225	0.5

III.2.2. Formulations de Chihaoui (5)

Les proportions de matériaux utilisées pour chaque mortier est une part de ciment et 2,75 parts de sable en masse. Les substitutions de perlite au ciment varient de 5 à 20%. Pour le mortier préparé à base de ciment Portland Ordinaire sans ajout de perlite, le rapport en masse d'eau-ciment est de 0,485 (Tableau III.2).

Tableau III.2. Formulations des mortiers (5).

Code	Ciment (g)	Perlite naturelle (g)	Sable (g)	Eau	E/C
M0	491	0	1350	238.1	0,485
M5	466,45	24,55	1350	226.2	0,485
M10	441,90	49,10	1350	214.3	0,485
M15	417,35	73,65	1350	202.4	0,485
M20	392,80	98,20	1350	190.5	0,485

III.2.3. Formulation de Bourroubey (43)

Des mortiers ont été réalisés à partir du ciment CPJ CEM II 42.5 R et la perlite (10 et 20%) avec un volume de pâte constant (Tableau III.3).

Tableau III.3. Formulations des mortiers (43).

Code	Ciment (g)	Perlite naturelle (g)	Sable (g)	Eau	E/C	Vol. de la pâte (cm ³)
M0	450	0	1350	225	0.5	370.2
M10	430	43	1350	215	0.5	370.2
M20	360	81.82	1350	204.5	0.5	370.2

III.2.4. Formulations de Maamar Benhadjar et al (44)

Des éprouvettes ont été confectionnées à partir du ciment CPJ CEM II 42.5 R et de perlite (15 et 25%) avec un volume de pâte constant (Tableau III.4)

Tableau III.4. Formulations des mortiers (44).

Code	Ciment (g)	Perlite naturelle (g)	Sable (g)	Eau	E/C	Vol. de la pâte (cm ³)
M0	450	0	1350	225	0.5	370.2
M15	418.8	62.82	1350	209.4	0.5	370.2
M25	399.8	100	1350	200	0.5	370.2

III.2.5. Formulations de Guenanou (17)

Des formulations ont été préparées à partir du ciment CPA-CEMI 42,5 et la perlite (10, 20 et 30%) avec un Superplastifiant à pourcentage différents, avec un rapport E/C constant et un volume de pâte constant (Tableau III.5).

Tableau III.5. Formulations des mortiers (17).

Notation	CEMI (g)	PR (g)	E/L (%)	Adjuvant (%)
M0	450	0	0.5	0.62
M10	405	45	0.5	0.88
M20	360	90	0.5	1
M30	315	135	0.5	1.08

III.3. SYNTHÈSE DES ÉTUDES SUR MORTIERS À BASE DE PERLITE

III.3.1. Étude à l'état frais

III.3.1.1. La maniabilité

Selon la recherche de Bourroubey (43) qui a consisté en l'étude des propriétés physico-mécaniques des mortiers contenant 10 et 20% de perlite en substitution partielle au ciment, la maniabilité des mortiers diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la perlite (Figure III.1).

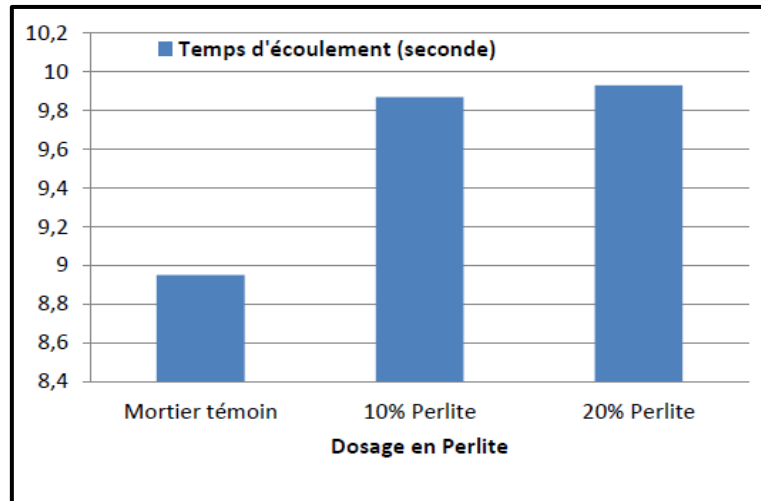


Figure III.1 .la maniabilité des mortiers (temps de vibration) (43)

Pour garder une maniabilité plus ou moins constante, il a fallu augmenter la quantité d'adjuvant nécessaire pour l'obtention d'un mélange maniable et ouvrable (Tableau III.6). Cela prouve que l'augmentation du taux de la perlite accroît sensiblement la demande en eau, cette croissance est principalement attribuée à l'augmentation progressive de la surface spécifique des liants pouzzolaniques.

Tableau III.6. Dosages du plastifiant des mortiers à base de perlite (43)

	Mt	Perlite 10%	Perlite 20%
Ciment	450	430	409.1
Plastifiant %	0	0.42	1.70
Plastifiant g	0	1.8	7

L'étude de Hamadache (15) à l'état frais et notamment l'essai d'étalement sur des mortiers à base 10, 20 et 30% de perlite, a montré qu'avec une quantité d'eau constante pour la préparation de tous les mortiers, la maniabilité des mortiers pouzzolaniques diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la perlite (Tableau III.7, Figure III.2).

Tableau III.7. Influence de la perlite naturelle sur la maniabilité des mortiers à E/C=0,50 (15)

Étalement $E\% = (D_r - D_i) / D_i$, $D_i = 100\text{mm}$				
Désignation de mortier	Perlite (%)	E/C	Étalement (mm)	Étalement (%)
M0	0	0,50	120	20
M10P	10	0,50	116	16
M20P	20	0,50	112	12
M30P	30	0,50	106	06

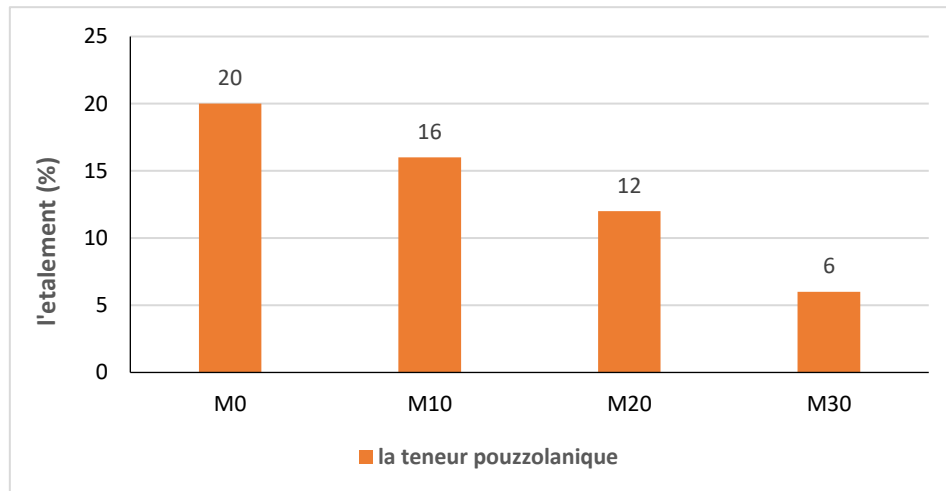


Figure III.2. Variation de l'étalement en fonction des différentes teneurs pouzzolaniques (15)

Cela prouve que l'augmentation de la perlite accroît sensiblement la demande en eau attribuée à l'augmentation progressive de la surface spécifique des liants incorporant la perlite naturelle. Il a été constaté suite à l'essai de maniabilité que la quantité d'eau doit être augmentée pour que les mortiers incorporant la perlite naturelle puissent développer un étalement de $\pm 5\%$ de celui du mortier de ciment sans ajout [5] (Tableau III.8).

Tableau III.8. Proportions des mélanges de différents mortiers (5).

Code	Liant	Sable/liant	Eau/liant	Etalement %
M0	100% PC	2.75	0.485	110
M5	95% PC+5% NPP	2.75	0.485	106
M10	90% PC+10% NPP	2.75	0.490	108
M15	85% PC+15% NPP	2.75	0.495	105
M20	80% PC+20% NPP	2.75	0.495	105

Les conclusions obtenues, concordent bien avec celles de l'essai de maniabilité établi pour les différentes pâtes, dont la croissance de la demande d'eau est principalement attribuée à l'augmentation progressive de la surface spécifique des liants Incorporant la perlite naturelle (5).

Plusieurs chercheurs ont rapporté que la perlite diminue la maniabilité des mortiers, d'où l'utilisation d'un plastifiant ou l'augmentation de la quantité d'eau afin d'obtenir une maniabilité comparable à celle du mortier de ciment pur.

La maniabilité des mortiers diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la perlite, pour garder une maniabilité plus ou moins constante, et il a été constaté qu'il a fallu augmenter la quantité d'adjuvant nécessaire pour l'obtention d'un mélange maniable et ouvrable (44) (Figure III.3) (Tableau III.9).

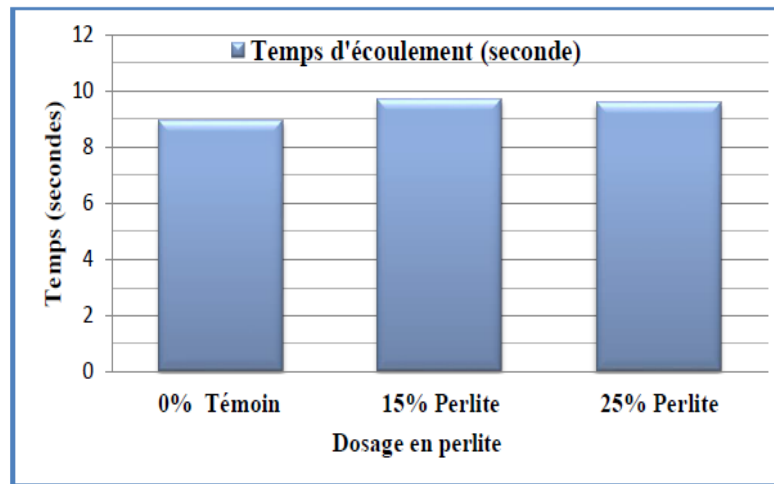


Figure III.3. Temps d'écoulement en fonction du dosage en Perlite des mortiers (44)

Tableau III.9. Dosages du plastifiant des mortiers à base de perlite (44)

	Mt	Perlite 15%	Perlite 25%
Ciment	450	418.8	399.8
Plastifiant %	0	0.4	1.2
Plastifiant g	0	1.68	4.8

En concordance avec les recherches précédentes, celle-ci prouve que l'augmentation du taux de la perlite accroît sensiblement la demande en eau qui est principalement attribuée à l'augmentation progressive de la surface spécifique des liants pouzzolaniques.

Et enfin elle a conclu que les essais menés à l'état frais sur mortiers avaient pour objectif la détermination des valeurs des rapports E/L par l'essai de maniabilité qui a révélé que la présence de la perlite implique une augmentation du besoin de la quantité d'eau. Aussi l'incorporation d'ajout en particulier la perlite affecte légèrement la maniabilité des mortiers frais.

III.3.1.2. Consistance et prise

Les essais de consistance et de prise selon Hamadache (15), les différents teneurs d'ajouts de perlite substituées en fonction des poids (Tableau III.10).

Tableau III.10. Les essais de consistances, début et fin de prise des pâtes de ciment (15)

Désignation des pâtes de ciment	Ciment CEM I (%)	Perlite (%)	Consistance E/L (%)	Début de prise h (mn)	Fin de prise h (mn)
CEM I	100	0	28	164	310
P 10P	90	10	28	166	335
P 20P	80	20	30	158	320
P 30P	70	30	32	135	318

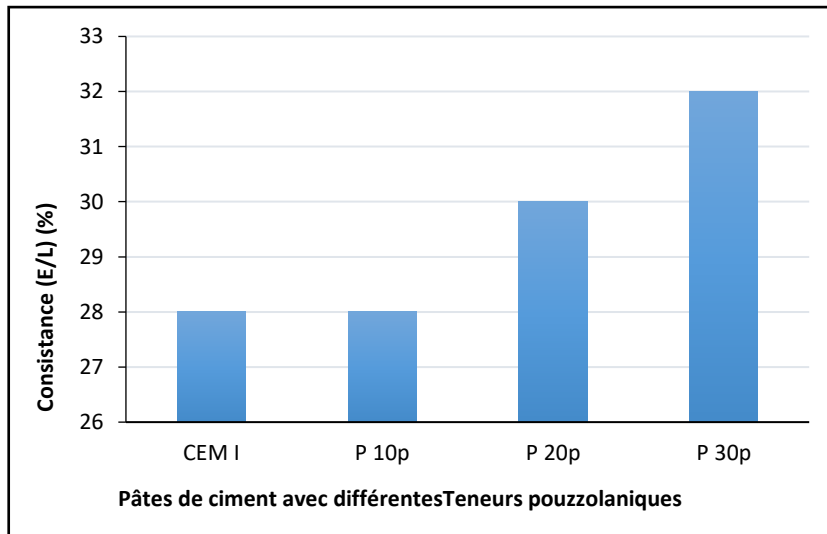


Figure III.4. Variation de la consistance des pâtes de ciment en fonction des teneurs en perlite (15)

Il a constaté que la consistance est normale pour la pâte du ciment CEMI et la pâte de ciment avec 10% de perlite (P10p), et déduit que l'augmentation du rapport E/L est directement liée à la croissance du dosage en perlite (Figure III.4).

Le temps de prise des pâtes est inversement proportionnel à la teneur de perlite dans lesquelles elle a été incorporée en d'autres termes plus la teneur de l'ajout pouzzolanique augmente plus le temps de prise diminue (Figure III.5).

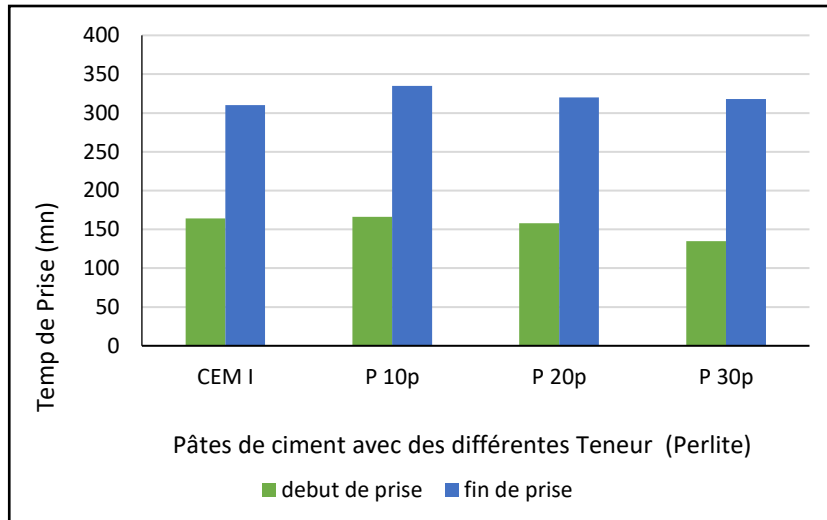


Figure III.5. Variation de temps de prise des pâtes de ciment en fonction des différentes teneurs pouzzolaniques (15)

Chihaoui (5) il a constaté que les besoins en eau des pâtes contenant la poudre de perlite naturelle sont supérieurs à celui du ciment sans ajout. Par conséquent, à mesure que la quantité de la perlite augmente, les besoins en eau augmentent (Figure III.6). Il a également déduit que cela est probablement dû au fait que la poudre de perlite a une surface spécifique plus grande, et a donc besoin de plus d'eau lors de la préparation de la pâte.

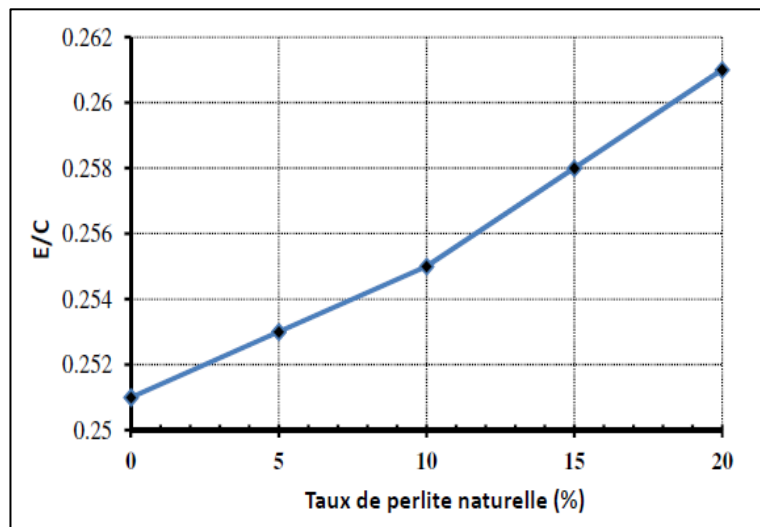


Figure III.6. Variation E/C pour avoir des pâtes à consistance normale (5)

Comme le montre le Tableau III.11, tous les temps de début de prise enregistrés sur les ciments contenant la perlite naturelle sont supérieurs à 45 min ; et tous les temps de fin de prise sont inférieurs à 420 min. Cela confirme que tous les mélanges contenant de la perlite naturelle satisfont les exigences de ces normes.

Tableau III.11. Temps de prise de différentes pâtes de ciment (5).

Code	Début de prise	Fin de prise
M0	101	195
M5	97	180
M10	86	165
M15	83	160
M20	77	154

Les résultats révèlent clairement, comme la montre (Figure III.7), que les temps de prise (début et fin) sont accélérés avec l'ajout de la perlite naturelle. La perlite naturelle utilisée dans cette étude, renferme une teneur élevée en Al_2O_3 (13,68 %), son incorporation dans le ciment, augmente la quantité des composés d'aluminate du mélange. En outre, l'accélération de la prise dans les pâtes incorporant la perlite naturelle peut être associée à la croissance de la formation d'hydrates de sulfate de calcium.

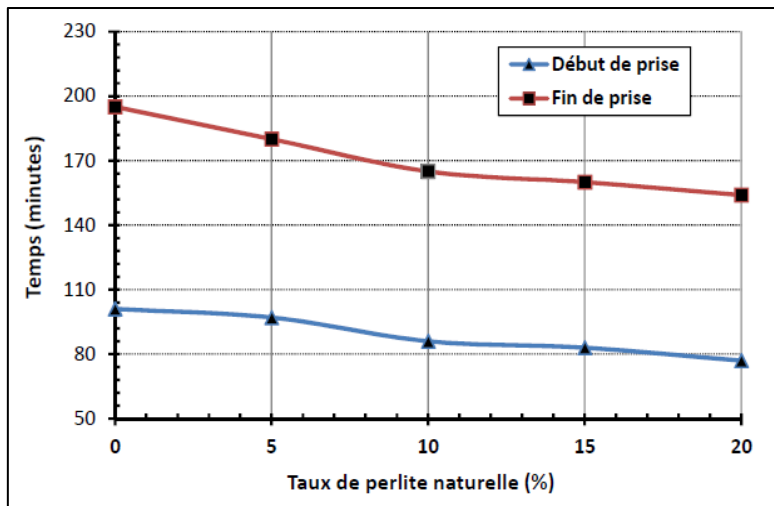


Figure III.7. Évolution des temps de prise des différentes pâtes (5).

Les résultats de consistances de Bourroubey (43) décrits par la Figure III.8 et le Tableau III.12 montrent que le rapport E/L augmente avec l'augmentation du pourcentage de perlite, cela est dû à la finesse de la perlite qui absorbe et réduit une partie importante d'eau destinée à l'hydratation du ciment.

Tableau III.12. Résultats de consistance pour chaque composition de pâte (43)

Les pâtes	Pate (0 p)	Pate 10p	Pate 20p
Eau	135	137.5	138.5
Ciment	500	450	400
Perlite	0	50	100
E/L	0.27	0.275	0.277

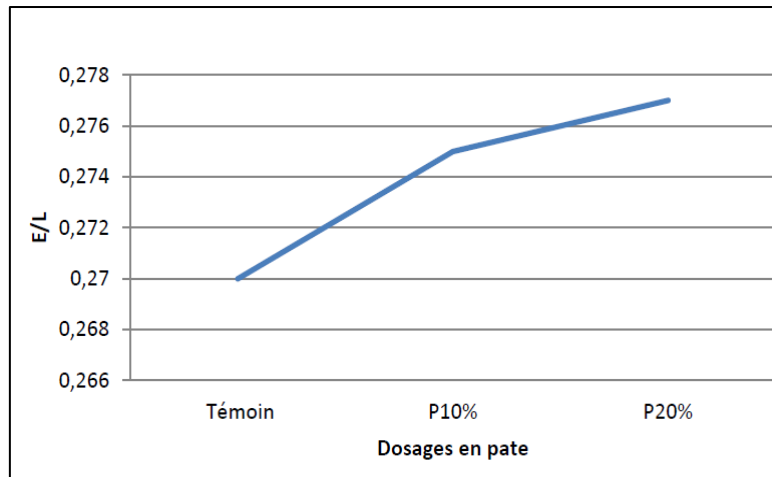


Figure III.8. Variation des rapports E/L en fonction du dosage en perlite (43).

Par ailleurs il apparaît que l'ajout de la perlite affecte légèrement les temps de prise puisqu'un écart de 14 minutes est enregistré entre la pâte témoin et celle dont 20% de ciment ont été remplacés par la perlite (Figure III.9). Aussi, les temps de prise équivalents pour les pâtes à base de 10 et 20%.

