



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN

THÈSE

Présentée à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité: *Matériaux et Energies Renouvelables*

Par :

Mr BESSENOUCI Mohammed Zakaria

Sur le thème

Caractérisation, Modélisation et Analyse du Comportement Thermo-Mécanique des Matériaux de Construction à Base Pouzzolanique

Soutenue publiquement le 22./Mars./2018 devant le jury composé de :

Mr N.E CHABANE SARI	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr N.E BIBI TRIKI	Professeur	Université de Tlemcen	Directeur de thèse
Mr B. BENYOUCEF	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur
Mr Z. SERIER	Professeur	Université d'Oran	Examineur
Mr B.DRAOUI	Professeur	Université de Bechar	Examineur

*Unité de recherche de matériaux et des énergies renouvelables
(U.R.M.E.R)*

Dédicace

A la mémoire de mon père

A ma mère, j'espère que vous êtes tout simplement fière de moi

A mon frère, sa femme et leurs enfants

A ma sœur

A mon épouse, pour son soutien et sa patience

A mes enfants, Zineb, Riyad et Youcef

Remerciements

Le présent travail a été réalisé au sein de l'Unité de recherche de matériaux et des énergies renouvelables (U.R.M.E.R) de l'université de Tlemcen, en collaboration avec le laboratoire de mécanique de construction et le laboratoire de structure du département de génie civil de la faculté de technologie de l'Université de Tlemcen

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement mon directeur de thèse, le Professeur M^r Nacer Eddine BIBI TRIKI à U.A.B.de Tlemcen qui m'a montré la voie à suivre quant à la méthodologie adoptée pour élaborer cette thèse. Son encadrement, son aide mais également ses réflexions, ses observations, son soutien, sa confiance m'ont permis de mener à bien cette étude.

Je remercie M^r. Nacer Eddine CABANE SARI, Professeur à l'U.A.B.de Tlemcen de m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury et de l'intérêt qu'il a porté à ce travail. Ses nombreux conseils seront, j'en suis persuadé, d'une grande utilité pour moi.

Je tiens à remercier également M^r Boumediene .BENYOUCEF, Professeur à l'U.A.B de Tlemcen, M^r Zouaoui SERIER Professeur à l'université .de l'USTO d'Oran et M^r Belkacem DRAOUI, Professeur l'université de Bechar pour avoir accepté de juger ce travail. Leurs commentaires, leurs observations et leurs questions sont autant d'encouragements à poursuivre ce travail.

J'exprime mes remerciements à mon cher oncle M^r Kouider Négadi pour son aide et ses multiples encouragements répétés.

Mes remerciements et toute ma reconnaissance vont également à mes collègues du laboratoire du Génie Civil, M^r Mustapha HENNAOUI et M^r Hakim LAHCEL pour leur précieuse aide.

Je ne saurais, oublier tous ceux qui, quotidiennement, m'ont soutenu moralement et qui, de près ou de loin, ont contribué et permis à cette étude de trouver son aboutissement.

NOMENCLATURE

Nomenclature

Acronyme des termes utilisés :

CEM :	Ciment Portland
VER :	Volume élémentaire représentatif
BPZ :	Béton de pouzzolane de composition (sable de pouzzolane+ granulats de pouzzolane + ciment).
BGPZ:	Béton de pouzzolane de composition (sable de carrière+ granulats de pouzzolane + ciment)
BAEL:	Béton armé à l'état limite
REFUS:	La quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.
TAMISAT:	La quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

Lettres grecques :

ϕ :	Le flux de chaleur	(Watt)
ϕ_j :	Le flux de chaleur produit par effet joule de la résistance	(Watt)
ϕ_d :	Le flux de déperdition thermique à travers la boîte	(Watt)
ϕ_c :	Le flux de conduction à travers l'échantillon (Méthode des boîtes)	(Watt)
(ε) :	Porosité	(%)
α :	Compacité	(%)
λ :	Conductivité thermique	(W/m.K)
λ_f :	Conductivité thermique de la phase fluide (l'air)	(W/m.K)
λ_s :	Conductivité thermique de la matrice solide	(W/m.K)
$\lambda_{Parallèle}$:	Conductivité thermique du modèle parallèle	(W/m.K)
$\lambda_{Série}$:	Conductivité thermique du modèle série	(W/m.K)
$\langle \psi \rangle$:	Moyenne volumique	
$\langle \psi_s \rangle^s$:	La moyenne intrinsèque de gradient de température de la phase solide	
$\langle \psi_f \rangle^f$:	La moyenne intrinsèque de gradient de température de la phase fluide	
ρ_{app} :	Masse volumique apparente	(kg.m ⁻³)
ρ_{abs} :	Masse volumique absolue	(kg.m ⁻³)
ρ_{ag} :	Masse volumique apparente des grains	(kg.m ⁻³)
σ_{Tj} :	Contrainte à la traction au jour j en MPa	
σ_{Cj} :	Contrainte à la compression au jour j en Mpa	

Lettres latines :

ΔT :	Différence de température	(K)
T_C, T_f :	Température des faces chaude et froide de l'échantillon	(K)
T_{atm} :	Température atmosphérique	(K)
T_A :	Température ambiante de la salle d'expérience	(K)
T_{bt} :	Température à l'intérieur de la boîte	(K)
R_c :	Résistance de contact à l'interface résistance chauffante / échantillon	(Ω)
R :	Résistance électrique	(Ω)
C :	Capacité calorifique du thermocouple+résistance	(JK^{-1})
p :	Variable de Laplace	
r_0 :	Rayon du fil chauffant	(mm)
L :	Longueur du fil chauffant	(mm)
(n_{kr}) :	La part de disposition en série modèle de Krischer	
$(1-n_{kr})$:	La part de la disposition en parallèle modèle de Krischer	
(n_w) :	La part de disposition en série modèle de Willy et Soutwik	
$(1-n_w)$:	La part de la disposition en parallèle modèle de Willy et Soutwik	
$(q_f)^f$:	La moyenne intrinsèque des densités de flux de chaleur (phase fluide)	
$(q_s)^s$:	La moyenne intrinsèque des densités de flux de chaleur (phase solide) :	
\vec{n}_{sf} et \vec{n}_{fs} :	La normale a l'interface solide/fluide	
A_{sf} et A_{fs} :	L'interface solide/fluide	
V_s :	Le volume local de la phase solide	
V_f :	Le volume localde la phase fluide	
q :	Densité du flux de chaleur	($w m^{-2}$)
a :	Diffusivité thermique (m^2s^{-1})	
d/D :	Classe granulaire	
V :	Tension	(volt)
F :	Charge maximale	(kgm^2s^{-2})

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Caractéristiques chimiques de la pouzzolane gisement de Bou Hamidi (Nord-Ouest algérien)

Tableau I.2 : Tamissats cumulés pour la classe granulaire 0/3 Masse sèche M=2 Kg

Tableau I.3 : Tamissats cumulés pour la classe granulaire 3/8 Masse sèche M=2 Kg

Tableau I.4 : Tamissats cumulés pour la classe granulaire 8/16 Masse sèche M=2 Kg

Tableau I.5 : Caractéristiques du sable de carrière de Sid El Abdli

Tableau I.6 : Compositions chimique du ciment en %

Tableau I.7 : Caractéristiques physiques du ciment

Tableau I.8 : Masse volumique apparente de la pouzzolane concass

Tableau I.9 : Masse volumique absolue de la pouzzolane concassée

Tableau II.1 : Valeur du coefficient granulaire (G)

Tableau II.2 : Valeur du terme correcteur (K)

Tableau II.3 : Valeur du coefficient de compacité (\square)

Tableau II.4 : Composition des bétons de pouzzolane

Tableau V.1 : Calcul d'écart type et écart type sur la moyenne

Tableau VI.1 ; Classification des bétons légers selon [49]

Tableau VI.2 ; Classification des bétons légers selon [50]

Tableau VI.3 : Classification des différentes formulations du béton de pouzzolane de Béni-Saf

Tableau VI.4 : Conductivité thermique apparente de la formulation BPZ1 avec ajouts

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Spectre de diffraction des rayons X de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf.