Cependant en comparant les temps de début de prise et de fin de prise, ces derniers diminuent légèrement avec l'augmentation des dosages. Ces résultats prouvent que la présence de la perlite dans les mortiers même à un dosage de 20% n'affecte pratiquement pas le temps de prise.

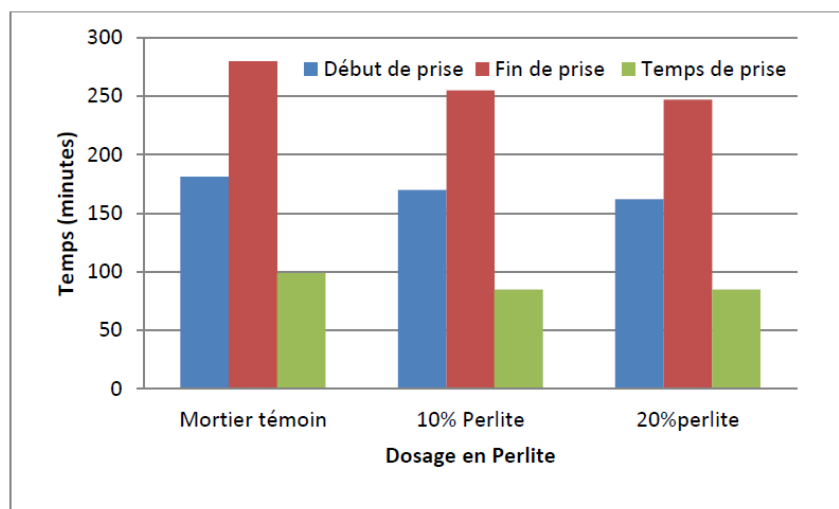


Figure III.9. Temps de prise des pâtes à base de perlite (43).

D'après les résultats de l'essai de consistance selon Geunanou (17), montrent que le remplacement de 10%, 20% et 30% du ciment par la perlite augmente la quantité d'eau nécessaire pour l'obtention d'une consistance normale par rapport aux liants sans ajouts, (tableau III.13), tous les liants testés répondent à l'exigence de la norme NF EN 197-1 avec une consistance normale < 30%.

Tableau III.13. Caractéristiques physiques des différentes pâtes de ciment (17)

Formulations	Consistance Normale (%)	Temps de Début prise (min)	Temps de Fin prise (min)
M0	23.15	135	165
M10	23.60	156	185
M20	24.15	165	210
M30	25.03	195	275

Les résultats des temps de début de prise et de fin de prise des différents liants, illustrés dans la figure III.10, montrent que les temps de début et de fin de prise augmentent pour toutes les pâtes à base d'ajout par rapport à ceux du témoin.

La substitution du ciment ordinaire de 10%, 20% et 30% par la perlite, augmente le temps de début de prise d'environ 15%, 22% et 44% et le temps de fin de prise d'environ 12%, 27% et 66%, respectivement, par rapport au liant sans ajout.

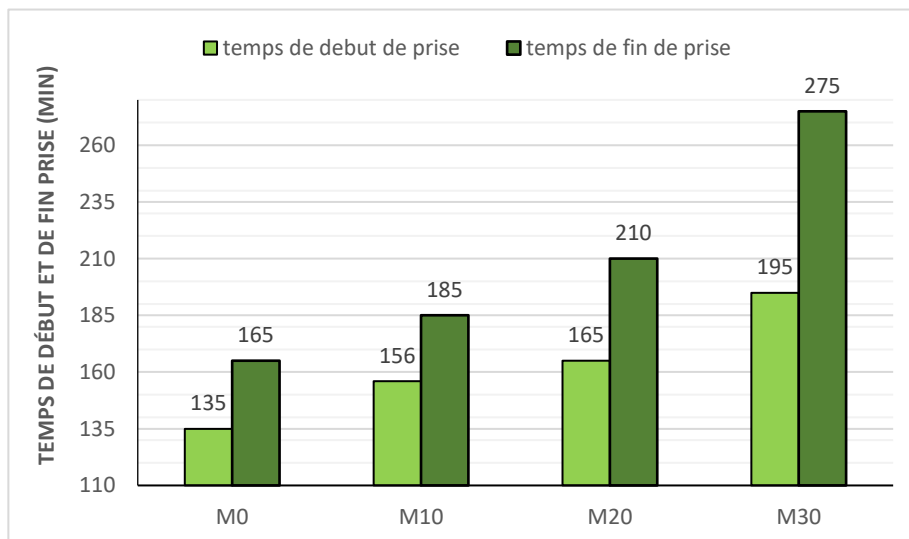


Figure III.10. Temps de début et de fin de prise des différents types de liants (17).

III.3.2. Étude à l'état durci

III.3.2.1. Absorption capillaire

Les résultats issus des essais de Bourroubey (43) montrent l'influence de la perlite naturelle sur l'absorption d'eau des mortiers à l'âge de 1 et 7 jours, 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. Les pores dans la pâte durcie et les interfaces entre cette dernière et les grains de sable sont remplis par ces ajouts et les pores capillaires sont par conséquent réduits (Figure III.11).

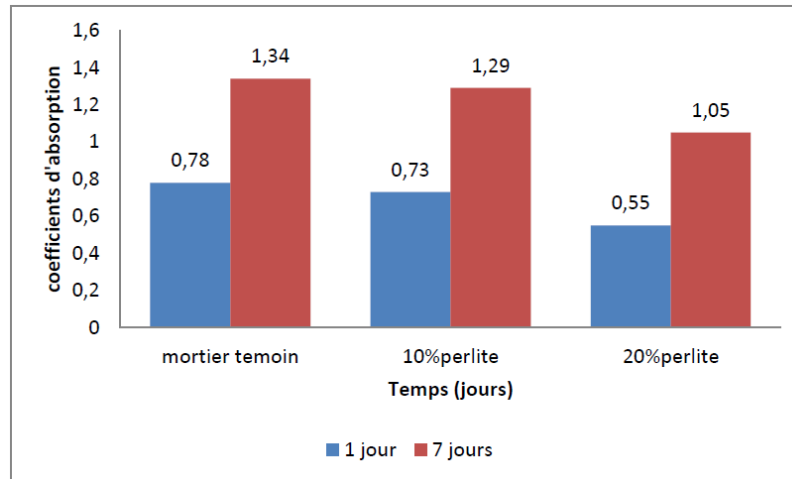


Figure.III.11. Évolution des coefficients d’absorption capillaire des différents mortiers (43).

Selon les essais de Maamar Benhadjar (44), les résultats montrent l’influence de la perlite naturelle sur l’absorption d’eau des mortiers à l’âge de 1 et 7 jours, l’incorporation de la perlite à des taux de 15 et 25% respectivement au ciment CPJ est très avantageuse puisqu’elle permet une réduction importante d’absorption capillaire (Figure III.12).

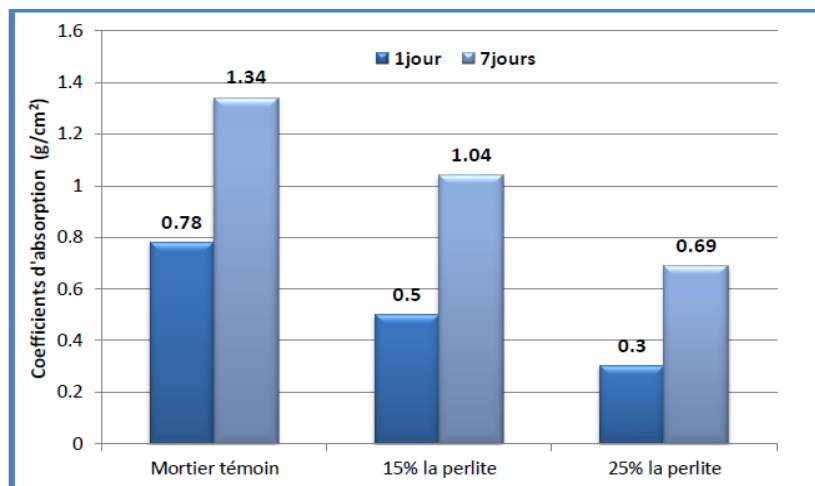


Figure III.12. Évolution des coefficients d’absorption capillaire des différents mortiers (44).

L’influence des différents ajouts (la perlite) sur l’absorptivité des mortiers à 28, 60 et 90 jours. Selon l’essai de Geunanou (17), engendre un effet avantageux sur l’absorptivité et donc obtenir une diminution de la taille des pores capillaires. Comparant entre les résultats des différents âges de conservation (Figure III.13), la diminution de la valeur des coefficients de l’absorptivité avec l’âge.

L’absorptivité peut être réduite, à long terme, à cause du développement de la réaction pouzzolanique avec le temps, qui réduit les pores capillaires par le remplissage de ces pores par le gel CSH de seconde génération formée à partir de la silice des ajouts pouzzolaniques la perlite et la portlandite, l’hydrate résultant de l’hydratation du ciment.

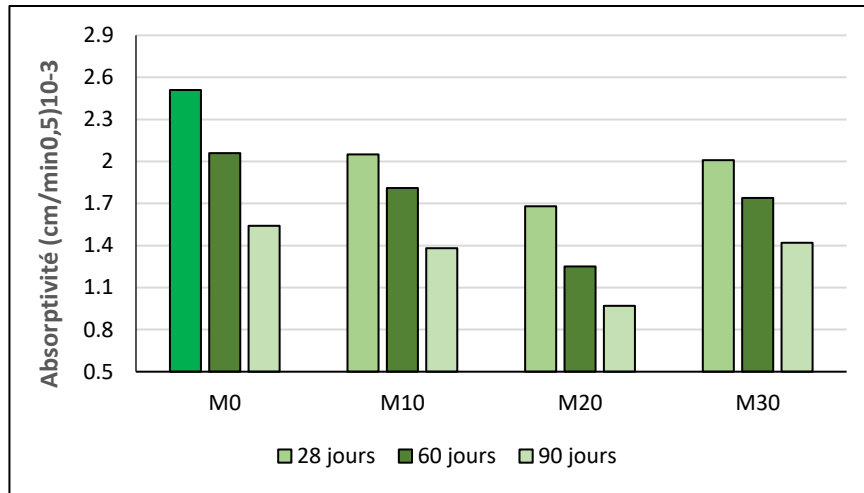


Figure III.13. Evolution de l'absorptivité des différents mortiers (17).

III.3.2.2. Etude thermique des mortiers contenant la perlite

Conductivité thermique

Selon les résultats de Hamadache (15) dans l'intervalle compris entre 3 jours et 14 jours, l'évolution de la conductivité thermique en fonction du taux d'ajouts est élevée, 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 (Figure III.14).

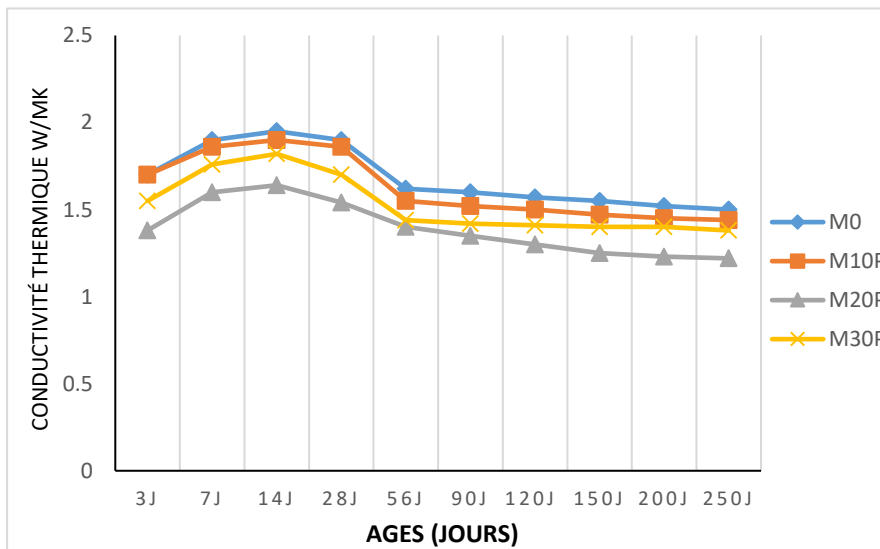


Figure III.14. La conductivité thermique en fonction du temps des mortiers à l'air libre (15).

Mesure de la résistance thermique (R_{th}) des mortiers à l'air libre

Il apparaît que plus la valeur de la résistance thermique R_{th} d'une paroi est élevée, plus le matériau est isolant ce qui signifie qu'une bonne amélioration de l'isolation thermique est

observée, due essentiellement à une grande résistance thermique des échantillons exposés à l'air (Figure III.15).

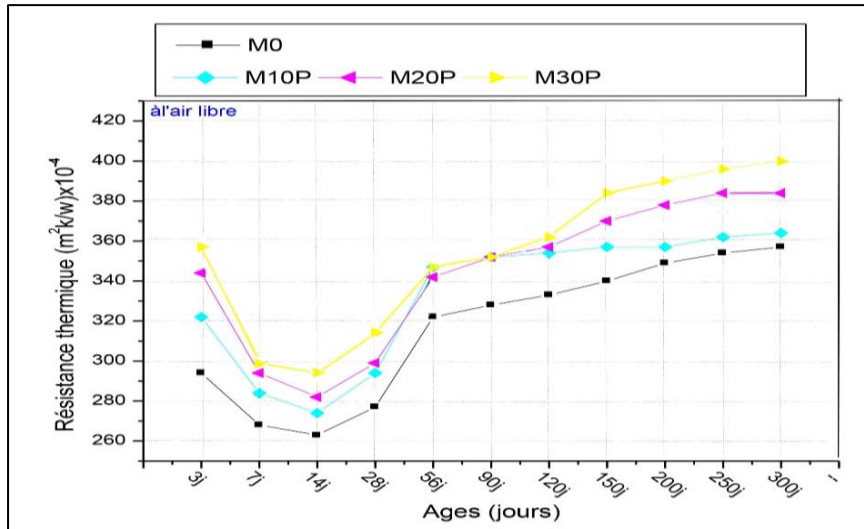


Figure III.15. Variation de la résistance thermique en fonction du temps à l'air libre (15).

La comparaison entre la variation de la conductivité thermique et la résistance thermique montre que la conductivité thermique (Figure III.16) est inversement proportionnelle à la résistance thermique par rapport à la classification des teneurs pouzzolaniques : M0, M20%P, M10%P, M30%P (15).

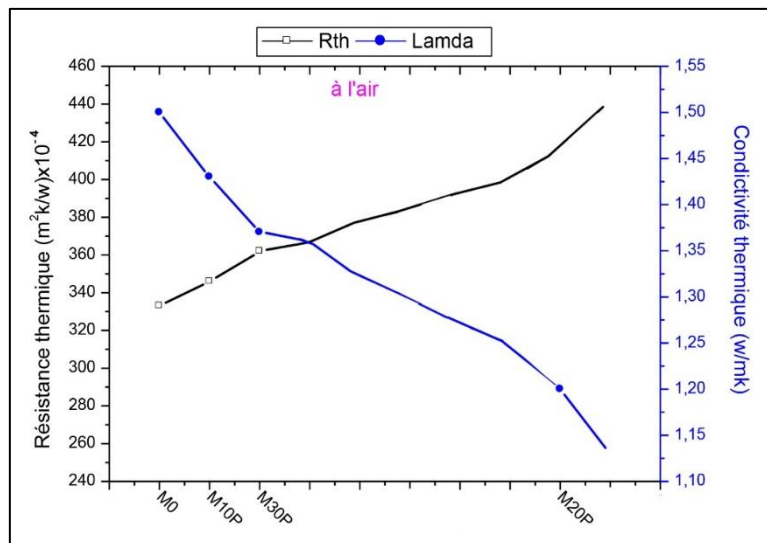


Figure III.16. Variation de la conductivité thermique, résistance thermique en fonction des teneurs pouzzolaniques à l'air libre à 300 jours (15).

Résistance à la compression du mortier durci

Les résistances à la compression augmentent rapidement au jeune âge jusqu'à l'âge de 28 jours puis légèrement à long terme et ce pour tous les mortiers à base de perlite (15). Elles sont inversement proportionnelles aux pourcentages de l'ajout pouzzolanique.

Les résistances à la compression de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute, une substitution jusqu'à 20% de perlite n'affecte pas négativement l'évolution des résistances par rapport à celle du mortier témoin (Figure III.17).

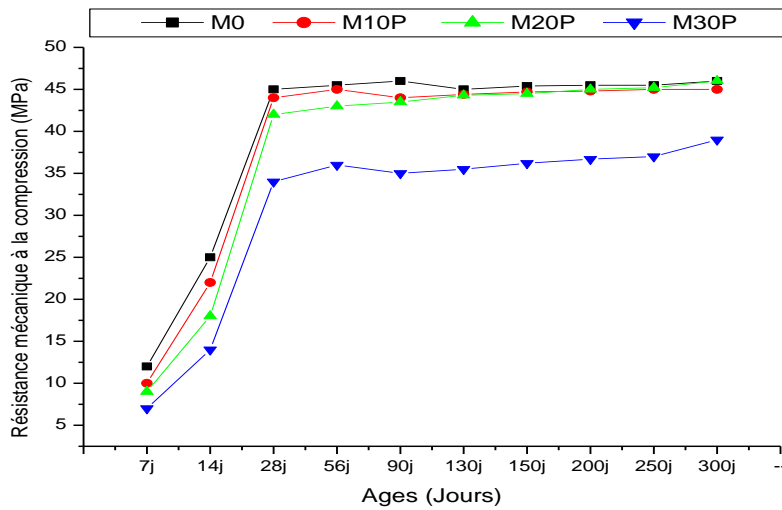


Figure III.17. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers à base de perlite (15).

Selon Bourroubey (43), les résistances à la compression des mortiers à base de perlite à 3 jours, sont inférieures à celle du mortier témoin et après 7 jours ils développent des caractéristiques mécaniques dépassant celle du témoin (Figure III.18).

Ce gain de résistance peut être attribué aux rôles complémentaires de l'effet pouzzolanique de la perlite au sein de la matrice cimentaire. L'effet filler réduit la porosité de la zone de transition pâte-granulat.

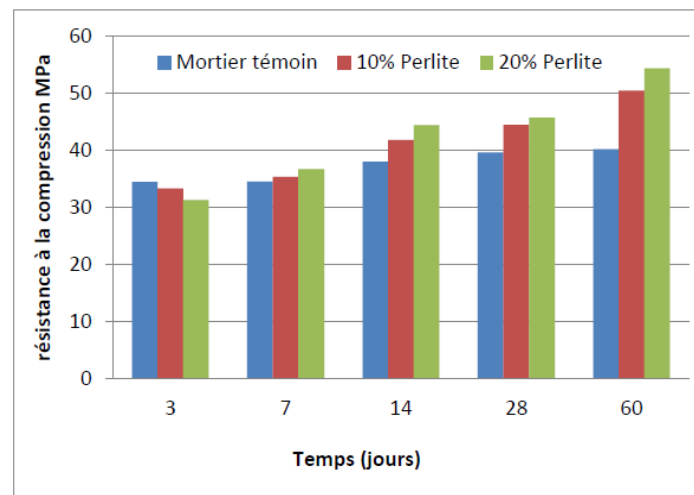


Figure III.18. Evolution des résistances à la compression (MPa) [43].

Au regard de la Figure III.19 selon les résultats de Maamar Benhadjar el al (44), les résistances à la compression des mortiers témoin et incorporant la perlite sont comparables à 3 et 14 jours et à 7 jours pour les mortiers témoin et à base de 25% de perlite (44).

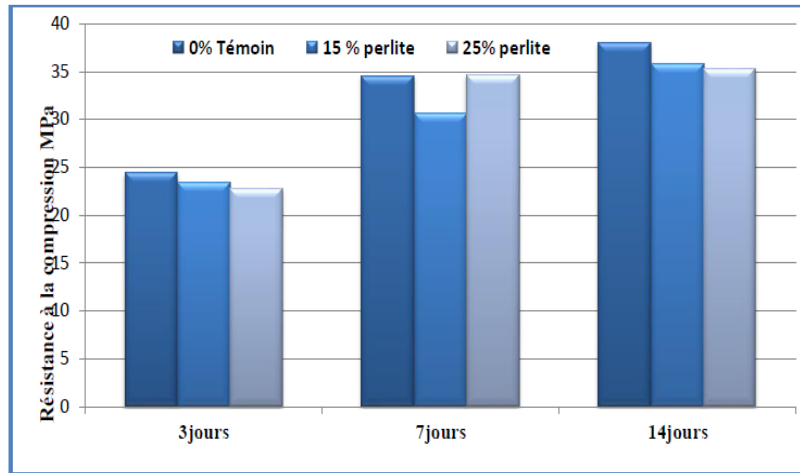


Figure.III.19. Evolution des résistances à la compression (MPa) (44).

Quant à Chihaoui (5), il a montré qu'à l'âge de 1 jour, les mortiers incorporant la perlite naturelle avaient pratiquement des résistances comparables (ou légèrement inférieures) à celle du mortier témoin. A 7 jours, les valeurs de résistance à la compression des mortiers M5, M10, M15 et M20 sont inférieures à celles du mortier témoin, après 28 jours, les valeurs de résistance des mortiers incorporant la perlite naturelle ont commencé à augmenter plus rapidement et ont approché les résistances du mortier témoin. A 90 jours, les résistances à la compression de M5, M10, M15 et M20 sont inférieures à celle du témoin. Ces résultats indiquent clairement que la différence entre la résistance du mortier témoin et celles des mortiers incorporant différents taux de perlite diminue continuellement avec le temps. (Figure III.20).