Figure I.2: Pouzzolane de Béni-Saf

Figure I.3: Coupe d'un matériau poreux

Figure I.4: Les deux concasseurs du laboratoire MDC

Figure I.5: Les tamis de l'analyse granulométrique

Figure I.6: Sable concassée de la pouzzolane de Béni-Saf

Figure I.7: Courbe granulométrique de la pouzzolane concassée 0/3 de Béni-Saf

Figure I.8: Classe granulaire 3/8 de la pouzzolane de Béni-Saf

Figure I.9: Courbe granulométrique de la pouzzolane concassée 3/8 de Béni-Saf

Figure I.10: Classe granulaire 8/16 de la pouzzolane de Béni-Saf.

Figure I.11: Courbe granulométrique de la pouzzolane concassée 8/16 de Béni-Saf

Figure I.12: Courbe granulométrique du sable de la carrière de Sid El abdli (ENG)

Figure I.13: Méthode de l'éprouvette graduée pour la détermination de la masse volumique absolue.

Figure II.1: Abaque permettant d'évaluer le dosage en ciment en fonction du rapport C/E et de l'affaissement

Figure II.2: Courbe granulométrique de référence

Figure II.3: Détermination des pourcentages en volume absolu de matériau pour le béton type BGPZ1 pour un dosage en ciment de 350 kg/m^3

Figure II.4: Détermination des pourcentages en volume absolu de matériau pour le béton type BGPZ2 pour un dosage en ciment de 300 kg/m^3

Figure II.5: Détermination des pourcentages en volume absolu de matériau pour le béton type BGPZ3 pour un dosage en ciment de 250 kg/m^3

Figure II.6: Détermination des pourcentages en volume absolu de matériau pour le béton type BPZ1 pour un dosage en ciment de 350 kg/m^3

Figure II.7: Détermination des pourcentages en volume absolu de matériau pour le béton type BPZ2 pour un dosage en ciment de 300 kg/m^3

Figure II.8: Détermination des pourcentages en volume absolu de matériau pour le béton type BPZ3 pour un dosage en ciment de 250 kg/m^3

Figure III.1: Machine d'essai à la compression

Figure III.2: Eprouvette cylindrique

Figure III.3: Résistance à la compression du béton de pouzzolane pour un dosage en ciment de 350 kg/m^3

Figure III.4: Résistance à la compression du béton de pouzzolane pour un dosage en ciment de 300 kg/m^3

Figure III.5: Résistance à la compression du béton de pouzzolane pour un dosage en ciment de 250 kg/m^3

Figure III.6: Effet du sable de carrière de Sidi El Abdli S_{ENG} sur la résistance à la compression

Figure III.7: Evolution de la résistance à la compression en fonction de la porosité ε pour les différents bétons de pouzzolane (28 jours et 90 jours)

Figure III.8: Effet du rapport G / S sur la résistance à la compression des bétons de pouzzolane pour les âges 7j, 14j, 28j, et 90j.

Figure III.9: Résistance à la traction du béton de pouzzolane pour un dosage en ciment de 350 kg/m^3

Figure III.10: Résistance à la traction du béton de pouzzolane pour un dosage en ciment de 300 kg/m^3

Figure III.11: Résistance à la traction du béton de pouzzolane pour un dosage en ciment de 250 kg/m^3

Figure III.12: Masse volumique apparente du béton de pouzzolane en fonction de l'âge de béton de pouzzolane

Figure. IV.1: Élément de volume

Figure. IV.2: Mur simple

Figure. IV.3: Matériaux poreux

Figure. IV.4: Volume élémentaire représentatif (VER)

Figure V.1: Schéma de principe de la méthode de la plaque chaude gardée, [29]

Figure V.2: Coupe du dispositif " boîte de mesure"

Figure V.3: Schéma des transferts autour du fil chaud

Figure V.4 : Schéma de principe de la méthode flash [30]

Figure V.5: Schéma de principe du dispositif de mesure de la conductivité thermique

Figure V.6: Vue agrandi du montage plaques de cuivre et l'échantillon

Figure V.7: Boitier de mesure

Figure V.8: Plaque chauffante et dalle en béton

Figure V.9: Multimètre M890C+

Figure V.10: Le premier ensemble thermocouples et plaque de cuivre

Figure V.11: (Ensemble thermocouples + plaque de cuivre) + (échantillon à tester)

Figure V.12: Premier et deuxième ensemble thermocouples + plaque de cuivre + (échantillon à tester)

Figure V.13: Anneau de garde

Figure V.14: Vue d'ensemble du boîtier et du dispositif de mesure

Figure V.15: Modèle parallèle et série

Figure V.16: Représentation du modèle de Krischer

Figure V.17: Représentation du modèle Willy et Soutwick

Figure V.18: Modèle de Maxwell avec inclusions sphériques.

Figure V.19: Représentation du modèle mixte série-parallèle

Figure VI.1: L'évolution de la conductivité thermique apparente λ mesurée et calculée par les modèles série, parallèle, le modèle mixte et celui de Hashin et Shtrikman, en fonction de la porosité des bétons pour ($\lambda_s = 1 \text{ w/mk}$)

Figure VI.2: L'évolution de la conductivité thermique apparente λ mesurée et calculée par les modèles série, parallèle, le modèle mixte et celui de Hashin et Shtrikman, en fonction de la porosité des bétons pour ($\lambda_s = 1,2 \text{ w/mk}$)

Figure VI.3: L'évolution de la conductivité thermique apparente λ mesurée et calculée par les modèles série, parallèle, le modèle mixte et celui de Hashin et Shtrikman, en fonction de la porosité des bétons pour ($\lambda_s = 1,5 \text{ w/mk}$)

Figure VI.4: L'évolution de la conductivité thermique apparente λ mesurée et calculée par les modèles série, parallèle, le modèle mixte et celui de Hashin et Shtrikman, en fonction de la porosité des bétons pour ($\lambda_s = 1,7 \text{ w/mk}$)

Figure VI.5: L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée en fonction du rapport gravier /sable (G/S).

Figure VI.6: La variation de la conductivité thermique et de la résistance mécanique en fonction de la masse volumique apparente du béton.

Figure VI.7: La variation de la conductivité thermique en fonction de la résistance à la compression des bétons.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE	2
-----------------------	---

CHAPTRE I: IDENTIFICATION DES MATERIAUX

I.1. INTRODUCTION	6
I.2. CARACTERISATION CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE	6
I.2.1 L'analyse chimique	6
I.2.2 L'analyse minéralogique	6
I.3. CARACTERISATION PHYSIQUES	7
I.3.1. Aspects physiques	7
I.3.2 L'analyse granulométrique	8
I.3.2.1 Principe de l'essai	9
a. Le concassage	9
b. Le Tamisage	9
c. Courbes granulométriques	10
1 Sable de pouzzolane 0/3	10
2 Classe granulaire 3/8	11
3 Classe granulaire 8/16	12
4 Sable de carrière de Sid El Abdelli	13
I.3.3. Ciment	14
I.3.4. Masses volumiques	15
I.3.4.1 Masse volumique apparente ρ_{app}	15
I.3.4.2 Masse volumique absolue ρ_{abs}	15
I.5. CONCLUSION	16

CHAPITRE II : FORMULATION DU BETON DE POUZZOLANE

II.1. INTRODUCTION	18
II.2. FORMULATION DU BETON	18
II.2.1. Définition	18
II.2.2. Méthode de formulation de Dreux et Goriss	18
II.2.2.1. Détermination du dosage en ciment	18
II.2.2.2. Détermination du dosage en eau	19
II.2.2.3. Tracé de la courbe granulaire	20
II.2.2.4. Détermination du dosage des granulats	21
1. Coefficient de compacité (γ)	21
2. Volume absolu des constituants	22
II.2.2.5. Détermination de la densité théorique du béton frais ρ_{fb}	23
II.3. CONCLUSION	27

CHAPITRE III : CARACTERISATIONS MECANIQUE DU BETON DE POUZZOLANE

III.1. INTRODUCTION	29
III.2. CONFECTION DES EPROUVETTES	29
III.3. RESISTANCES MECANIQUES	29
III.3.1. Résistance à la compression	30
II.4. RESULTATS ET DISCUSSIONS	31
III.5. CONCLUSION	36

CHAPITRE IV TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONDUCTION ET OUTILS MATHEMATIQUES DE CHANGEMENT D'ECHELLE DANS UN MILIEU POREUX