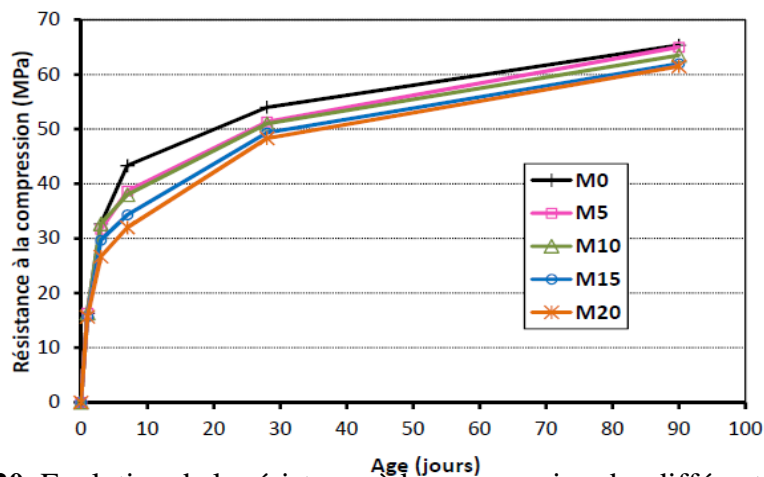


Figure III.20. Evolution de la résistance à la compression des différents mortiers (5)

Il a donc observé que les valeurs de résistance diminuent avec l'augmentation du taux de remplacement du ciment par la perlite, en particulier au septième jour de durcissement. Cependant, il convient de noter que la différence s'est réduite progressivement au cours du temps, probablement en raison de la réaction pouzzolanique de la perlite naturelle avec la portlandite issue de l'hydratation des phases silicates du clinker (C_3S et C_2S). En effet, il a été montré que le gel CSH secondaire résultant de la réaction pouzzolanique après dépôt dans les

pores, engendre l'augmentation de la résistance à la compression des mortiers, en particulier à long terme (45) (Figure.III.21).

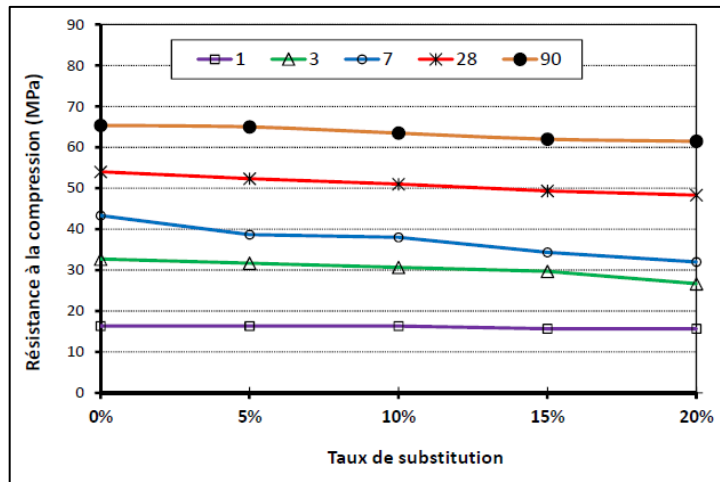


Figure III.21. Variation des résistances des mortiers à la perlite en fonction du taux de substitution (5)

Les résultats de la résistance à la compression de Geunanou (17) sont regroupés dans le tableau III.14. La figure III.22 montre le développement de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant différents pourcentages d'ajouts. Les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute de résistance.

Tableau III.14. Résistance à la compression en fonction de l'âge des différents mortiers (17).

Formulations	Résistances MPa					
	7 j	28 j	60 j	90 j	180 j	360 j
M0	27.2	42.9	47	51	53	53.7
M10	22.8	36.4	41.1	44.4	49.9	54.2
M20	19.9	33.7	41	45.5	54.8	57.1
M30	16.1	28.4	35.6	40.2	47	50.5

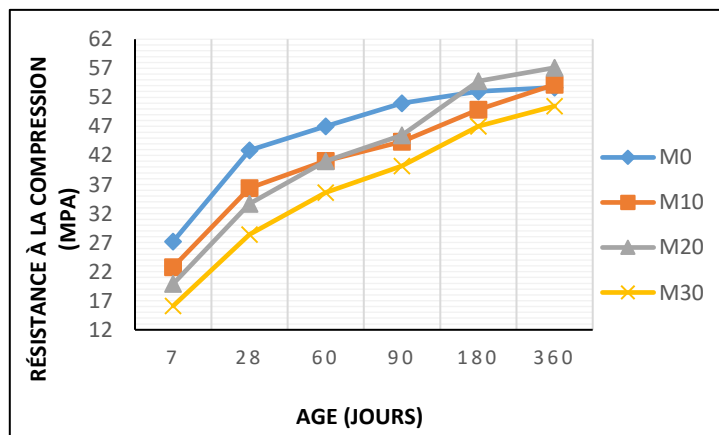


Figure III.22. Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des différents mortiers (17).

La résistance des mortiers diminue avec l'augmentation du taux de substitution de la perlite à des âges inférieurs à 90 jours. En effet, elle passe d'un écart de 16% à 40% à l'âge de 07 jours à un écart de 10% à 21% à l'âge de 90 jours par rapport à celle du témoin pour des dosages en perlite allant de 10 à 30%. Cet écart a tendance à diminuer en fonction du temps. A l'âge de 180 jours et 360 jours, un gain de résistance de 3% et de 6%, respectivement pour un taux de substitution de 20% en perlite. Même, pour les mortiers élaborés avec 30% de perlite, l'écart de résistance diminue à une valeur de 6% à 360 jours. Au-delà de 90 jours que la résistance du mortier M2 se développe rapidement par rapport à celle des autres mortiers.

Les mortiers élaborés avec de la perlite développent des résistances comparables et même supérieures à celles du mortier témoin à long terme (180 et 360 jours). Ceci est attribué probablement à l'activité pouzzolanique de l'ajout de perlite qui est lente au jeune âge et s'accélère à long terme. Cette activité consiste à fixer la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libérée par l'hydratation du CEM I pour donner naissance à des silicates de calcium hydratés CSH supplémentaires de deuxième génération contribuant ainsi au développement de la résistance.

III.3.2.4. Résistance à la traction

Selon la (Figure III.23) les résistances à la traction de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute avant 28 jours. Au-delà de cette échéance une augmentation lente et une chute de résistance pour les mortiers avec 30% d'ajout de la perlite sont constatées [15].

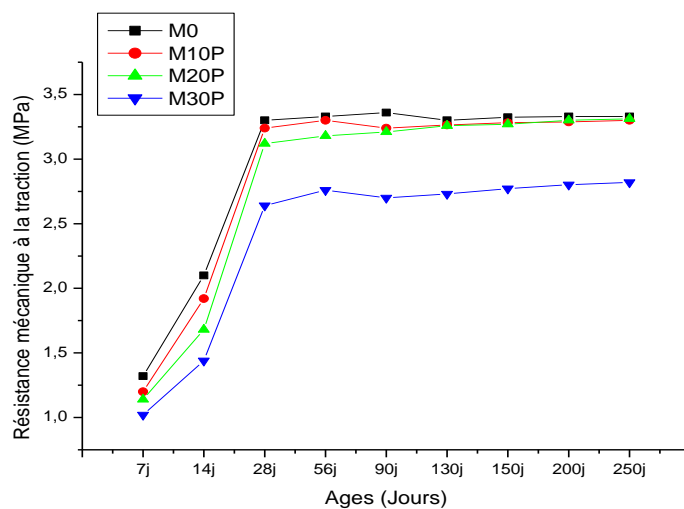


Figure III.23. Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des mortiers à base de perlite (15)

Contrairement aux résultats précédents 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 puis à long terme la résistance des mortiers à 20% de perlite et supérieure à celle des mortiers à 10% de perlite et au mortier de référence (43) (Figure III.24).

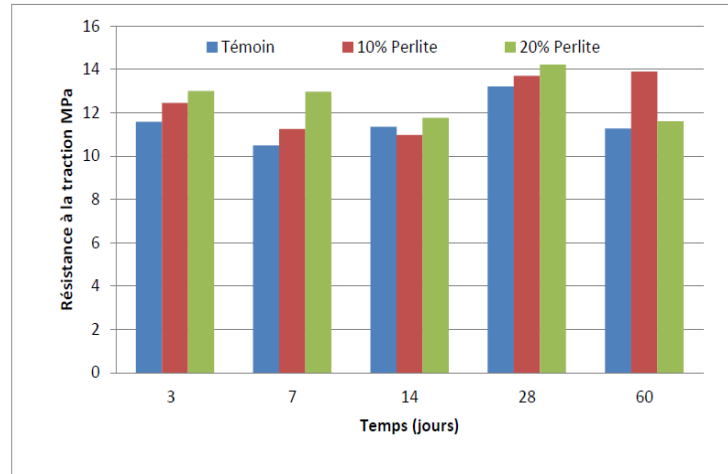


Figure III.24. Evolution des résistances à la traction (MPa) (43).

L'étude de Benhadjar et al (44), a montré l'influence de l'incorporation de la perlite sur la résistance à la traction des mortiers à l'âge de 3, 7, 14 jours (Figure III.25) où la résistance est supérieure par rapport celle du mortier témoin, ce qui montre que la résistance à la flexion augmente avec l'augmentation du pourcentage en perlite à l'âge 3, 7 jours. A 14 jours le mortier à 15% de perlite affiche des résistances supérieures à celles des autres mortiers (figure III.25).

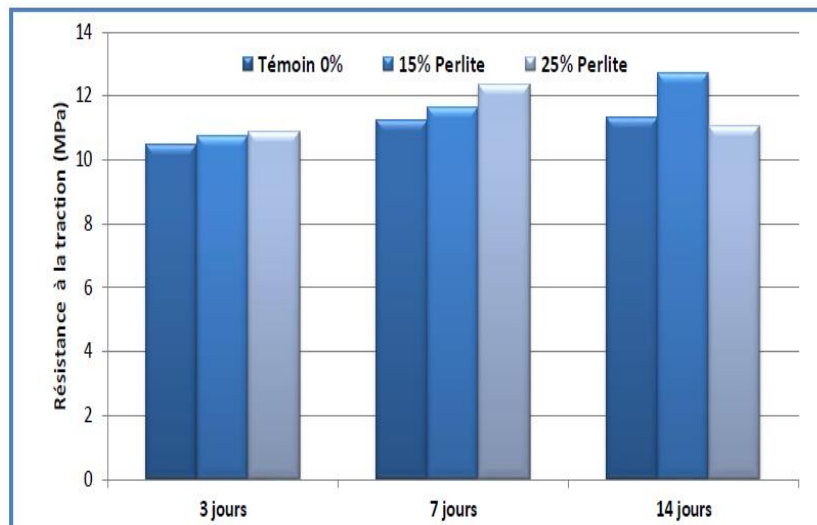


Figure III.25. Evolution des résistances à la traction (MPa) (44),

Les résultats de la résistance à la flexion selon les résultats de Geunanou (17) sont regroupés dans le tableau III.15. La figure III.26 montre le développement de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers contenant différents pourcentages d'ajouts. Les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute de résistance. La figure III-25 présente l'effet du taux de substitution de la perlite sur le pourcentage de la résistance à la flexion des mortiers aux différentes échéances. L'augmentation du dosage de la perlite a un effet négatif sur la résistance à la flexion, Les mortiers élaborés avec 10% et 20% de la perlite, développent des résistances supérieures ou

comparables à celles du mortier témoin à long terme. Ceci peut être attribué à l'activité pouzzolanique qui est lente au jeune âge et se développe à long terme.

Tableau III.15. Résistance à la flexion en fonction de l'âge des différents mortiers (17).

Formulations	Résistances MPa					
	7 j	28 j	60 j	90 j	180 j	360 j
M0	4.4	6	6.3	7.2	7.4	7.6
M10	3.9	5.1	5.8	7	7.3	8.1
M20	3.7	4.6	5.3	7	7.6	8.5
M30	3.1	4.1	5	6.7	6.9	7.4

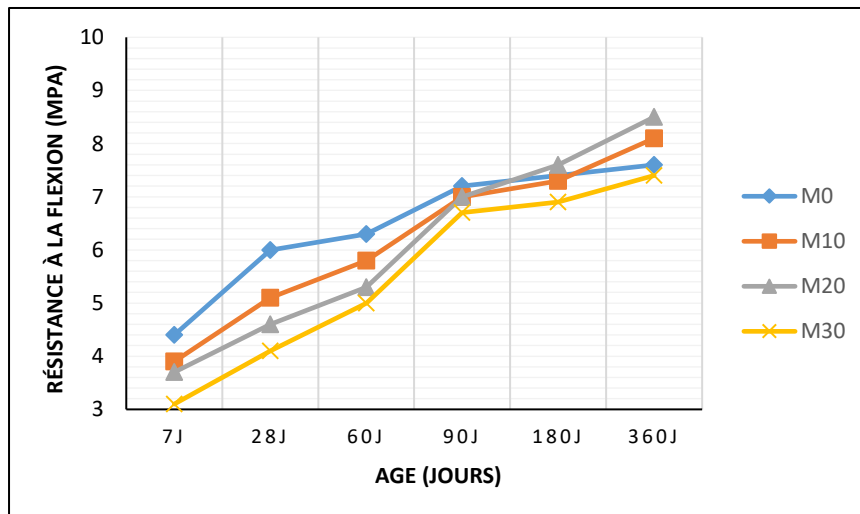


Figure III.26. Evolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des différents mortiers (17).

III.4. CONCLUSION

Ce chapitre avait pour but de synthétiser les recherches précédentes effectuées sur les mortiers à l'état frais et durci à base de perlite naturelle de Maghnia. Plusieurs essais expérimentaux ont été élaborés tels que la consistance, la maniabilité, début et fin de prise, résistance à la compression et à la traction, absorption capillaire et conductivité thermique.

Les résultats issus de ces recherches présentent des concordances mais aussi des contradictions. En effet les matériaux utilisés ainsi que les méthodes de formulations étudiées diffèrent d'un auteur à l'autre ce qui rend la comparaison difficile.

D'une façon générale, il apparaît que la perlite affecte sensiblement les mélanges de sorte que pour obtenir un mélange maniable, l'utilisation d'un plastifiant ou l'augmentation de la quantité d'eau afin d'obtenir une maniabilité comparable à celle du mortier de ciment pur est nécessaire, d'où la conclusion que la perlite diminue la maniabilité des mortiers. L'augmentation du rapport E/C est directement liée à la croissance du dosage en perlite pour avoir une consistance normale, ainsi que les temps de prise (début et fin) sont accélérés avec l'ajout de la perlite naturelle. On outre, l'influence de la perlite naturelle sur l'absorption d'eau des mortiers est très avantageuse

puisqu'elle permet une réduction importante des pores dans la pâte durcie et les interfaces entre cette dernière et les grains de sable sont remplis par ces ajouts. D'autre part, Il apparaît que plus la valeur de la résistance thermique R_{th} d'une paroi est élevée, plus le matériau est isolant ce qui signifie qu'une bonne amélioration de l'isolation thermique. Les résistances à la compression des mortiers à base de perlite développent des caractéristiques mécaniques dépassant celle du mortier témoin à long terme et cela dû aux l'effet pouzzolanique de la perlite, la traction de tous les mortiers augmente régulièrement avec l'âge où la résistance est supérieure par rapport celle du mortier témoin, ce qui montre que la résistance à la flexion augmente avec l'augmentation du pourcentage en perlite.

PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

L'industrie des matériaux de construction connaît un essor considérable en Algérie, parmi ces matériaux se trouve le ciment qui est essentiel, capital et nettement primordial. En effet, ce n'est pas les qualificatifs qui manquent. Par ailleurs, sa production en Algérie est passée de 22 millions de tonnes en 2017 et a plus de 40 millions de tonnes cette année (46), cependant cette augmentation de production est responsable d'une importante émission de gaz à effet de serre.

Il est en revanche plus difficile de réduire les émissions générées par la réaction chimique nécessaire à la fabrication du ciment, la recherche actuelle sur les matériaux travaille sur le développement de nouveaux substituants au ciment comme étant les seules alternatives pour augmenter la production, réduire le prix et régler les problèmes d'environnement.

Plusieurs matériaux pouzzolaniques existent en Algérie en l'occurrence la perlite naturelle de Maghnia. La valorisation de la perlite dans les matériaux cimentaires est une technologie nouvelle et moins utilisée dans le domaine de construction, elle vise non seulement à réduire la consommation des matières premières et de l'énergie mais aussi à améliorer les propriétés physico-chimiques, mécaniques et thermiques des mortiers et bétons.

Malheureusement la valorisation et l'exploitation de la perlite représentent pour la recherche un champ encore vierge et insuffisamment exploité, cela est dû essentiellement à la rareté des documents techniques et l'inexistence d'une bibliographie suffisante.

Le bilan de l'étude bibliographique fait apparaître des insuffisances notoires dans la connaissance des propriétés physiques, mécaniques et thermiques des matériaux composites tels que les mortiers à base de perlite. Très peu de réponses sont apportées actuellement.

Pour contribuer à enrichir et approfondir les recherches entamées sur la perlite, notre étude a été engagée pour mettre en valeur un matériau naturel tel que la perlite en l'utilisant comme composant du mortier répondant à des normes acceptables.

L'objectif de ce travail est triple :

Economique : la perlite de Maghnia, à l'instar des additions naturelles, peut constituer un composant du mortier substituable partiellement au ciment. Comme liant, la perlite peut assurer une économie dans la consommation du ciment dont le prix ne cesse d'augmenter et une réduction de sa fabrication portant préjudice à la qualité de l'air.

Ecologique : l'utilisation de la perlite en tant que substitut partiel contribue à freiner la cadence de la production du ciment et par conséquent à la diminution des quantités de gaz à effet de serre générées par sa la fabrication. Par ailleurs, de par les caractéristiques thermo-physiques des mortiers à base de perlite, ils peuvent contribuer à l'isolation thermique. Ceci permet de réduire les pertes d'énergie et ainsi préserver l'environnement et offrir un confort thermique.

Technologique : Une optimisation du pourcentage de substitution du ciment par la perlite naturelle de Hammam Boughrara (Maghnia), pour trouver un compromis entre les avantages et les inconvénients de cette substitution partielle, pour l'élaboration d'un mortier incorporant 10 et 20% de perlite, à performances proches ou égales à celles du mortier témoin.

Une question à laquelle une réponse s'impose est :

Sera-t-il-possible d'obtenir un mortier répondant aux normes et ayant un bon comportement mécanique et thermique à partir d'une substitution allant jusqu'à 20 % d'une quantité de ciment par une quantité de perlite en volume ?

Pour répondre à cette question un programme expérimental a été engagé afin d'étudier les différents comportements à l'état frais et durci des mortiers à base de 10 et 20% de perlite et d'un mortier sans ajout en guise de comparaison.

Partie II

Programme expérimental

CHAPITRE I : MATERIAUX UTILISES

I.1. INTRODUCTION

Le dosage et la nature de l'addition sont des facteurs qui influencent considérablement sur le comportement à l'état frais et à l'état durci des mortiers.

Ce travail vise à apporter une contribution à la valorisation de la perlite de Hammam Boughrara, en tant qu'une substitution partielle dans la composition de mortiers. Il s'agit de comparer l'influence de cet ajout sur des différents mortiers incorporant ce matériau à (3,7, 14, 28, 60 et 90 jours).

Les différentes caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques de tous les matériaux entrant dans la composition des mortiers à base de 10% et 20% de perlite, sont décrites dans ce chapitre.

Tous les essais expérimentaux ont été effectués dans les laboratoires suivants :

- Laboratoire pédagogique de matériaux de construction, Département de Génie Civil de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.
- Laboratoire Construction, Transport et Protection de l'Environnement (LCTPE), Faculté des Sciences, Université de Mostaganem.
- Laboratoire pédagogique de géotechnique, Département de Génie Civil de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.
- Laboratoire matériaux (LABMAT) de l'école nationale polytechnique Maurice Audin d'Oran.

I.2. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

La connaissance des propriétés des matériaux est fondamentale dans toutes les études, le respect des exigences de sécurité des constructions, de confort et l'environnement et directement liées aux performances et capacités des matériaux.

I.2.1. Le ciment

Un seul type de ciment a été utilisé pour les différentes compositions, il s'agit du ciment résistant aux sulfates (CRS) CEM I 42,5 R.

Ce ciment présente une résistance moyenne en compression à 28 jours de 42,5 MPa, est constitué de : 95% de clinker, des constituants secondaires (de 0 à 5%) peuvent être incorporés dans ce ciment et du sulfate de calcium sous forme de gypse est rajouté en tant que régulateur de prise.

1.2.1.1. Caractéristiques chimiques et minéralogiques

Dans notre étude le ciment utilisé provenant du groupe GICA. La proportion chimique et minéralogique du ciment varie en fonction de l'état physique ou du traitement thermique subit par le matériau pendant le processus de sa fabrication.

Les compositions chimiques du ciment et minéralogique du clinker sont données respectivement par les tableaux I.1 et I.2.

Tableau I.1. Composition chimique élémentaire de ciment (CRS) (%) (GICA).

Les oxydes	Pourcentages %
Silicate tri calcique C_3S	59.68
Silicate bi calcique C_2S	12.52
Aluminate tricalcique C_3A	2.62
Alummino-ferrite tetracalcique C_4AF	16.73

Tableau I.2. Composition minéralogique du clinker.

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Cl
63.10	20.0	4.50	5.50	2.50	0.60	0.20	2.00	0.02

1.2.1.2. Caractéristiques physico-mécaniques

Les caractéristiques physico-mécaniques du ciment CRS est donne dans le tableau I.3.