V.1. INTRODUCTION	39
IV.2. LES CARACTERISTIQUES THERMO-PHYSIQUES	40
IV.2.1. La Diffusivité thermique	40

IV.2.2. L'effusivité thermique	40
IV.2.3. La chaleur massique	41
IV.2.4. La conductivité thermique	41
IV.3. LE TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONDUCTION DANS UN MILIEU POREUX	42
IV.3.1. La conductivité thermique apparente	42
IV.3.2. Prise de moyenne volumique	43
IV.3.3. Les équations locales et modélisation du transfert de conduction de chaleur	46
IV.3.3.1. Première étape : Écriture des lois de transfert dans un milieu diphasique et conditions aux limites	46
IV.3.3.2. Deuxième étape : Obtention des champs des <i>variables et densités de flux macroscopiques</i> par prise de <i>moyenne spatiale</i> .	46
IV.3.3.3. Troisième étape : Fermeture	47
IV.4. CONCLUSION	49
CHAPITRE V : DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE MESURE ET MODELES DE PREDICTION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE APPARENTE	
V.1. INTRODUCTION	52
V.2. LES METHODES DE MESURE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE APPARENTE	52
V.2.1 Les méthodes en régime stationnaire	53
V.2.1.1 Méthode de la plaque chaude gardée	53
V.2.1.2. Méthode des boites	54
V.2.2. Les méthodes en régime instationnaire	56
V.2.2.1. Méthode du fil chaud	56
V.2.2.2. Méthode flash	57
V.2.2.3. Choix d'une méthode	58

V.3. DISPOSITIF DE MESURE EXPERIMENTAL DE LA CONDUCTIVITE	
THERMIQUE	59
V.3.1. Description du dispositif de mesure	59
V.3.1.1. Montage et mesure du dispositif	61
1 Montage	61
2. Différentes phases de mesure	63
V.4.CALCUL D'ERREURS EXPERIMENTALES	64
V.4.1.Méthode d'estimation statistique	65
V.5.MODELES DE PREDICTION ANALYTIQUES DE LA CONDUCTIVITE	
THERMIQUE	66
V.5.1. Modèles parallèle et série	67
V.5.2 Modèle de Hashin-Shtrikman	67
V.5.3. Modèle de Krischer	68
V.5.4. Modèle de Willy et Soutwik	68
V.5.5. Modèle de Maxwell	69
V.5.6. Modèle mixte série parallèle	70
V.6. CONCLUSION	71
CHAPITRE VI : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATION	
VI.1. INTRODUCTION	73
VI.2. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATION	73
VI.3. CONCLUSION	79
CONCLUSION GENERALE	
CONCLUSION GENERALE	82
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	86

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le logement présente l'une des préoccupations majeures en Algérie pour les pouvoirs publics. En effet, la réalisation des logements nécessite des moyens humains et financiers importants.

Comme nous le savons tous, l'étape de la réalisation d'un logement vient après une première étape appelée conception architecturale et étude génie civil. L'architecture est l'art d'occupation de l'espace à l'intérieur d'une habitation en respectant au maximum, l'orientation des façades par rapport à la direction du soleil et des vents dominants pour une meilleure ventilation naturelle. Malheureusement, ce concept qui est en adéquation avec l'environnement perd un peu de sa légitimité, si le choix des matériaux de construction dans une étude de génie civil est basé seulement sur une seule caractéristique qui est la résistance mécanique. Le comportement vis à vis des différentes sollicitations d'un matériau de construction dans une structure de bâtiment est primordial, mais, il est utile de ne pas négliger la sensation du confort thermique en assurant un choix convenable des matériaux afin d'éviter le recours à une ventilation artificielle qui fait augmenter les gaz à effet de serre.

Le béton est un mélange dont la nature de ses constituants peut avoir un impact sur ses caractéristiques thermiques et mécaniques. La formulation d'une composition type d'un béton nécessite l'obtention et le respect des propriétés désirées telle que, la résistance mécanique, durabilité, aspect architectural (forme, teintes, textures), isolation thermique et acoustique.