Tableau I.3. Les caractéristiques physico-mécaniques du ciment.

Expansion à chaud	Surface spécifique de Blaine	Résistance à la compression		Temps de début de prise	Chaleur d'hydratation
		02 Jours	28 jours		
0 -5 mm	3000 à 3800 cm ² /g	≥ 20 N/mm ²	≥ 42.5 N/mm ²	60 min – 150 min	≤270j/g

La masse volumique du ciment

La masse volumique apparente est obtenue par la pesée d'un récipient d'un litre rempli de ciment comme le montre la figure I.1.



Figure I.1. La masse volumique apparente du ciment.

La masse volumique absolue du ciment a été déterminée selon la NF P 18-555 par le pycnomètre et le benzène figure I.2.

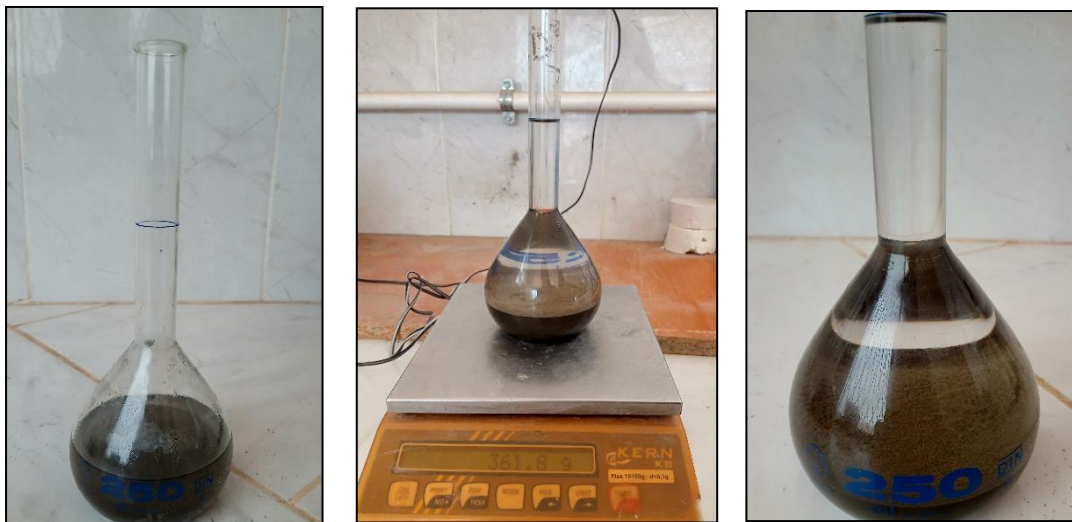


Figure I.2. Masse volumique absolue du ciment CRS CEM I 42.5 R.

La finesse

L'étude de la finesse de mouture, pour les liants est indispensable puisqu'il influe considérablement sur la résistance mécanique, la maniabilité...etc. La finesse d'un ciment peut être caractérisée par sa surface massique : c'est la surface totale des grains contenus dans une unité de masse exprimée en m^2 / kg de poudre ou (cm^2 / g) .

Elle est calculée en fonction du temps au moyen de l'appareil appelé « Perméabilimètre de Blaine » (EN 196-6).

Le tableau I.4 résume les caractéristiques physiques du ciment utilisé dans notre étude.

Tableau.I.4. Caractéristiques physiques du ciment CRS

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.01
Masse volumique absolue (g/cm ³)	3.05
Finesse (cm ² /g)	2869
Perte de feu	≤1%
Résidu insoluble	0.5 % - 1 %
Densité	0.950 à 1.10
Refus sur tamis 45 micron	≥ 20%

I.2.2. Perlite naturelle

La perlite naturelle utilisée est extraite du gisement de Hammam Bouhrara situé à Maghnia. Ce matériau sous forme de roches, après concassage a été séché à 105 °C dans une étuve pendant 24 heures pour éliminer l'eau libre, puis broyé (Figure I.3).

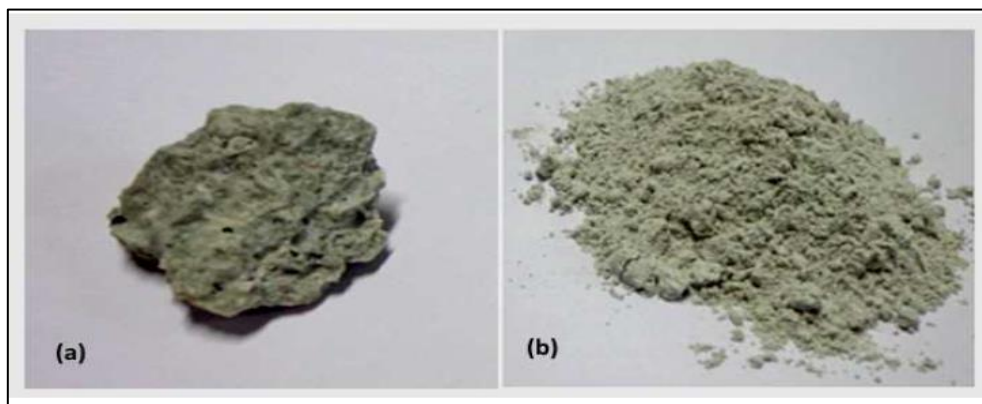


Figure I.3. (a) Roche de la perlite naturelle avant broyage, (b) Poudre de la perlite naturelle après broyage(5).

I.2.2.1. Caractéristiques chimiques

La composition chimique de la perlite naturelle, est donnée dans le tableau I.5.

Tableau I.5. Composition chimique élémentaire de la perlite naturelle.

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Cl	PAF
2.24	72.29	14.24	2.44	0.02	2.74	2.78	0.53	0.26	2.36

I.2.2.2. Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques de la perlite naturelle, est donnée dans le tableau I.6.

Tableau I.6. Caractéristiques physiques de la perlite naturelle(5).

Désignation	Propriété	Désignation	Propriété
Couleur	Gris	La finesse au tamis 45 μm	12 %
Masse volumique absolue	2.6 g/cm ³ .	Surface spécifique de Blaine	4230 cm ² /g

Le diagramme (Figure I.4) montre que la perlite naturelle est composée de minéraux courants pour une substance volcanique avec principalement du quartz, anorthite et biotite. Aucun minéral hydraulique n'a été reconnu dans ce matériau, néanmoins le décolllement de la ligne de base du diffractogramme sous forme d'une bosse nous indique la présence d'une phase amorphe potentiellement réactive.

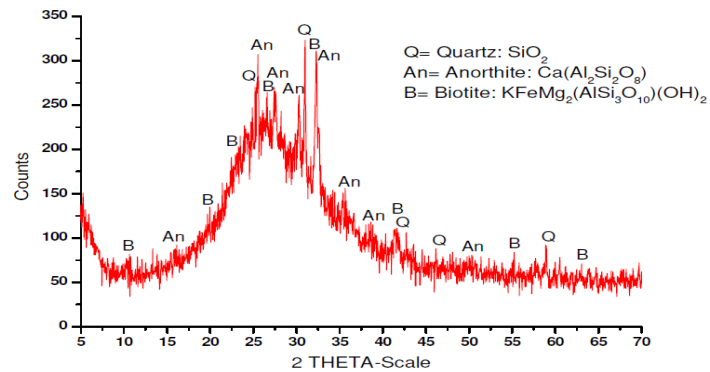


Figure I.4. Le diffractogramme aux rayons X de la perlite naturelle(5).

I.2.3. Le sable

Le sable utilisé est un sable siliceux provenant de la société Adwan, zone industrielle Fornaka à Mostaganem (Figure I.5).



Figure I.5. Le sable siliceux de la société Adwan.

I.2.3.1. Caractéristiques chimiques du sable

La composition chimique du sable, est donnée dans le tableau I.7.

Tableau I.7. Composition chimique du sable (Adwan).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	TiO ₂	H ₂ O	L.O.I
97.2%	3.70%	0.30%	0.003%	0.240%	0.023%	0.02%	0.24%

I.2.3.2. Caractéristiques physiques du sable

La masse volumique apparente est obtenue par la pesée d'un récipient d'un litre rempli de ciment comme le montre la figure I.6.



Figure I.6. La masse volumique apparente du sable.

La masse volumique absolue est déterminée comme suit

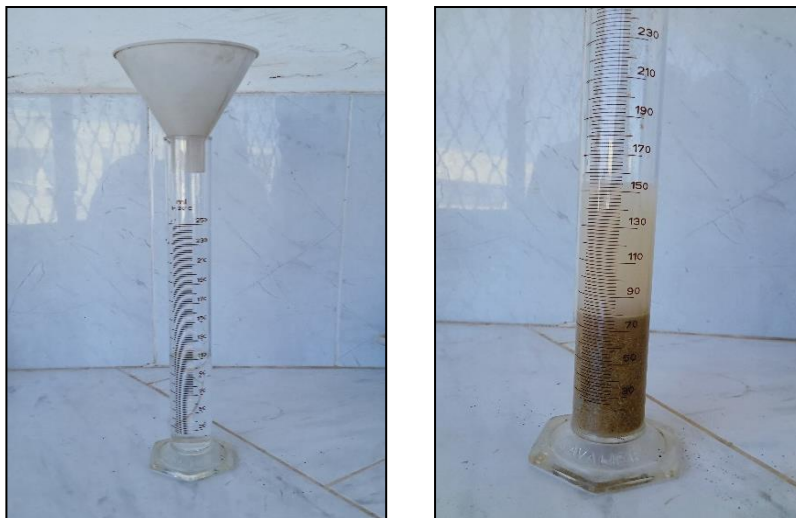


Figure I.6. La masse volumique absolue du sable.

L'équivalent de sable est déterminé avec deux méthodes différentes visuel et avec le piston

La procédure de l'équivalent de sable visuel est montrée dans la figure I.7.

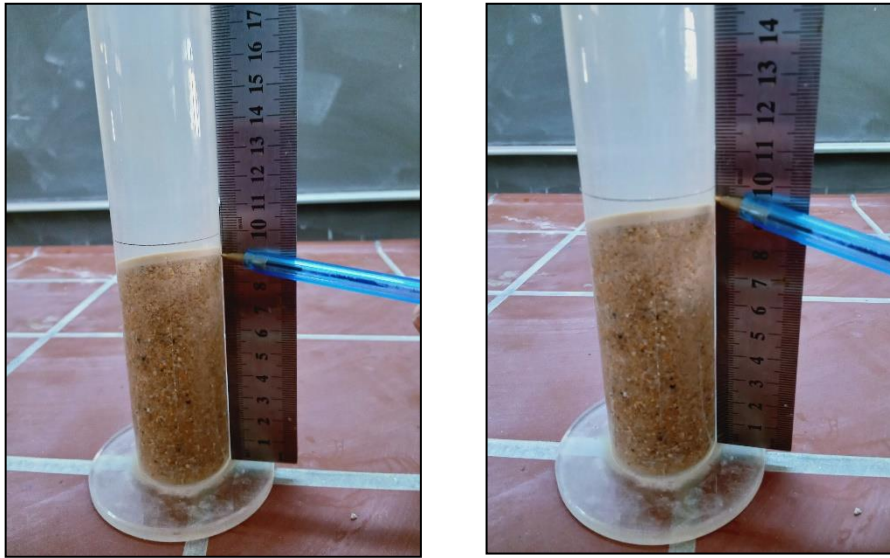


Figure I.7. Équivalent de sable visuel.

La procédure de l'équivalent de sable avec piston est montrée dans la figure I.8.



Figure I.8. Équivalent de sable avec piston.

D'après les résultats des essais d'équivalent de sable $E_s > 85 \%$ de cela on déduit d'après la norme [NF P 18-598] que le sable est très propre est l'absence des fines est presque totale.

Le module de finesse est égal au 1/100 de la somme des refus cumulé selon la norme [NFP 18-540].

Le Tableau I.8 résume les caractéristiques physiques du sable utilisé dans notre étude.

Tableau I.8. Les caractéristiques physiques du sable siliceux.

Caractéristiques		Sable siliceux
Masse volumique apparente (g/cm ³)		1.62
Masse volumique absolue (g/cm ³)		2.79
Equivalent de sable (%)	Visuel	96.84
	Piston	92.70
Module de finesse		1.94
Pourcentage de fines (%)		1

I.2.3.3. Composition granulométrique

La composition granulométrique du sable siliceux utilisée dans nos mélanges dans le tableau I.7, figure I.9.

Tableau I.7. La granulométrie du sable utilisé.

Tamis (mm)	1.6	1	0.5	0.16	0.08	Fond
Refus (g)	94.5	351	459	270	162	13.5
Tamisât (%)	93	67	33	13	1	/

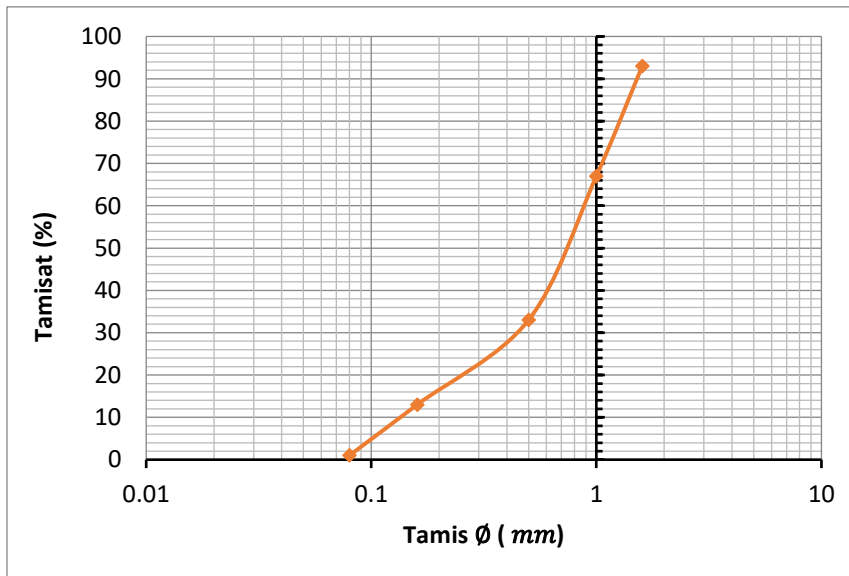


Figure I.9. Courbe granulométrique du sable.

I.2.4. Adjuvant

L'adjuvant utilisé dans nos mélanges est le PLASTIMENT BV 40 qui est un plastifiant réducteur d'eau énergétique qui augmente la compacité du béton et facilite sa mise en place entraînant ainsi une amélioration des résistances mécaniques et diminue l'absorption capillaire des bétons. Il permet de réduire l'eau de gâchage d'environ 10 % sans diminuer la maniabilité du témoin et d'améliorer la maniabilité à teneur en eau constante (Voir fiche technique en annexe). Les caractéristiques physiques et chimiques du BV 40 sont résumées dans le tableau I.8.

Tableau I.8. Caractéristiques physiques et chimique de l'adjuvant.

Caractéristiques	
Aspect	Liquide brun clair
Densité	1,040± 0,015
PH	4.5 ± 1
Teneur en Na₂O	≤ 0.5 %
Teneur en chlore	< 0,1 %
Extrait sec	36,6 ± 40.4 %
Teneur en ions Cl⁻	≤ 0,1 %
Plage du dosage Recommandée	0,3 à 1% du poids du ciment

I.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons identifié tous les matériaux entrant dans la composition des mortiers (ciment, perlite, sable et adjuvant). Ce qui constitue une étape indispensable avant d'entamer l'étude expérimentale de ces mortiers. Nous avons identifié les caractéristiques physico-chimiques de chaque matériau ce qui nous facilite à faire les essais et comprendre leur effet.

CHAPITRE II : LES METHODES EXPERIMENTALES SUR LES MORTIERS A BASE DE LA PERLITE

II.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons exposer les différents essais expérimentaux durant notre recherche, Ces essais ont été effectués pour l'étude des propriétés des mortiers à base de 10 et 20 % de perlite.

Nous précisons également les différentes méthodes d'essais utilisés Selon l'état frais et l'état durci de notre mélange ainsi que leurs modes opératoires et les références de leurs normes correspondantes.

Un mortier témoin sans perlite a été élaboré pour les besoins de comparaison avec les échéances de différents pourcentages de perlite.

Parmi les essais effectués on site : la consistance (début et fin de prise), la maniabilité des différents mortiers a l'état frais ; et l'absorption capillaire, conductivité thermique, et essais mécaniques traction compression selon l'état durci.

II.2. FORMULATION ET PREPARATION DES MELANGES

II.2.1. Formulation et préparation des pâtes

Différentes pâtes ont été produits par la substitution du ciment résiste aux sulfates (CRS) avec diverses proportions de la perlite naturelle (10 et 20% du poids du ciment). Le tableau II.1 fournit les détails de différents liants composés.

Tableau II.1. Détails des différents liants composés.

Désignation	Liants	Ciment (g)	La perlite naturelle (g)
P0	100 % CRS	500	0
P10	90% CRS + 10% P	450	50
P20	80% CRS + 20% P	400	100

La préparation de la pâte de différents liants est faite conformément aux prescriptions de la Norme [EN-196-3]. Le liant et l'eau ont été préalablement pesés sur une balance de précision $\pm 0.01g$. Le mélange a été malaxé dans un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 3 litres.

II.2.2. Formulation et préparation des mortiers

Des mélanges de mortier ont été réalisés à partir du ciment résistant aux sulfates CEM I 42,5, on utilise un rapport de masse d'eau-ciment de 0,5. Les rapports d'eau-ciment est constantes pour les mortiers préparés à base de CRS contenant les différents pourcentages de la perlite. Deux mélanges obtenus suite au remplacement partiel en volume du ciment par différentes

pourcentages perlite. Pour chaque liant, on a réalisé des mélanges du mortier conformément le témoin maniable. Les mortiers sont destinés pour la confection des éprouvettes de dimensions de (4x4x16) cm³. Le tableau II.2 fournit les détails des mélanges de chaque mortier

Tableau II.2. Formulations des mortiers.

	M0p	M10%p	M20%p
E/C	0.5	0.5	0.5
Perlite /C	0	0.1	0.2
Sable (g)	1350	1350	1350
Ciment (g)	450	427.6	407.73
Perlite (g)	0	42.76	81.54
Eau (g)	225	213.8	203.86
Adjuvant (g)	0	0.3	1
Vol. de la pâte (cm ³)	368.8	368.8	368.8

II.2.2.1. 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 :

Le sable et le ciment à tester sont gâchés avec de l'eau dont les proportions : 450 ± 2g du ciment, 1350 ± 5g du sable et un pourcentage d'eau.

Avant d'être utilisé pour les différents essais mécaniques, ce mortier est malaxé pendant 4 minutes.

Introduire le sable en premier dans l'entenoire du malaxeur, introduire l'eau dans le récipient ensuite verser le ciment, après ça, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.

Après 30 s de malaxage introduire régulièrement sable pendant les 30 s suivantes.

Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 60 s supplémentaires.

Arrêter le malaxeur, enlever au moyen d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.

Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.

Les opérations de malaxage selon la norme [la norme en 196-3]. Sont récapitulées dans le tableau.II.3.

Tableau II.3. Conduite des opérations du malaxage.

Opération	Introduire du l'eau	Introduire du ciment		Introduire su sable		Raclage de la cuve	
Duré			30s	30s	60s		60s
Etats du malaxeur	Arrêt				Vitesse rapide	Arrêt	Vitesse rapide

II.3. Méthodes d'essais

Les méthodes des essais de cette étude formée à deux types d'essais : à l'état frais et à l'état durci.

II.3.1. Les essais à l'état frais

II.3.1.1. Essai de consistance et de prise sur pâtes

Le principe d'essai consiste à suivre la transformation d'état d'un matériau visqueux, facile à travailler à l'état d'un matériau durci (plus difficile voire impossible à travailler).

Le temps de début de prise est déterminé à l'instant où l'aiguille de Vicat ($S = 1 \text{ mm}^2$, masse = 300 g) ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment à consistance normalisée.

En effet, pour chaque liant utilisé, il y'a une teneur en eau nécessaire qui donne à la pâte une consistance dite « normale ».

La détermination de cette teneur en eau est en fait un préalable à la mesure de la prise. L'appareil de Vicat est utilisé à la fois pour la détermination de la consistance normale ainsi qu'à la mesure du temps de début de prise selon la norme [EN-196-3].

Objectif de l'essai

La consistance de la pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité. L'objectif est de définir une telle consistance dite « CONSISTANCE NORMALISEE ».

Équipement nécessaire

- Un malaxeur.
 - Un appareil de VICAT.
- L'appareil de VICAT est composé d'un moule tronconique ($h=40 \text{ mm}$ et d)
- Une balance permettant de peser 1g près.
 - Une Chronomètre précis à 1s près.

Conduite de l'essai

Préparer 500 g de ciment, une pâte pure de rapport $E/C=0,25$ (rapport de départ).

Verser l'eau dans la cuve du malaxeur contenant le ciment.

Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le tableau II.4.

Quatre minutes après le début du malaxage, la sonde est amenée à la surface supérieure de l'échantillon (Moule tronconique) et relâchée sans élan. La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), on mesure la distance d séparant l'extrémité de la sonde et de la plaque de base. (Figure II.1) (Figure II.2)

Tableau II.4. Opérations du malaxage [LA NORME EN 196-3].

Opération	Introduire du l'eau	Introduire du ciment	Malaxage	Raclage de la cuve	Malaxage
Duré	5 < t < 10 sec		90 sec	15 sec	90 sec
Etats du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente	Arrêt	Vitesse lente



Figure II.1. Essai de consistance et de prise avec appareil de Vicat.

- Cette distance (d) caractérise la consistance de la pâte étudiée.
- Si $d = 6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, l'essai est concluant et la consistance est normale.
- Si $d \leq 5 \text{ mm}$, la pâte est trop mouillée et il faut recommencer l'essai avec moins d'eau.
- Si $d \geq 7 \text{ mm}$, la pâte est trop ferme et il faut recommencer l'essai avec plus d'eau.

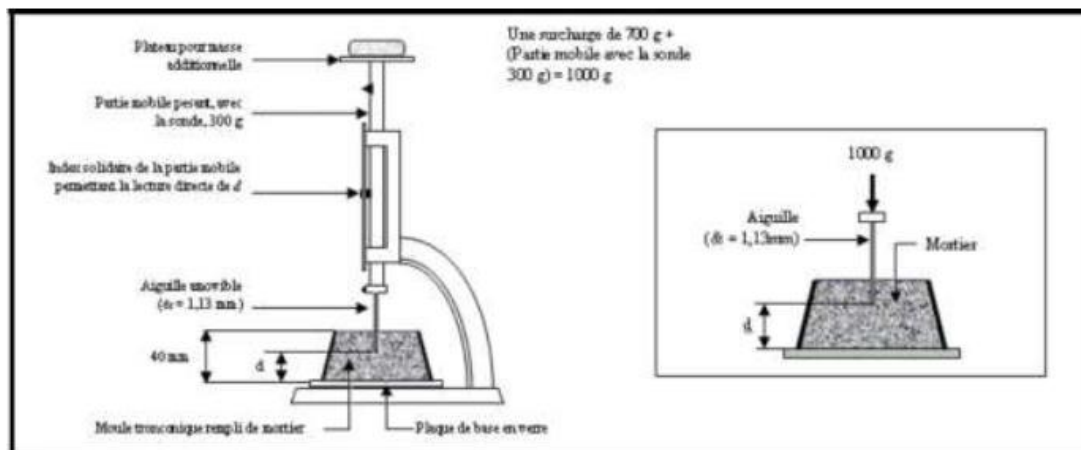


Figure II.2. Essai de prise avec appareil de Vicat.

II.3.1.2. Essais sur mortiers

A. Essai de maniabilité

La maniabilité est la qualité essentielle du mortier permettant la facilité de leur mise en place. La teneur en eau est le paramètre le plus important pouvant affecter la maniabilité, L'essai de maniabilité est caractérisé par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration. En effet la maniabilité dépend :

- De la granulométrie et du rapport eau/ciment, en particulier, plus le rapport eau/ciment est élevé, plus la granulométrie ne doit être fine pour obtenir une grande maniabilité.
- Du temps et des conditions d'humidité des granulats.
- De même qu'une quantité de l'eau peut être perdue par évaporation, notamment si le mortier est exposé au soleil, au vent ou si une partie de l'eau est utilisée par les réactions chimiques initiales du ciment.
- De la température ; pour un mortier fabriqué au laboratoire, lorsque la température est élevée, la teneur en eau doit être augmentée si l'on veut maintenir la maniabilité initiale constante.

Equipement utilisé

La maniabilité du mortier frais est déterminée à l'aide du maniabilimètre, L'appareil utilisé est schématisé sur la (Figure II.3). Il consiste en un boîtier Parallélépipédique métallique (9cm×10cm×20cm), posé sur des supports en caoutchouc, Équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible.



FigureII.3. Maniabilimètre

Conduite de l'essai

Le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison et mis en place par piquage en 3 couches. 4 minutes après la fin du malaxage, la cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibrateur et le déclenchement d'un chronomètre par l'opérateur. Sous l'effet de la vibration le mortier s'écoule (Figure II.4) (Figure II.5). Le chronomètre est arrêté quand le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier. Le temps t mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance.

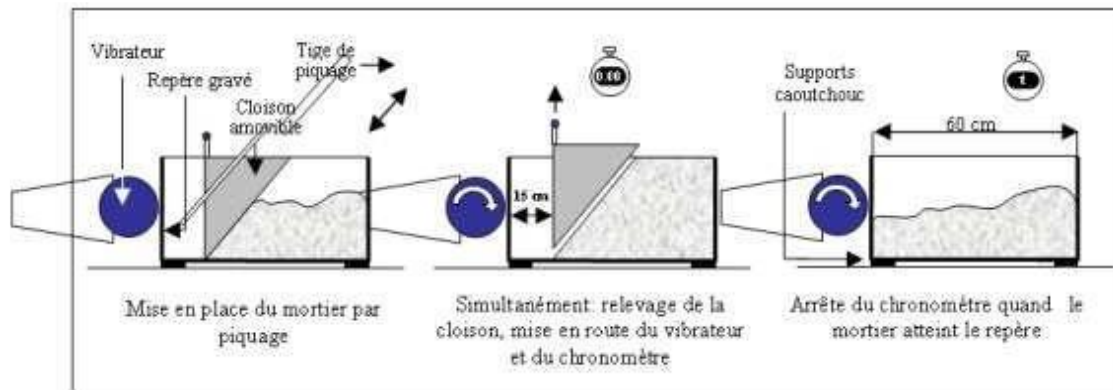


Figure II.4. Procédure de l'essai de maniabilité.

Le temps t mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide ou plus maniable, comme illustré dans le Tableau II.5, Figure II.5.

Tableau II.5. Classe de consistance selon la durée d'écoulement [LA NORME EN 206-1].

Class de consistance	Durée en (s)
Ferme	$t \geq 40$
Plastique	$20 < t \leq 30$
Très plastique	$10 < t \leq 20$
Fluide	$t \leq 10$



Figure II.5. Procédure de l'essai de maniabilité.

B. Confection des mortiers

Mélanger le sable normalisé avec le ciment (avec ou sans ajout) et l'eau dans les proportions données par le tableau II.6.

Avant d'être utilisé pour l'identification de caractéristiques physique et/ou mécanique ce mortier est malaxé pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme [EN 196-1].

Introduire l'eau en premier (avec plastifiant pour mortier avec ajout) dans la cuve du malaxeur (Figure II.6), y verser ensuite le ciment ; aussitôt après, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.



Figure II.6. Les étapes du malaxage du mortier.

Après 30 s de malaxage introduire régulièrement le sable pendant les 30s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.

Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci. Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.

Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le Tableau II.6 (Figure II.6).

Tableau II.6. Les opérations du malaxage [LA NORME EN 196-1].

Opération	Introduire du l'eau	Introduire du ciment		Introduire su sable		Raclage de la cuve	
Duré			30s	30s	60s		60s
Etats du malaxeur	Arrêt				Vitesse rapide	Arrêt	Vitesse rapide

C. Confection des éprouvettes

Le mortier prêt, le verser immédiatement dans des moules prismatiques (4x4x16 cm³), la mise en place est réalisée par vibration.

Introduire dans chacun des compartiments des moules une fraction du mortier en première couche à l'aide d'une spatule, et doit être bien tassé. Vibrer ces moules à raison de 30s sur la table de vibration ensuite remplir la deuxième couche et vibrer encore à raison de 30s et puis araser le mortier avec une règle métallique.

Pour finir recouvrir les moules d'un film plastique pour éviter l'évaporation d'eau et mettre une étiquette sur les éprouvettes : date, nom du mortier (Figure II.7).



Figure II.7. Remplissage d'éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm³



Figure II.8. Les éprouvettes après démoulage et conservation.

Les éprouvettes sont conservées pendant 24 heures à 20 ± 2°C, recouvertes d'un film plastique pour éviter l'évaporation d'eau. Elles sont ensuite démoulées et conservées à 20 ± 2°C sous l'eau et d'autres éprouvettes à l'air libre. (Figure II.8).

II.3.2. Essais à l'état durci

II.3.2.1. Essais d'absorption capillaire

Principe

L'essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de mortier, dans des conditions spécifiées.

Appareillage

- Une balance d'une précision de 0,1 g.
- Un récipient pour contenir 9 éprouvettes, avec un socle plat et un couvercle ;
- Un dispositif permettant de maintenir un niveau d'eau constant dans le récipient ;
- Le matériel nécessaire à la préparation de prismes de mortier de $(4 \times 4 \times 16)$ cm³ conformes à [l'EN 196 -1].

Mode opératoire

La norme EN196-1 décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai. Avec le mortier normal préparé, on remplit un moule $4 \times 4 \times 16$ cm³. Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux couches et en les vibrer à chaque fois. Après quoi le moule est arasé ; recouvert d'un film plastique et entreposé dans la salle humide.

24h après le début de malaxage ; ces éprouvettes sont démoulées jusqu'au moment de l'essai.

- Peser les éprouvettes après 7 jours, puis les placer verticalement dans un récipient rempli d'eau à niveau constant. (FigureII.9).



Figure II.9. Eprouvettes dans le récipient en position verticale avec un niveau d'eau constant de 3mm.

- Laisser les éprouvettes reposer sur un fil de plastique pour permettre à l'eau d'accéder librement à leur base. Maintenir le niveau d'eau à (3 ± 1) mm au-dessus de leur base.
- Eviter tout contact entre les éprouvettes.
- Immédiatement après la mise en place des éprouvettes, poser le couvercle sur le récipient.

- Après 1 jour, sortir les éprouvettes du récipient, les essuyer légèrement avec un papier ou un chiffon sec afin d'éliminer l'eau excédentaire, puis les peser (M1) et les replacer dans le récipient en position verticale. Traiter toutes les éprouvettes individuellement de la même manière.
- On refait la pesée après 7 jours pour avoir M7 (Figure.II.10)



Figure II.10. La pesée des éprouvettes après 7 jours.

L'absorption capillaire (C) pour une échéance donnée est exprimée en grammes par centimètre carré, par la formule II. 1.

$$C = \frac{M_0 - M_j}{16} \quad (\text{II.1})$$

Où :

M_0 : est la masse de l'éprouvette après conservation dans l'air pendant 7 jours en grammes.

M_j : est la masse de l'éprouvette après le temps requis d'absorption, en grammes.

II.3.2.2. Détermination de l'indice d'activité Pouzzolanique

L'indice d'activité, noté i , est défini comme le rapport des résistances en compression $f_p(t)$ et $f_0(t)$, respectivement la résistance du mortier contenant une fraction p d'addition et la résistance du mortier témoin (sans addition). Au sens des normes [EN 450] et [NFP 18- 506], cet indice est déterminé pour $E/C = 0.5$ et $p = 0,25$ (la formule II. 2).

$$i(p) = \frac{f_p(t)}{f_0(t)} \quad (\text{II.2})$$

Des prismes de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ doivent être confectionnés pour les deux mortiers respectivement à base de ciment et à base de liant équivalent afin de mesurer les résistances en compression sur les demi-éprouvettes à 28 jours.

II.3.2.3. Etude thermo-physique

A. Mesure de la conductivité thermique

L'appareil utilisé Pour mesurer la conductivité thermique des mortiers est de type « Quickline Tm 30 » (Figure II.11).

C'est un instrument de mesure directe du coefficient de conductivité thermique, capacité volumétrique spécifique et la température en utilisant l'échange de sondes de surface, selon la norme ISO8302.



Figure II.11. Conductivimètre au laboratoire LABMAT

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

Les mesure des propriétés thermo physiques par "Quick line Tm 30" peut être, comme toutes les autres mesures, influencée par les conditions de mesure. Les facteurs qui influencent les mesures 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.

B. 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 Φ en W à travers la paroi et à la différence de température $\Delta\theta$ entre les deux faces par la formule II. 3 :

$$\Phi = \frac{\Delta\theta}{R} \quad (\text{II.3})$$

On définit également la résistance thermique surfacique (la formule II. 4) R_s , telle que :

$$R = \frac{R_s}{S} \quad (\text{II.4})$$

C'est la résistance thermique de la paroi pour une surface de 1 m^2 .

Dans le cas d'une paroi constituée de plusieurs couches de matériaux différents, les résistances thermiques s'additionnent, la formule II. 5 de R_{th} en fonction de la conductivité thermique est

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda} \quad (\text{II.5})$$

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.

II.3.2.4. Essais de résistances mécaniques

Objectif de l'essai

Il s'agit de vérifier la classe de résistance du ciment et suivre le comportement mécanique des différents mortiers.

Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer les résistances à la traction et à la compression d'éprouvettes de mortier normal. Dans un tel mortier la seule variable est le taux du substituant partiel au ciment.

Équipement nécessaire (norme EN 196-1)

- Un malaxeur normalisé.
- Des moules normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée 4 cm x 4 cm et de longueur 16 cm.
- Une machine d'essai de résistance à la flexion et à la compression (Figure II.13) permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150KN avec une vitesse de mise en charge de 50N/s ± 10N/s à 2400 N/s ± 200N/s. La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion (Figure II.12).



Figure II.12. Machine d'essais de résistance à la traction

Conduite de l'essai

La norme EN196-1 décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai. Avec le mortier normal préparé, on remplit un moule (4x4x16) cm³. Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux couches et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. Après quoi le moule est arasé ; recouvert d'un film plastique et entreposé dans la salle humide.

24h après le début de malaxage ; ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans l'eau 20°C ± 1°C jusqu'au moment de l'essai de rupture.

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure II.13 et figure II.14.

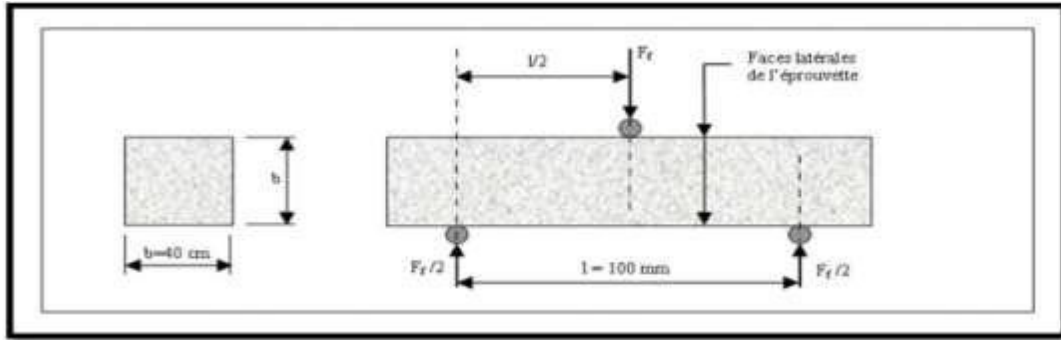


Figure.II.13. Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

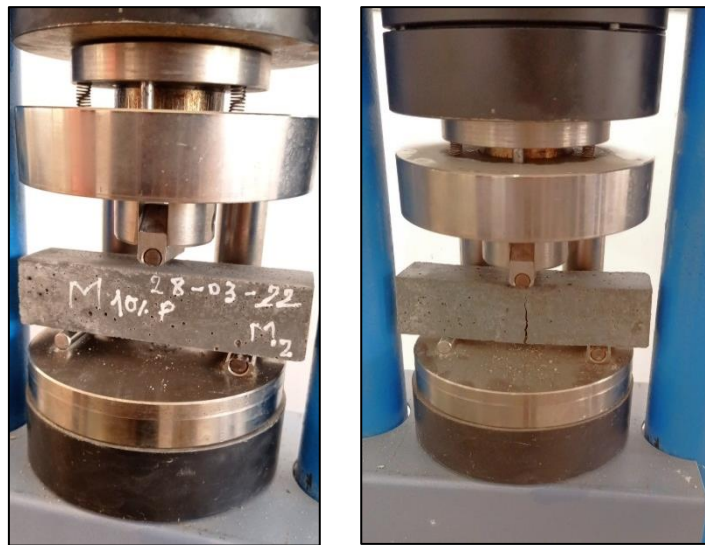


Figure II.14. Essai de résistance à la flexion.

Si F_f est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture par la formule II. 6 vaut :

$$\frac{F_f \cdot l}{4} \quad (\text{II.6})$$

Et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette par la formule II. 7 est :

$$R_f = \frac{1.5F_f}{b^3} \quad (\text{II.7})$$

Cette contrainte est appelée la résistance à la flexion. Compte tenu des dimensions b et l , Si F_f est exprimée en newtons (N). Cette résistance exprimée en mégapascals (MPa) la formule II. 8 vaut :

$$R_f = 2.34 \times 10^{-3} F_f \quad (\text{II.8})$$

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiqué sur la Figure II.15, Figure II.16. Si F_c est la charge de rupture, la contrainte de rupture par la formule II. 9.

$$R_c = \frac{F_c}{B^2} \quad (II.9)$$

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si F_c est exprimée en newtons, cette résistance exprimée en méga pascals par la formule II. 10 vaut :

$$R_c = \frac{F_c (N)}{1600} \quad (II.10)$$

Les résultats obtenus pour chacun des 6 demi-prismes sont arrondis à 0.1 MPa près et on en fait la moyenne. Si l'un des 6 résultats diffère de $\pm 10\%$ de cette moyenne, il est écarté et la moyenne est alors calculée à partir de 5 résultats restants. Si à nouveau un des 5 résultats s'écarte de $\pm 10\%$ de cette nouvelle moyenne, la série des 6 mesures est écartée.

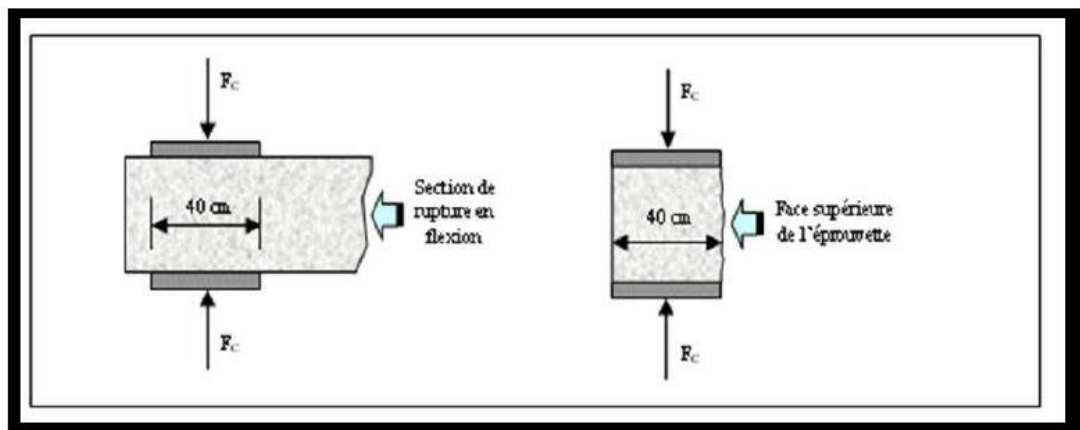


Figure II.15 : Dispositif de rupture en compression.

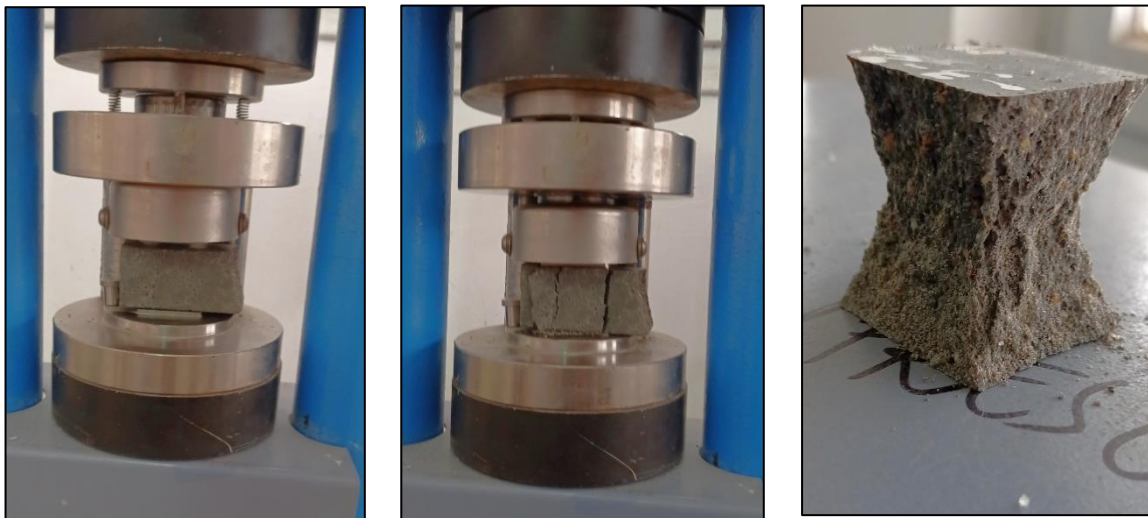


Figure II.16. Rupture en compression.

Lorsque le résultat est satisfaisant, la moyenne ainsi obtenue est la résistance du ciment à l'âge considéré.

II.4. CONCLUSION

Plusieurs séries d'essais ont été effectuées pour la caractérisation des différentes formulations des mortiers utilisées, il s'agit d'essais : physiques, thermiques et mécaniques. Ces essais expérimentaux ont permis d'avoir une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux entrant dans la composition des mortiers et des pâtes étudiés, d'évaluer les caractéristiques thermo-physiques, l'absorption capillaire et les résistances mécaniques des mortiers confectionnés à base de perlite de la région de Maghnia. Nous avons adopté pour toutes les formulations le même rapport Eau/Ciment et un même volume de pâte.

Partie III

Résultats et interprétations

CHAPITRE I : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT FRAIS

I.1. INTRODUCTION

Dans la partie précédente nous avons identifié les caractéristiques principales des matériaux entrant dans la constitution des mortiers ainsi que les méthodes d'essais, dans cette partie nous allons présenter les résultats relatifs aux essais sur nos mortiers confectionnés en vue de montrer l'influence de la perlite sur leurs comportements.

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats des différents essais de caractérisation à l'état frais effectués sur les mortiers confectionnés selon les différents ajouts de perlite (0%, 10% et 20%). Il s'agit des essais de consistance et de prise sur la pâte de ciment, et des essais de maniabilité sur les mortiers.

I.2. RESULTATS DES ESSAIS SUR PATES NORMALISEES

I.2.1. Essais de consistances

Les résultats de consistance obtenus pour chaque composition de pâte de ciment sont notés dans le tableau I.1, et présentés par la figure I.1.

Tableau I.1. Formulation des pâtes

Les pâtes	Pâte (0%p)	Pâte 10%p	Pâte 20%p
Eau(g)	135.5	135.7	135.6
Ciment (g)	500	450	400
Perlite(g)	0	50	100
E/C	0.271	0.271	0.339

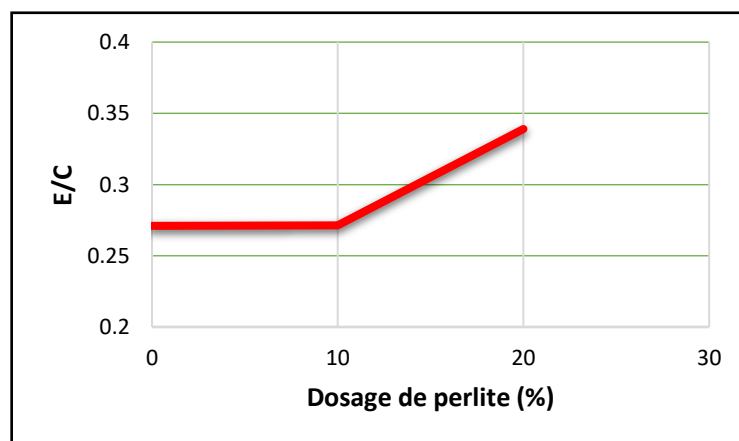


Figure I.1. Variation des rapports E/C en fonction du dosage en perlite

D'après la courbe dans la figure I.1 on a remarqué l'augmentation du rapport E/C avec l'augmentation du pourcentage de perlite de 10 à 20%, cela à cause de la demande en eau par la pâte de ciment pour avoir une consistance normale.

L'absorption et la réduction d'eau destinée à l'hydratation du ciment est probablement due à la présence de la poudre de perlite. Ceci est dû probablement à la grande surface spécifique présentée par le mélange et donc un fort appel aux molécules d'eau afin de mouiller toute la surface est constaté.

Selon Hamadache (15) a constaté que la consistance est normale seulement pour la pâte témoin et la pâte de ciment avec 10% de perlite, alors que les consistances des autres pâtes sont élevées (20% et 30% de perlite). Plus le teneur de l'ajout augmente plus la consistance augmente.

Chaib.O. et al (47) a fait le même constat, la consistance des pâtes de ciment augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

I.2.2. Essais de prise

Le tableau I.2 et la figure I.2 donne les valeurs des temps de début de prise, fin de prise et les temps de prise, obtenus par les essais sur les pâtes témoin et celles contenant 10% et 20% de perlite par rapport au dosage du ciment.

Tableau I.2. Temps de début et fin de prise et temps de prise

		Pourcentage d'ajouts	Début de prise (minutes)	Fin de prise (minutes)	Temps de prise (minutes)
Pâte Témoin	PT	0%	192	344	152
Pâte à base de perlite	Pp10	10%	180	300	120
	Pp20	20%	160	300	140

Avec : PT : Pâte de ciment témoin.

Pp10 : Pâte avec 10% de perlite.

Pp20 : Pâte avec 20% de perlite.

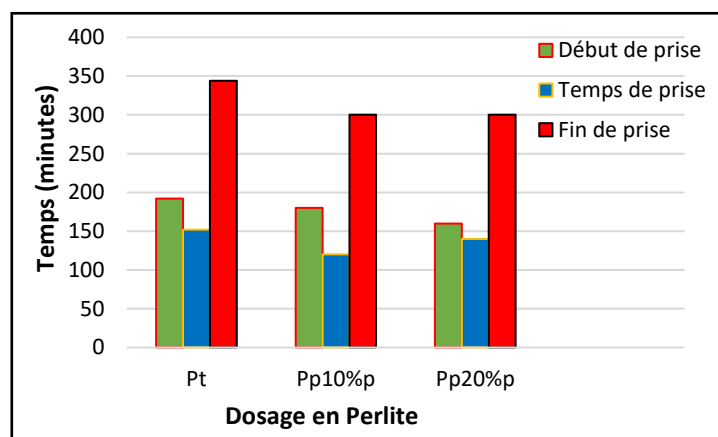


Figure I.2 : Temps de prise des pâtes à base de perlite

Comme le montre la figure I.2, tous les temps de début de prise enregistrés sur les ciments contenant la perlite naturelle sont supérieurs à 45 min et tous les temps de fin de prise sont inférieurs à 420 min. Cela confirme que tous les mélanges contenant de la perlite naturelle satisfont les exigences de la norme EN196-1.

Le résultat décrit clairement, que les temps de début de prise sont accélérés avec l'ajout de la perlite naturelle tandis que les temps de fin de prise, ils se stabilisent pour les pâtes avec 10 et 20% de perlite. Il apparaît que l'ajout de la perlite affecte légèrement les temps de prise puisqu'un écart maximal de 32 minutes est enregistré entre la pâte témoin et celle dont 10% de perlite ont été substitués au ciment. Plusieurs chercheurs, rapportent des résultats similaires sur l'augmentation des temps de prise dans le cas des pâtes incorporant des ajouts pouzzolaniques à teneur élevée en Al_2O_3 (13,68 % pour la perlite de Maghnia). Nos résultats prouvent que la présence de la perlite dans les mortiers même à un dosage de 20% n'affecte pas beaucoup le temps de prise.

I.3. RESULTATS DES ESSAIS SUR MORTIERS FRAIS

I.3.1. Essai de maniabilité

La comparaison entre plusieurs formulations exige une maniabilité équivalente. Les temps d'écoulement des mortiers contenant la perlite doivent être proches de celui du mortier témoin. Le rapport E/C est fixé, égal à 0,5.

Comme référence, la maniabilité obtenue, mesurée à l'aide d'un Maniabilimètre sur un mortier témoin est d'environ 12s (Tableau I.3), (Tableau I.4), (Figure I.3).

Tableau I.3. Maniabilité des mortiers (temps de vibration en (secondes)).

Nomination	Mortier Témoin (0%)	Mortier avec (10%)	Mortier avec (20%)
E/C	0.5	0.5	0.5
Temps de maniabilité (s)	12	10	11.65

Les dosages du plastifiant introduit sont donnés par le Tableau I.4.

Tableau I.4. Dosages du plastifiant des mortiers à base de perlite.

Mortiers	M0p	M10%p	M20%p
Ciment (g)	450	427.6	407.96
Plastimant (g)	0	0.3	1
Plastimant (%)	0	0.07	0.02

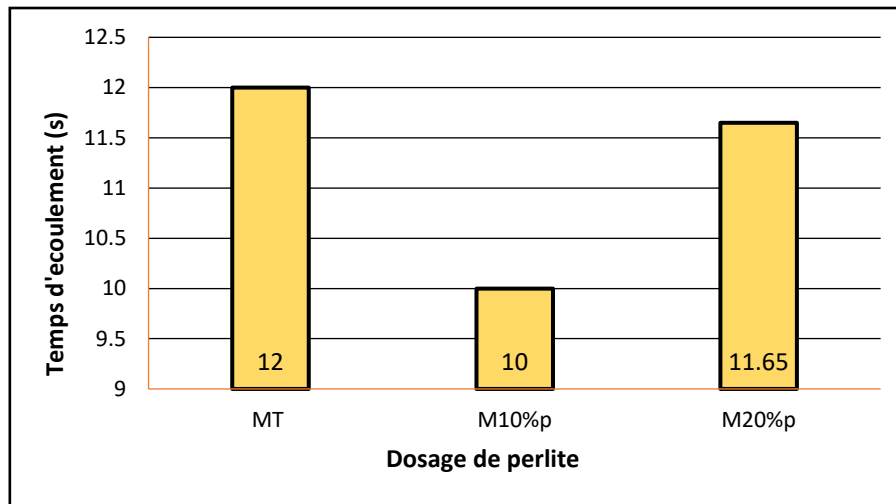


Figure I.3. Temps d'écoulement en fonction du dosage en Perlite des mortiers.

D'après l'histogramme dans la figure I.3 on observe que les temps d'écoulements des mélanges avec perlite sont légèrement inférieurs à celui du mortier témoin mais les temps satisfont les conditions, Pour garder une maniabilité plus ou moins constante, on augmente la quantité d'adjuvant nécessaire pour l'obtention d'un mélange maniable et ouvrable.

Les recherches précédentes [(15), (5), (43), (17), (16), (44)] ont également prouvées que 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 perlite. Ce qui prouve que l'augmentation du taux de la perlite accroît sensiblement la demande en eau (15).

Ceci est en accord avec les résultats de recherches de Senhadji (16) et Chihaoui (5) qui ont trouvé les mêmes résultats des essais menés sur des mortiers à base de plusieurs ajouts pouzzolaniques notamment la perlite. Ils indiquent une diminution de la maniabilité à cause de leur demande en eau qui est supérieure à celle du mortier de ciment pur.

En conclusion la maniabilité est inversement proportionnelle au dosage de l'ajout pouzzolanique.

I.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats des essais à l'état frais des pâtes et mortiers. L'essai de consistance sur les pâtes à montrer que la présence de la perlite exige une augmentation du besoin de la quantité d'eau. Ainsi que le temps de prise amoindri avec l'augmentation du pourcentage de l'ajout de la perlite dans les pâtes de ciment et reste inférieur à celui au témoin. Ceci implique que la perlite contribue légèrement à l'accélération de la prise. Enfin, l'augmentation de la quantité d'adjuvant est nécessaire pour l'obtention d'un mélange maniable et ouvrable, avec une maniabilité plus ou moins constante et comparable à celle du mortier témoin.

CHAPITRE II : RESULTATS DES ESSAIS A L'ETAT DURCI

II.1. INTRODUCTION

Ce chapitre résume les résultats obtenus à l'issue de l'étude de l'influence de la perlite sur les comportements des mortiers à l'état durci. Il s'agit en effet, des résultats des essais de caractérisation effectués sur les mortiers confectionnés selon les différents ajouts de perlite (0, 10% et 20%) en l'occurrence des essais d'absorption capillaire, des mesures des propriétés thermo-physiques (conductivité thermique, chaleur massique, diffusivité thermique et résistance thermique) ainsi que l'évaluation des résistances mécaniques en traction et en compression et ce à l'âge de 3, 7, 14, 28, 60 et 90 jours.

II.2. CARACTERISATION DU MORTIER DURCI

II.2.1. Résultats de l'essai d'absorption capillaire

Les résultats obtenus à chaque échéance sont exprimés sous forme de la moyenne des trois valeurs mesurées des éprouvettes 4x4x16 cm³ mises en contact avec l'eau durant sept jours.

Le tableau II.1 et la figure II.1 représentent les résultats obtenus de l'essai d'absorption capillaire des mortiers à base de 10% et 20 % de perlite et le mortier témoin.

On utilise la formule (II.1) pour calculer le coefficient d'absorption capillaire.

$$c = \frac{M_j - M_0}{16} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

C : coefficient d'absorption capillaire (g/cm²)

M₀ : est la masse de l'éprouvette après conservation dans l'air pendant 7 jours en grammes.

M_j : est la masse de l'éprouvette après le temps requis d'absorption, en grammes.

Exemple de calcul pour le mortier témoin

La moyenne de 3 pesées des échantillons, M₀ = 564.1g

Après 7 jours, la moyenne des 3 échantillons M₇ = 580.9g

Donc

$$c = \frac{580.9 - 564.1}{16} = 1.05 \text{ g/cm}^2$$

Les coefficients d'absorption capillaire sont donnés dans le tableau II.1.

Tableau II.1. Coefficients d'absorption capillaire des différents mortiers

Les échéances	Absorption capillaire (g/cm ²)	
	01 jour	07 jours
Mortier témoin	0.82	1.05
Mortier 10%p	0.62	0.85
Mortier 20%p	0.46	0.67

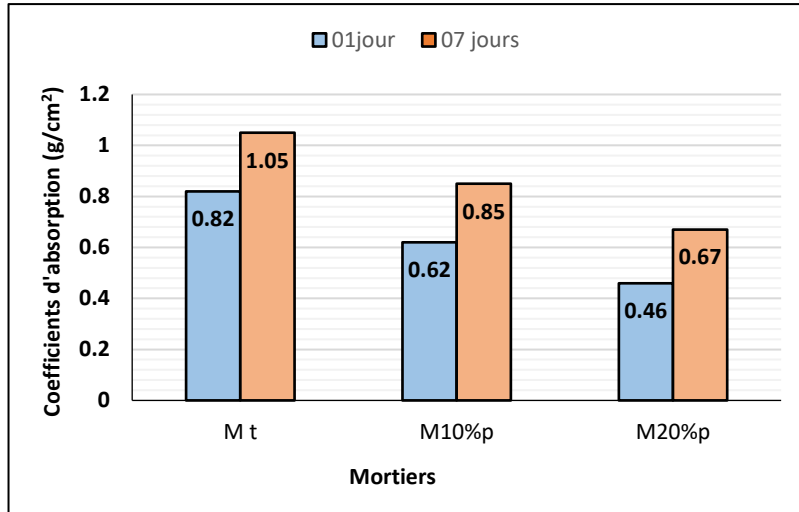


Figure II.1. Evolution des coefficients d'absorption capillaire des différents mortiers.

D'après la figure II.1 on remarque que l'absorption d'eau du mortier témoin est plus élevée que celles des mortiers à base 10 et 20% de perlite et ce pour les deux échéances.

L'accroissement de l'absorption d'eau relative à chaque mortier est observé entre le premier et le septième jour. On distingue qu'avec l'augmentation du pourcentage de la perlite le coefficient de l'absorption capillaire diminue ce qui rend l'effet de la substitution plus avantageuse et notamment le dosage de 20%.

Ainsi, on peut dire que la perlite a contribué à sceller les capillaires résultant de l'interaction du ciment, de l'eau et du sable.

Ces résultats sont en accord avec les résultats de Bourroubey (43) et Maamar Benhadjar et al. (44).

II.2.2. Résultats de l'étude thermique

Afin d'évaluer les propriétés thermo-physiques des mortiers stockés à l'air libre et âgés de 28 jours, des mesures de conductivité thermique, de chaleur massique, de diffusivité thermique ont été prises qui sont destinées pour la confection des éprouvettes de dimensions de 4x4x16 cm³ à l'aide d'un appareil type « QuicklineTM30 ».

Il est question de mettre en relief l'influence de la substitution du ciment par la perlite de Hammam Boughrara sur le caractère plus ou moins conducteur de la chaleur des mortiers incorporant cet ajout.

II.2.2.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique est une grandeur qui sert à quantifier l'aptitude d'un corps à conduire de la chaleur.

Le tableau II.2 et la figure II.2 illustrent la variation de la conductivité thermique des mortiers avec perlite et du mortier témoin en fonction du pourcentage de perlite.

Tableau II.2. Conductivités thermiques

Mortiers	λ (W/m. K)
MT	1.90
M10%p	1.68
M20%p	1.71

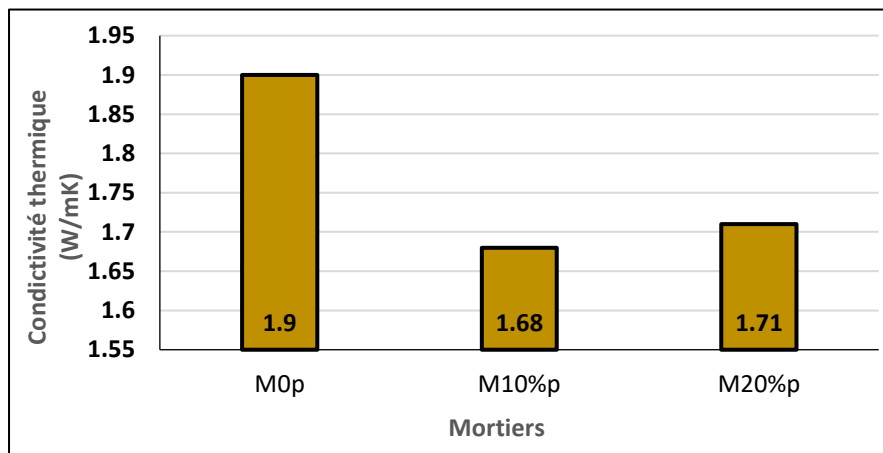


Figure II.2. Variation de la conductivité thermique en fonction du pourcentage de perlite à l'air libre et à 28 j.

Nous remarquons que les conductivités des mortiers à base de perlite sont inférieures à celle du témoin (avec un écart de 11.6 % entre le mortier témoin et celui incorporant 10% de perlite). Ceci confirme d'une façon générale l'étude de Hamadache (15) qui a déduit une meilleure isolation thermique des mortiers perlitiques. Ces mortiers peuvent par conséquent être recommandés comme matériaux présentant une meilleure isolation thermique que le mortier témoin.

II.2.2.2. Chaleur massique

La capacité calorifique ou chaleur massique est la quantité de chaleur que peut emmagasiner un matériau par rapport à son volume, elle est définie par la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température de 1 m³ du matériau (22).

Le tableau II.3 et l'histogramme de la figure II.3 donnent les valeurs de la variation de la chaleur massique des mortiers avec et sans perlite.

Tableau II.3. Chaleurs massiques

Mortiers	C (10 ⁶ J/m ³ . K)
MT	1.74
M10%p	1.71
M20%p	1.71

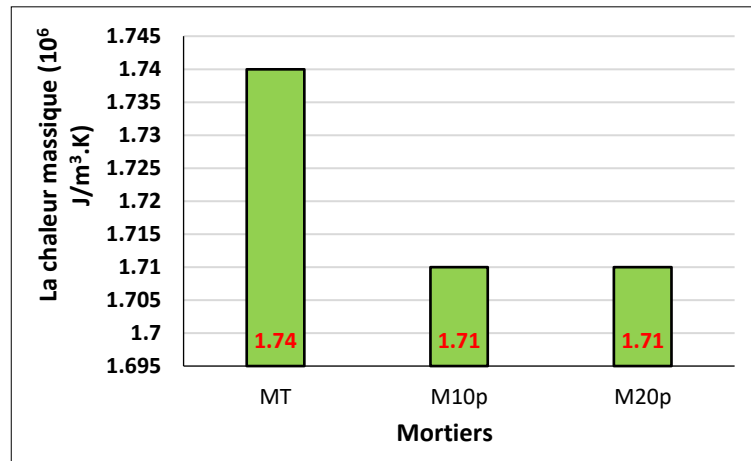


Figure II.3. Variation de la chaleur massique en fonction du pourcentage de la perlite

La capacité calorifique du mortier témoin atteint une valeur de 1.74×10^6 J/m³. K qui sont légèrement supérieure à celle des deux autres mortiers qui présente des valeurs similaires. Ce qui nous permet de dire que le mortier témoin emmagasine plus d'énergie par rapport aux mortiers à base de 10 et 20% de perlite.

II.2.2.3. Diffusivité thermique

La diffusivité thermique "a" caractérise l'aptitude d'un matériau à transmettre de la chaleur (en termes de vitesse). Elle exprime la vitesse à laquelle la chaleur se propage à l'intérieur du matériau. Elle est directement proportionnelle à la conductivité thermique λ et inversement à la chaleur spécifique C et la masse volumique ρ (Formule II.2).

$$a = \frac{\lambda}{\rho.C} \quad (\text{II.2})$$

Le tableau II.4 et la figure II.4 donnent la diffusivité thermique à 28 jours des mortiers à base de perlite stockés à l'air libre, la transmission de chaleur du mortier témoin est plus grande que les mortiers à base de 10 et 20 % de perlite substituées au ciment avec un écart maximal de 9.6% entre MT et M10%p. Vraisemblablement, la présence de la perlite réduit la vitesse de propagation de la chaleur dans ce mortier. Plus la valeur de la diffusivité faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau. Pour préciser et à titre d'exemple le moment où la chaleur arrive sur une face d'un mur et le moment où elle se propagera pour atteindre l'autre face du mur mettra beaucoup plus de temps (22).

Tableau II.4. Diffusivités thermiques

Mortiers	$a \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
MT	1.09
M10%p	0.985
M20%p	0.999

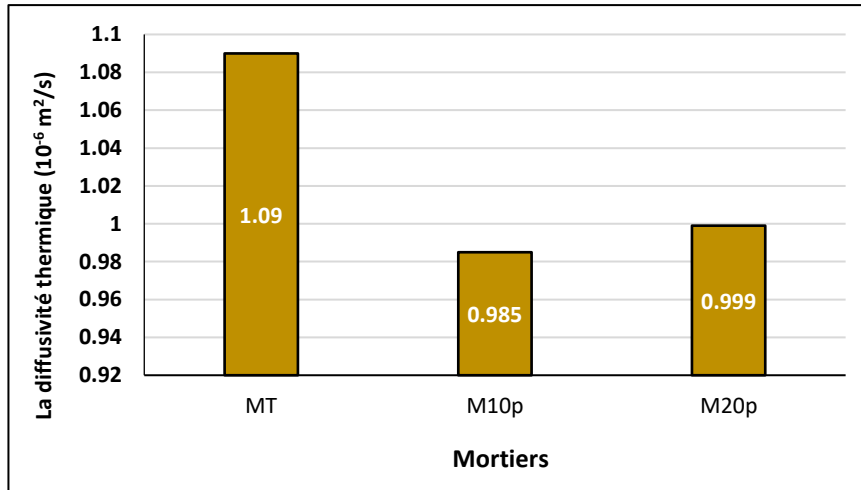


Figure II.4. Variation de la diffusivité thermique en fonction du pourcentage de la perlite à l'air libre à 28 j.

II.2.2.4. L'effusivité thermique

Elle indique la capacité des matériaux à absorber (ou restituer) plus ou moins rapidement un apport de chaleur. L'effusivité caractérise la sensation de chaud ou de froid que donne un matériau. Si la valeur d'effusivité est élevée, le matériau absorbe rapidement beaucoup d'énergie sans se réchauffer notablement. A l'inverse une valeur d'effusivité faible indique que le matériau se réchauffe rapidement en surface en absorbant peu de chaleur (isolant), La valeur E_f exprime combien de kilojoules ont pénétré sur 1m^2 de surface de matériau 1 seconde après qu'elle est été mise en contact avec une autre surface de 1m^2 plus chaude qu'elle de 1°C . Tout comme la diffusivité, elle utilise la capacité thermique et la conductivité thermique du matériau pour son calcul.

Tableau II.5. L'effusivités thermiques

Mortiers	$E \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$
MT	1.81
M10%p	1.69
M20%p	1.71

Le tableau II.5 et la figure II.5 donnent l'effusivité thermique à 28 jours des mortiers à base de perlite stockés à l'air libre, l'absorption de chaleur par le mortier témoin est plus rapide que les mortiers à base de 10, 20% perlite.

La transmission de chaleur du mortier témoin est plus grande que les mortiers à base de 10 et 20 % de perlite substituées au ciment avec un écart maximal de 94.47% entre MT et M20%p, La présence de la perlite réduit la vitesse l'absorption de la chaleur dans ce mortier. Plus la valeur de l'effusivité faible, plus le mortier absorbant peu de chaleur (isolant).

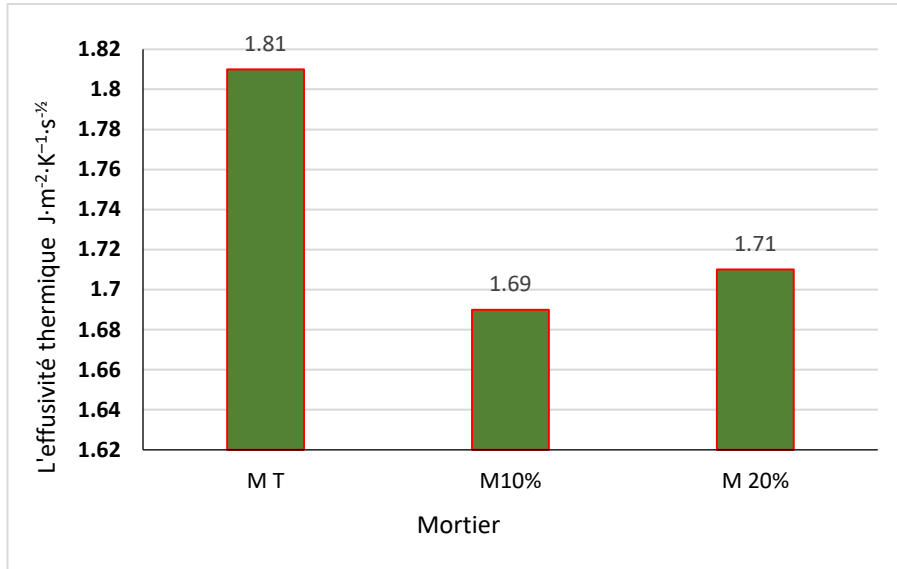


Figure II.5. Variation de l'effusivité thermique en fonction du pourcentage de la perlite à l'air libre à 28 j.

II.2.2.5. Résistance thermique

La résistance thermique est la capacité à s'opposer au flux de chaleur entre les deux faces d'une paroi, elle est évaluée par la formule II.3.

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda} \tag{II.3}$$

Où

e : épaisseur de la couche du matériau. L'épaisseur de l'éprouvette este =0,04 m.

λ : Conductivité thermique des mortiers.

La résistance thermique est inversement proportionnelle à la conductivité thermique (Figure II.5) (Tableau II.5).

Tableau II.6. Résistances thermiques

Mortiers	λ (W/m. K)	R _{th} (m ² . K/W)
MT	1.90	0.021
M10%p	1.68	0.024
M20%p	1.71	0.023

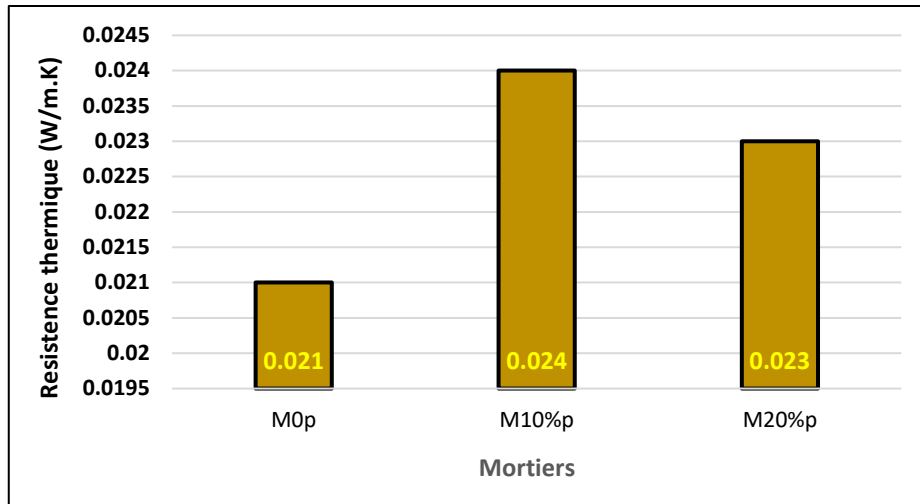


Figure II.6. Variation de la résistance thermique en fonction du dosage de perlite.

La valeur de la résistance thermique R_{th} augmente avec la présence d'un pourcentage perlite dans le mortier (avec un écart maximal de 12.5% entre la résistance thermique du mortier témoin et celle du mortier à 10% de perlite) ce qui améliore la performance thermique de la couche du matériau.

II.2.2.6. Comparaison entre la résistance thermique et la conductivité thermique

La figure II.6 représente les variations de la résistance thermique et la conductivité thermique des différents mortiers en fonction des teneurs perlitiques.

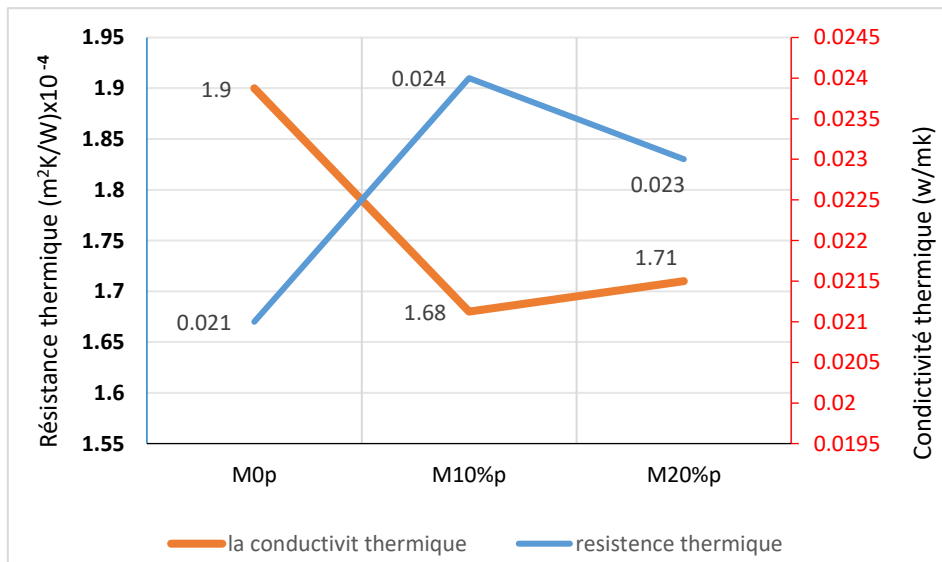


Figure II.7. Variation de la conductivité thermique, résistance thermique en fonction des teneurs de perlite

D'après Hamadache (15) les résultats obtenus montrent une meilleure valeur de la conductivité thermique à l'âge de 300 jours pour des mortiers exposés à l'air libre. De cela, on déduit une meilleure isolation thermique.

La conclusion principale à laquelle nous avons abouti, c'est que le matériau substitué de mélange perlite 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.

II.2. 3. Résistances mécaniques des mortiers

II.2.3.1. Résistances à la traction

Les mesures des résistances à la traction ont été obtenues par rupture à la flexion sur des éprouvettes (4x4x16cm³) témoin et à base de 10 % et 20% de perlite.

Le tableau II.7 et la figure II.7 présentent les résultats des résistances à la traction en MPa en fonction du temps et du dosage en perlite.

Tableau II.7. Résistances à la traction (MPa).

Mortiers	Age (Jours)					
	03	07	14	28	60	90
MT	9.81	10.81	11.23	11.75	11.09	11.41
M10%p	9.86	10.44	10.92	11.03	10.83	10.82
M20%p	8.97	10.06	10.55	10.71	11.26	10.69

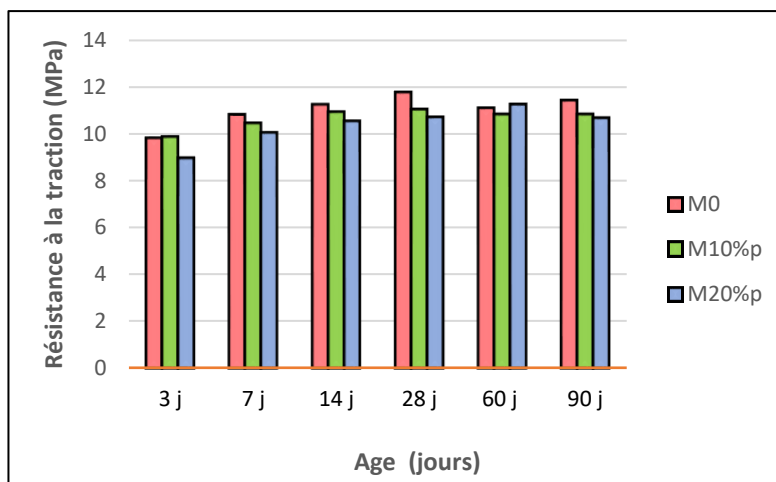


Figure.II.8. Evolution des résistances à la traction en fonction du temps.

La figure II.7 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, 60 et 90 jours.

- A l'Age de 7, 14 et 28 jours la résistance a eu une diminution avec l'augmentation du dosage de perlite.

En effet a 28 jours le mortier témoin présente une valeur maximale de la résistance, suivie du mortier avec 10% de perlite et celui avec 20%.

- À long terme (60jours) on remarque un retournement de situation puisque le M20%p développe une résistance plus élevée cela due à l'augmentation de pourcentage de perlite.

Ces résultats ne concordent pas avec ceux de Bourroubey (43), pour lesquels la résistance à la flexion augmente avec l'augmentation du pourcentage en perlite à l'âge 3, 7, 14 et 60 jours et la résistance du mortier à 10% de perlite à 28 jours est la plus élevée. Cependant, et selon le même auteur, c'est la résistance du mortier incorporant 20% de perlite qui commence à se développer par rapport aux autres mortiers et ce à 60 jours, ce qui corrobore nos résultats.

II.2.3.2. Résistance à la compression

Les résultats issus des mesures de résistances à la compression menées sur les demi prismes obtenus par l'essai de traction par flexion sont reportées au tableau II.8 et la figure II.8.

Tableau II.8 : Résistances à la compression (MPa)

Mortiers	Age (Jours)					
	03	07	14	28	60	90
MT	30.5	37.59	38.83	40.53	41.16	42.02
M10%p	29.76	34.68	37	38.06	46.89	48.78
M20%p	28.72	34.82	35.89	42.5	47.25	49.33

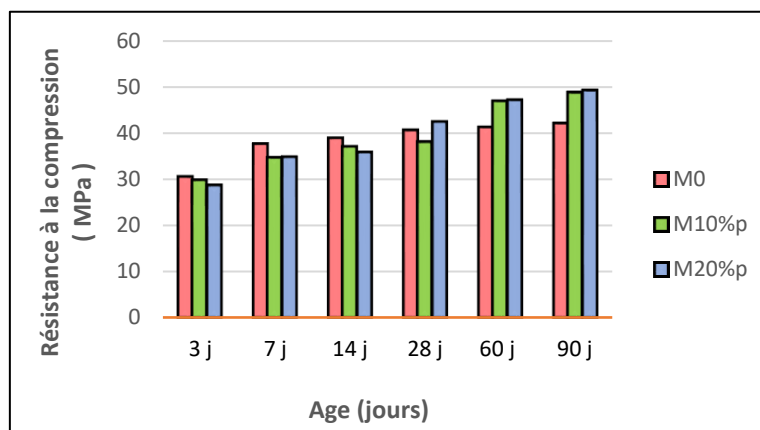


Figure II.9. Evolution des résistances à la compression en fonction du temps.

Nous remarquons d'après la figure II.8, une augmentation continue de la résistance à la compression pour les différents mortiers, en fonction de l'âge (3, 7, 14 et 28, 60, 90 jours). Cet accroissement est la conséquence normale de l'hydratation du ciment au cours du temps.

De 3 à 14 jours, c'est le mortier témoin qui prend le dessus en développant des résistances plus élevées. Au-delà de cette échéance, les mortiers perlitiques commencent à se distinguer du mortier témoin par leurs performances mécaniques notamment le mortier M20%p.

Cette augmentation peut être attribuée aux rôles complémentaires de l'effet filler et l'effet pouzzolanique de la perlite au sein de la matrice cimentaire. L'effet filler réduit la porosité de la zone de transition pâte-granat et l'effet pouzzolanique contribue à la formation de gels de C-S-H issus de la réaction pouzzolanique qui se déclenche tardivement entre la silice présente dans la perlite et la portlandite générée par l'hydratation du ciment, d'où une structure plus dense, plus compacte et par conséquent une pâte plus résistance (15).

Pour mieux visualiser l'évolution de la résistance, nous comparons les rapports des résistances du mortier à base de perlite et le témoin (figure II.9).

D'après les résultats obtenus on remarque que les résistances à la compression par rapport au mortier témoin de tous les mortiers testés, augmentent régulièrement avec l'âge.

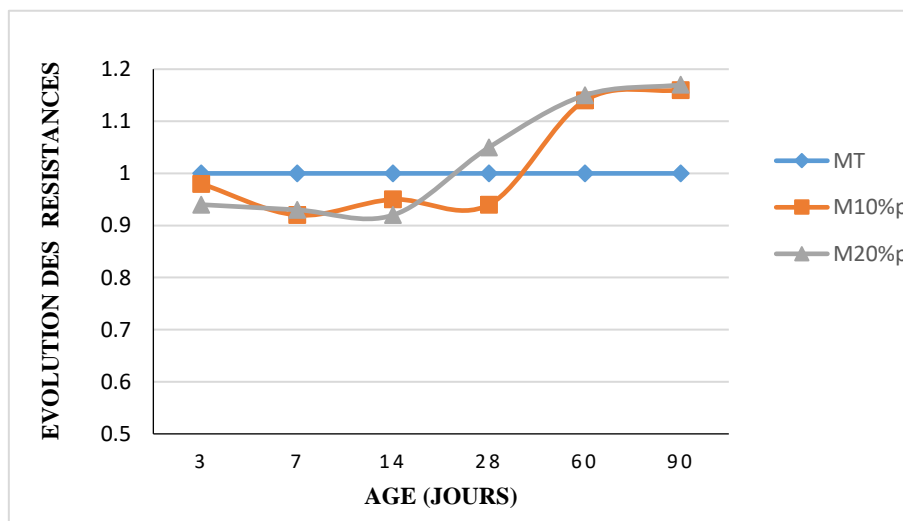


Figure II.10. Evolution de la résistance des mortiers à base de perlite par rapport au mortier témoin

En effet le mortier témoin présente une supériorité par rapport aux mortiers de 10 et 20% de perlite à l'âge de 3,7 et 14 jours.

Au-delà de 28 jours les échéances de 10 et 20% développent des résistances à la compression supérieures à celles du mortier témoin. Ils atteignent à 90 jours environ 116% et 117% respectivement. Ceci peut être attribué à l'activité pouzzolanique qui est lente au jeune âge et qui se développe tardivement.

Par ailleurs, le comportement mécanique du mortier contenant 20% de perlite présente des résistances élevées, il atteint une résistance à la compression avoisinant les 93% à 7 jours et 105% à 28 jours par rapport au témoin.

L'incorporation de la perlite génère une accélération de la résistance mécanique des mortiers dans lesquels elle est incorporée et ce à toutes les échéances.

II.3. CONCLUSION

Ce chapitre avait pour objectif de comparer les propriétés physico-mécaniques et thermiques à l'état durci des mortiers à base de différents pourcentages de perlite avec celles du mortier témoin utilisé comme référence afin de conclure sur l'effet de cette addition sur ces caractéristiques.

En ce qui concerne les propriétés physico-mécaniques et suite aux résultats des essais d'absorption capillaire, une diminution de l'absorption de l'eau avec l'augmentation de la perlite a été notée, le mortier témoin absorbe plus que les mortiers avec perlite (10 et 20%), la perlite contribue donc à diminuer les pores dans la matrice cimentaire.

A l'issue de l'étude thermique, quatre grandeurs ont été évaluées à savoir la conductivité thermique, la chaleur massique, la diffusivité thermique et enfin la résistance thermique. Un dosage de 10% de perlite substituée au ciment a permis d'obtenir une faible conductivité thermique par rapport à celle du mortier témoin. Aussi, la chaleur massique et la diffusivité thermique ont diminué avec l'augmentation de l'ajout ce qui attribue à ce mortier un caractère d'isolant.

L'évolution des résistances à la compression en fonction du temps affiche des allures intéressantes. En effet, grâce à l'effet pouzzolanique qui s'est produit au-delà de 28 jours, les mortiers étudiés à base de 10 et 20% de perlite développent des comportements satisfaisants vis-vis des résistances mécaniques avec une évolution importante à 28 jours par rapport au témoin surtout pour le mortier incorporant 20% de perlite.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les mortiers à base de perlite, dans le domaine de la recherche des matériaux de construction, possèdent un fort potentiel de développement. Il est donc primordial de mener plus d'investigations sur ce type de matériaux. La présente étude dont l'objectif était la valorisation de la perlite de Hammam Boughrara (Maghnia) en vue de son utilisation comme ajout cimentaire pouzzolanique dans les mortiers, a contribué à apporter des réponses à la question posée dans la problématique et ainsi atteindre les objectifs tracés notamment ceux liés à l'environnement et au développement technologique.

Afin de voir la potentialité de ce matériau pouzzolaniques (perlite) en tant que substitut partiel dans les mortiers, des formulations des mortiers ont été développées (un mortier témoin et deux mortiers à base de 10 et 20% de perlite, un rapport E/L identique et un volume constant), pour mettre en évidence l'influence de la perlite sur le comportement mécanique et les propriétés thermo-physiques des mortiers dans lesquels elle est incorporée.

D'après l'étude expérimentale menée, il apparaît d'une façon générale que la quantité d'ajout pouzzolanique, et la composition chimique du ciment sont les principaux paramètres qui influent sur la variation des résistances mécaniques (traction, compression) et thermiques des mortiers testés.

A l'issue des résultats obtenus nous sommes parvenues aux conclusions suivantes :

- A l'échelle de la pâte, nous avons conclu que pour obtenir une consistance normalisée du mélange (ciment, perlite et eau), la quantité d'eau nécessaire augmente proportionnellement avec le dosage de la perlite. Contrairement, nous avons remarqué que le temps de prise diminue avec l'augmentation de pourcentage de perlite, ainsi que l'augmentation de la quantité d'adjuvant nécessaire pour l'obtention de mélanges maniables et ouvrables et ayant une maniabilité plus ou moins constante et équivalente à celle du mortier témoin.
- A l'état durci, il a été conclu que la diminution d'absorption capillaire est parallèle avec l'augmentation de la perlite, et que la substitution de 20 % du ciment par la perlite est le taux le plus intéressant et avantageux, et qu'il offre une possibilité pour améliorer la durabilité des mortiers. Ainsi, on peut dire que la perlite a contribué à sceller les capillaires résultant de l'interaction du ciment, de l'eau et du sable.
- L'étude thermique a abouti à la conclusion que la conductivité thermique du mortier à base de 10 % de perlite est la plus faible comparée à celle du mortier témoin et incorporant 20% d'ajout. Le taux de 10% de perlite substitué au ciment est le taux le plus intéressant ce qui attribue à ce mortier un caractère d'isolant. La perlite peut donc être recommandée pour la fabrication de mortiers faiblement conducteurs de la chaleur d'où l'efficacité énergétique de ces matériaux.

- L'incorporation de la perlite génère une accélération de la résistance mécanique des mortiers dans lesquels elle est incorporée et ce à toutes les échéances.
- Le comportement mécanique du mortier contenant 20% de perlite affiche des résistances élevées, avec une évolution importante à 28 jours par rapport au témoin. Ce qui explique que l'ajout de la perlite naturelle dans le ciment améliore à long terme la résistance mécanique du mortier grâce au déclenchement de l'effet pouzzolanique de la perlite.
- En effet 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, la résistance à la traction et les propriétés thermiques.

Enfin, à travers tous les résultats présentés dans ce travail, nous pouvons conclure que la perlite du Maghnia est un minéral actif et de faible coût qui influe considérablement et positivement sur les propriétés des mortiers. La possibilité de valoriser la perlite et ce à des dosages allant jusqu'à 20% dans le but de diminuer le taux du ciment ainsi que son dégagement de gaz à effet de serre lors de sa fabrication, est un atout économique et écologique non négligeable.

PERSPECTIVES ET COMPLEMENT DE RECHERCHE

En perspective de ce travail, il pourrait être intéressant de compléter l'étude des mortiers en traitant plusieurs cas de mélanges avec la perlite. L'intérêt est donc, d'étudier les processus de dégradation dans les milieux agressifs et leur phénomène de protection, et même l'influence de la variation de sa finesse.

Enfin, une étude plus approfondie des caractéristiques mécaniques et de durabilité des mortiers à base de différents pourcentages de perlite peut être envisageable dans la mesure où des comportements vis-à-vis de la carbonatation ou les attaques acides et sulfates nécessitent un suivi permanent de la composition minéralogique avant et après la conservation dans les milieux agressifs.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Meral Ç.**, "Use of perlite as a pozzolanic addition in blended cement production", Turkey, Middle East Technical University , 2004.
2. **Rashad A M.**, "A synopsis about perlite as building material - A best practice guide for Civil Engineer", Construction and Building Materials 121: 338-353.
3. **Yu L. H., Ou H., Lee L. L.**, "Investigation on Pozzolanic Effect of Perlite Powder in Concrete", Cement and Concrete Research 33: 73-76, 2003.
4. **Erdogan S.T et Saglik A.Ü.**, "Early-age activation of cement pastes and mortars", Cement and Concrete Composites 38: 29–39, 2013.
5. **Chihaoui R.**, "Etude de durabilité des matériaux cimentaire exposés aux attaque", Thèse de Doctorat en Sciences, USTOMB, 2018.
6. **IMERYYS.** [Online] Imerys S.A. - 43 Quai de Grenelle, 75015 Paris. <https://www.imerys.com/fr/mineraux/perlite>.
7. **BRGM/RP-50469-FR. Memento roches et minéraux industriels** , la perlite. P.m.Thibaut .A.coumoul, 2000.
8. **Weber R.H., and Austin G.S.**, " Perlite in new mexico", new mexico Bureau of mines and Mineral Resources, Vols. G.S.Austln, compiler, pp97-101, 1982.
9. **Monlar J.**, "Perlite Mining in Hungary" . Mining magazing. pp-498-501, December 1989.
10. **Thibaut P.M., Coumoul A.**, "Mémento roches et minéraux industriels: la perlite". BRGM/RP-50469-FR, France. Universitaires. mars, 2003.
11. **San Nicolas R.**, "Approche performentielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash", Thèse de Doctorat Université Toulouse III –Paul Sabatier, 2011.
12. **Cyr M.**, "Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires". Thèse de Doctorat INSA de Toulouse, 1999.
13. **Ray A., Sriravindrarah R., Guerbois J. P., Thomas P. S., Border S., Ray H. N., Haggman J., Joyce P.**, "Evaluation of Waste perlite fines in the production of construction materials". Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 88 N° 1: 279–283, 2007.
14. **Katsioti M., Gkanis D., Pipilikaki P., Sakellariou A., Papathanasiou A., Teas Ch.**, "Study of the substitution of limestone filler with pozzolanic additives in mortars", Construction and Building Materials 23: 1960–1965.
15. **Hamadache M.**, "Résistances mécaniques, conductivité et résistance à la corrosion des pouzzolaniques", Thèse doctorat en science, Ecole Nationale Polytechnique Mauris Audin , 2018.

- 16. 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.
- 17. Guenanou F.**, "Durabilité des mortiers contenant la perlite vis-à-vis de la corrosion des armatures", Thèse de Doctorat en Sciences, 2018.
- 18. LSUNMA.,**, "Livret des substances utiles non métalliques de l'Algérie de la Wilaya de Tlemcen", 1999.
- 19. Sardan G.**, "Les formations volcaniques tertiaires et quaternaires du tell oranais",. Publications du service de la carte géologique de l'Algérie, Bulletin N°18: 533. 1958,.
- 20. Dron R., Brivot F.**, "Bases minéralogiques de sélection des pouzzolanes", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 92, Rêf.2115: 105-112, 1977.
- 21. gaz-tarif-reglemente.** [Online] <https://gaz-tarif-reglemente.fr/maitriser-sa-consommation/travaux/isolation/materiaux-isolants/perlite-isolation.html>.
- 22. Belas N., Cours "sur La thermique des batiments"** ,Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem.
- 23. Clark, Taylor R E. High Temp,High Press.1974,6,65.**
- 24. Degiovanni A.**, "Conductivité et diffusivité thermique des solides", 0.1994, Tech.l'ingenieur,trait.mes controle, Vol. 33.
- 25. Klarsfeld F., De Ponte and S.**,"Conductivité thermique des isolants,,". Tech. l'ingénieur,vol. R 2 930, no. 0, p. 21, 2002.
- 26. Salmon D.**,"Thermal conductivity of insulations using guarded hot plates, including recent developments and sources of reference materials," Meas. Sci. Technol., vol. 12, no. 12, p. R89, 2001.
- 27. Parker W J., Jenkins R J., Butler C P., and Abbott G L.**,"Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity," J. Appl. Phys., vol. 32, no. 1679, 1961.
- 28. Niezgoda M.**,"Modélisation du transfert thermique au sein de matériaux poreux multiconstituants", Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2012.
- 29. Zach., Hubertova M, and Hroudova J.**, "Possibilities of Determination of Thermal Conductivity of Lightweight Concrete With Utilization of Non Stationary Hot-Wire Methode".
- 30. Carslaw H S. and Jaeger J C.**, "Conduction of Heats in Solids", 2nd edition, Oxford Uni. 1959.

- 31. Al-Ajlan S A.,** "Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 17–18, pp. 2184–2191, Dec. 2006.
- 32. Dahmani A.,** "Optimisations des performances d'un beton vert a base de granulats de liege : effet du pretraitement des granulats de liege" : Université Aboubakr Belaid - Tlemcen - faculté de technologie, 2019.
- 33. Hamadache M., Mouli M., Bouhamou N., Benosman A.S., Dif F., Chaib O.,** "Use of pozzolanic mortars for the thermal comfort of buildings." : *Journal of Advanced Research in Materials Science*, 2017.
- 34. Oktaya H., Yumrutaş R., Akpolat A.,** "Mechanical and thermophysical properties of lightweight aggregate concretes" *Construction and Building Materials* Volume 96, 15 October 2015, Pages 217-225
- 35. Neville A.M.,** "Properties of Concrete" 4th ed ELBS, Addison WesleyLongman Ltd., Harlow. England, 1996. ISBN 0582 279380.
- 36. Ayad k., Midoune N., Mechebek S.,** "Formulation d'un mortier à base de perlite avec étude thermique et acoustique". s.l. : communication science et technologie - Vol.11, N°01, pp.34-46, - ENPO – Maurice AUDIN ASJP/ESSN, January 2022.
- 37. Lin, Y., Li, X., & Huang, Q.,** "Preparation and characterization of expanded perlite/wood-magnesium composites as building insulation materials", *Energy and Buildings*, 231, 110637. 2021,.
- 38. Bageri B., Ahmed A., Jaber Al.,** "Effect of Perlite Particles on the Properties of. Oil-Well Class G Cement", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 108344.
- 39. Gouasmi M.T., Benosman A.S., Taïbi H., Belbachir M., Senhadji Y.,** "Les Propriétés physico-thermiques des mortiers à base des agrégats composites « PET-sable siliceux »" *J. Mater. Environ. Sci.* 7 (2) 2016.
- 40. Ozkam Sengul.,** « Etude l'effet de la perlite expansée sur les propriétés mécaniques et de la conductivité thermique du béton léger ». : Contents lists available at Science Direct, *Energy and Buildings* 43 671–676, 2011.
- 41. Bekir Topc I., Is-ıkdag B.,** « Fabrication de construction des briques d'argile contenant la perlite résistante à haute température ». : Science Direct, *Building and Environment* 42 (2007) 3540–3546.
- 42. Bessenoucin M Z.** « La conductivité thermique apparente de pouzzolane en béton », 7^{eme} conférence internationale sur les sciences des matériaux, (CSM7), Beyrouth Liban, 20-22 Mai 2010.

- 43. Bourroubey C.,** " influence de la perlite naturelle sur les resistances mecaniques des mortiers" : université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem-Faculté des Sciences et de la Technologie, 2019.
- 44. Maamar benhadjar L., Chenine S.,**" influence de la perlite naturelle sur les resistances mecaniques des mortier",Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem - Faculté des Sciences et de la Technologie, 2020.
- 45. Ghrici M., Kenai S., Said-Mansour M.** "Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements". Cem. Concr.Compos.,Vol. 29, p. 542–549,2007.
- 46. Entreprise, Dz entreprise.** [Online] <https://www.dzentreprise.net/ciment-exportations-021#:~:text=Affirmant%20qu'avec%20une%20production,millions%20de%20tonnes%20cette%20ann%C3%A9e..>
- 47. Chaib O.,** « 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.
- 48. Siyimane, M.,** "Etude des propriétés thermiques et mécaniques des bétons isolants structurels incorporant des cénoosphères". Thèse présentée et soutenue à l'Ecole Centrale de Nantes, le 19 Octobre 2018 Unité de recherche : Génie Civil et Mécanique, UMR CNRS 6183. 2018.
- 49. Perlite Institute, Inc.** 4305 North Sixth Street, Suite A, Harrisburg, PA 17110 717.238.9723 / fax 717.238.9985 / www.perlite.org.
- 50. Lakshmaiah KN., G. Devika., D. Harish Babu., N. V. Narayana.** International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology, An experimental study on "partial replacement of perlite powder and GGBS with cement in ternary blended concrete".
- 51. Arianit A. Reka., Blagoj Pavlovski., Kiril Lisichkov., Ahmed Jashari ., Blazo Boev., Ivan Boevc., Maja Lazarova., Volkan Eskizeybek ., Ayhan Oral ., Gligor Jovanovski and Petre Makreski,** "Chemical, mineralogical and structural features of native and expanded perlite from Macedonia", Journal of the Croatian Geological Survey and the Croatian Geological Society.2019.
- 52. Hadj Ali A.,**" Influence des déchets naturels sur l'efficacité thermique des mortiers" Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem. 2020.
- 53. TTS Engineering Sarl.** " la perlite", 3, rue de la Reigne B.P.103 F-70203 LURE EDEX.
- 54. Bahar.S.,** « Valorisation des sédiments de dragage du barrage chorfa II dans les bétons autoplaçants », Mémoire de fin d'étude master. Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, Faculté Des Sciences et des Technologies. 2013.

- 55. Ould moussa. M.,** "Influence des ajouts pouzzolanique sur le comportement thermo-physiques des mortiers", Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, Faculté des Sciences et des Technologies, 2020.
- 56. Coulson M.,** "Conductivité, diffusivité, émissivité thermique de composites poly (EtherKetone)- charges carbonées : fibres continues et particules". Matériaux. Université Paul Sabatier -Toulouse III, 2018.Francais. NNt : 2018TOU30215.Tel-02316044.
- 57. Ouksel T.,**" Cours Transfert Thermique", Département de Génie Mécanique ,**2017.**
- 58. Bruno HAY, Jean-Rémy FILTZ, Jean-Christophe B ,** « Propriétés thermiques des matériaux » Mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash, Laboratoire national d'essais (Paris) 10 mars 2004.
- 60. Geryville D,** "étude et amélioration de l'activité pouzzolanique de certains matériaux silicates pour une substitution partielle du clinker dans le ciment portland" , Mémoire pour l'obtention du diplôme de MAGISTER, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran – Mohamed Boudiaf, faculté des sciences, département de chimie.
- 61. Renac C., Mexias A., Louni-Hacini A., Brouillet S., Cottin J. Y., 2014,** "Rhyolite petrogenesis and meteoric–hydrothermal alteration at the Maghnia volcanic massif, Northwest Algeria", Journal of Geochemical Exploration 143: 1-18.
- 62. USGS, 2018,** U.S. Geological Survey, Mineral commodity summaries, January 2018.
- 63. Dupain R., Lanchon R., Saint Arrroman J C,** " Granulats, Sols, Ciments et béton", "caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire", 2^{ème}ed, CASTEILLA-25, rue Monge-75005 PARIS.
- 64. Service-formation@saint-Gobain.com.,** "introduction à la thermique des bâtiments",. édition 2022.
- 65. Thermoconcept-sarl.com.,** "Méthodes de mesure de la conductivité thermique",2019.

ANNEXES

NOTICE PRODUIT

Sika® Plastiment® BV-40

Plastifiant/Réducteur d'eau pour hautes résistances mécaniques

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Sika® Plastiment® BV-40 est un plastifiant réducteur d'eau énergétique qui :

- augmente la compacité du béton, entraînant ainsi une amélioration des résistances mécaniques et de l'imperméabilité
- facilite la mise en place du béton
- permet éventuellement de réduire le dosage en ciment
- permet d'obtenir un retard de début de prise plus ou moins important en augmentant le dosage normal d'utilisation de béton à performances élevées, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci

DOMAINES D'APPLICATION

Augmentation des résistances mécaniques

Sika® Plastiment® BV-40 permet de réduire l'eau de gâchage d'environ 10 % sans diminuer la maniabilité du témoin. Des essais sont indispensables pour déterminer la quantité d'eau de gâchage nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée. La compacité et l'imperméabilité sont améliorées. Les résistances mécaniques à long terme sont augmentées en moyenne de 15 à 40 %.

Sika® Plastiment® BV-40 est donc particulièrement indiqué pour :

- les bétons armés à hautes performances
- les bétons précontraints
- les bétons préfabriqués étuvés

Réduction du dosage en ciment

Sika® Plastiment® BV-40 permet de réduire le dosage en ciment de l'ordre de 10% en conservant les résistances mécaniques. Il est utilisé dans ce cas en B.P.E. pour la confection de béton à la résistance.

Amélioration de la maniabilité

Sika® Plastiment® BV-40 permet d'améliorer la maniabilité à teneur en eau constante, tout en apportant une augmentation des résistances à long terme de

bétons pompés.

Augmentation du délai de mise en oeuvre

A dosage élevé, le Sika® Plastiment® BV-40 augmente le temps de prise du béton. La température jouant un rôle important, il est bon de procéder à des essais. A titre indicatif :

- à 20°C, on obtient un retard de prise de 3 à 4 heures environ avec 0,6 %
- à 5°C, le même dosage provoque un retard de prise de l'ordre de 8 h

Sika® Plastiment® BV-40 est compatible avec nos entraîneurs d'air Sika® Aer et Sika® Aer-5. Cette combinaison conduit à :

- l'amélioration des résistances aux cycles gel-dégel
- la possibilité de coulage en continu (béton extrudé, béton routier)
- l'amélioration des résistances de tous bétons situés

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

Sika® Plastiment® BV-40, grâce à ses propriétés physico-chimiques permet :

Sur béton frais :

- d'augmenter considérablement la maniabilité même en réduisant l'eau de gâchage
- de disperser le ciment dans la masse
- d'améliorer l'adhérence béton-armatures
- de s'opposer à la ségrégation
- d'améliorer la thixotropie
- d'étaler éventuellement la prise

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques,
- d'accroître la compacité
- d'augmenter l'imperméabilité
- de diminuer le retrait et le fluage

Sika® Plastiment® BV-40 est compatible avec tous les ciments et en particulier le ciment fondu.

AGRÈMENTS / NORMES

- Caractéristiques sur béton frais, résistances méca-

- niques à 7 et 28 jours, perméabilité, capillarité : CE-MEREX - PV n° 363. 1.014 du 11.02.72.
- Résistances mécaniques à 7, 28, 90 et 365 jours : EM-PA ZURICH - PV n° 59239/32 du 10.02.69
- Conformité à la norme ASTM C 494 type A : TESWELL Laboratoires (USA) - PV n° IZ-15 du 23.08.79

DESCRIPTION DU PRODUIT

Base chimique	Solution aqueuse de lignosulfonates modifiés
Conditionnement	Fût de 250 kg Cubi de 1100 kg
Aspect /Couleur	Brun foncé
Durée de Conservation	Dans son emballage d'origine intact, le produit se conserve 3 ans
Conditions de Stockage	Sika® Plastiment® BV-40 gèle à - 5°C environ. En cas de gel prolongé et intense, vérifier s'il n'a pas été déstabilisé.
Densité	1,180 ± 0,025
Valeur pH	4,5 ± 1
Extrait Sec	36,6 à 40,4 %
Teneur Totale en Ions Chlorure	< 0,1 %
Équivalent Oxyde de Sodium	≤ 2,0 %

INFORMATIONS TECHNIQUES

Instructions pour le Bétonnage Introduire le Sika® Plastiment® BV-40 dans l'eau de gâchage.

RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

Dosage	<p>Le dosage précis du Sika® Plastiment® BV-40 est fonction des conditions de chantier et de l'effet recherché.</p> <p>Plage d'utilisation recommandée : 0,3 à 1% du poids du ciment (soit 0,25 à 0,85 litre pour 100 kg de ciment).</p> <p>Comme retardateur: A partir de 0,5% du poids du ciment (soit 0,42 litre pour 100 kg de ciment).</p> <p>Son dosage exact se détermine sur chantier en procédant à quelques essais puisqu'il est fonction de la nature des composants du béton, des qualités recherchées (compacité, plasticité) et des conditions climatiques.</p> <p>Ne pas dépasser 1% (0,85 litre pour 100 kg de ciment) sans essai préalable : possibilité de retard de prise important.</p>
Distribution	Introduire le Sika® Plastiment® BV-40 dans l'eau de gâchage.
Restrictions	Sika® Plastiment® BV-40 ne doit pas être ajouté au ciment sec.

VALEURS DEBASE

Toutes les valeurs indiquées dans cette Notice Produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait

Notice produit

Sika® Plastiment® BV-40
Février 2021, Version 01.02

BUILDING TRUST



de circonstances indépendantes de notre contrôle.

ÉCOLOGIE, SANTÉ ET SÉCURITÉ

Pour obtenir des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination en toute sécurité des produits chimiques, les utilisateurs doivent consulter la fiche de données de sécurité (FDS) la plus récente contenant les données physiques, écologiques, toxicologiques et autres données relatives à la sécurité.

RESTRICTIONS LOCALES

Veillez noter que du fait de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veuillez consulter la Notice Produit locale pour les données exactes sur le produit.

INFORMATIONS LÉGALES

Les informations, et en particulier les recommandations concernant les modalités d'application et d'utilisation finale des produits Sika sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que Sika a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, conformément aux recommandations de Sika. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou recommandations écrites, ou autre conseil donné, n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés, ni aucune garantie de conformité à un usage particulier, ni aucune responsabilité découlant de quelque relation juridique que ce soit. L'utilisateur du produit doit vérifier par un essai sur site l'adaptation du produit à l'application et à l'objectif envisagés. Sika se réserve le droit de modifier les propriétés de ses produits. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont soumises à nos conditions générales de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la Notice Produit correspondant au produit concerné, accessible sur internet ou qui leur sera remise sur demande.

Sika El Djazair SPA
08 route de Larbaa

16111 Les Eucalyptus
ALGERIE

Tél.: 0 21 50 16 92 à 95

Notice produit

Sika® Plastiment® BV-40
Février 2021, Version 01.02

BUILDING TRUST



SikaPlastimentBV-40-fr-DZ-(02-2021)-1-2.pdf



FICHE TECHNIQUE

N°: FR - 016 A - LAB

CIMENT PORTLAND POUR TRAVAUX DANS LES MILIEUX FORTEMENT AGRESSIFS

VERSION 2

Page 1 sur 2

NORME	NA 442/2013	
DESIGNATION NORMALISEE selon la NA 442 : 2013	CIMENT PORTLAND RESISTANT AUX SULFATES	
IDENTIFICATION	CEM I 42.5 N-LH/SR5	
COMPOSITION	CLINKER	= 95 à 100%
	CONSTITUANTS SECONDAIRES	= 0 à 5%
CARACTERISTIQUES MECANIQUES	Résistances à 02 jours	Résistances à 28 jours
	42.5 MPA	≥ 20.00 MPa
CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES	C ₃ A	3.00% - 5,00 %
	Perte au feu	≤ 1,00 %
	Résidu insoluble	0.50 % - 1.00%
	MgO	2.00 % - 3.00 %
	SO ₃	2.00% - 3.00 %
	Chlorure	0,010 % - 0.05%
	Expansion	0.00 mm - 5.00 mm
	Temps de Début de Prise	60 min - 150 min
	Surface spécifique de BLAINE	3000 à 3800 cm ² /gr
	Refus sue tamis 45 micron	≥ 20,0 %
Densité ciment	0.950 à 1.10	
DOSAGE	<ul style="list-style-type: none"> •A respecter en fonction du béton à confectionner (armé, non armé, précontraint) et de l'environnement existant (sec, humide, faible ou fortement agressif, ...) 	
USAGE RECOMMANDE	<ul style="list-style-type: none"> •Travaux pour des milieux Fortement agressifs (terrains gypseux, eaux à haute teneur en sulfates, eaux industrielles, eaux séléniteuses, ...) 	