L'intérêt porté aux matériaux de construction à base de granulat léger notamment le béton de pouzzolane est dû, principalement au développement du marché du logement et la nécessité de diminuer le coût de consommation de l'énergie, tout en assurant un certain confort thermique dans l'habitat. Des études de l'effet de l'addition de sable de pouzzolane dans des matériaux de construction ont montré que cette addition donne de bonnes propriétés thermiques [1]

Le poids, est un facteur très important, sa réduction entraîne une reconsidération dans les calculs des structures porteuses de construction de bâtiment, facilite la manutention dans les chantiers et permet une économie appréciable en matière de main d'œuvre et par la suite d'énergie.

La pouzzolane qui est d'origine volcanique, se trouve en quantité appréciable dans la carrière de Bou Hamidi dans la région de Béni-Saf à l'ouest de l'Algérie.

L'impact direct sur l'industrie de la construction de l'habitat est la légèreté de la structure, qui peut avoir une influence sur le calcul de dimensionnement des différents éléments constituant le squelette du bâtiment tels que les colonnes, les poutres et les fondations.

Il est nécessaire pour un matériau qui est destiné à l'habitat de le caractériser et d'identifier ses propriétés thermo-physique et mécanique.

L'objectif de ce travail est une étude expérimentale thermomécanique d'un matériau de construction notamment le béton à base de granulats légers, d'une masse volumique de 1500 à 1800 Kg/m³. Les granulats sont confectionnés à partir d'un matériau appelé pouzzolane.

La pouzzolane qui est d'origine volcanique, se trouve en quantité appréciable dans la carrière de Bou Hamidi dans la région de Beni-Saf à l'ouest de l'Algérie. Elle est broyée sous forme de poudre, pour une utilisation comme ajout cimentaire et sous la forme de granulés pour la confection du béton léger. Afin d'élargir l'utilisation de la pouzzolane comme constituant important dans les matériaux de construction, nous avons substitué les granulats légers de pouzzolane aux granulats rigides dans la confection du béton de pouzzolane.

Après une identification de l'ensemble des matériaux constituant le béton de pouzzolane et la confection des différentes formulations de béton, nous avons procédé à des essais de la résistance mécanique et de la conductivité thermique apparente pour chaque formulation de béton pour un choix optimale.

Le mémoire se structure en six chapitres :

Le premier chapitre a comme objectif de mettre en évidence les différents granulats qui forment le squelette granulaire du béton. L'impact sur la fiabilité de l'utilisation de ces matériaux dans le domaine du bâtiment exige une analyse et une caractérisation d'ordre chimique, minéralogique et physique

Le deuxième chapitre est consacré à la composition d'un béton qui consiste à réaliser le mélange optimal des diverses proportions des granulats (sable et gravillons), du dosage du ciment, ainsi que la quantité d'eau de gâchage nécessaire. Pour la formulation de notre béton, nous avons choisi la méthode de Dreux et Goriss qui est réalisée en deux phases, par une approche graphique et expérimentale. Nous recherchons conjointement la résistance à la compression et l'ouvrabilité désirée à partir des données de base essentielles pour la formulation du béton telles que la dimension des granulats (D_{max}) et le rapport ciment/eau (C/E).

Le troisième chapitre présente les résultats des essais expérimentaux de la résistance à la compression effectuée dans le laboratoire de la résistance mécanique du département du génie civil. L'utilisation de la pouzzolane de Béni-Saf comme constituant essentiel de nos

différentes formulations de béton nous conduit à vérifier l'impact et la fiabilité de ces matériaux dans le domaine du bâtiment. Il est nécessaire de connaître le comportement et les réponses du béton de pouzzolane vis-à-vis des sollicitations mécaniques pouvant être appliquées.

Dans le quatrième chapitre, nous donnerons les définitions générales sur les caractéristiques thermo-physiques et nous présenterons un bilan thermique sur le mode de transfert de chaleur par conduction dans un milieu poreux. Nous exposons la technique de prise de moyenne volumique et ces théorèmes qui, à partir des équations de chaleur locales au niveau microscopique, nous établirons des équations moyennes de la conduction à l'échelle macroscopique à partir desquelles les modèles macroscopiques sont obtenus et qui permettent la prédiction de la conductivité thermique apparente λ_{app} de matériaux granulaires diphasiques en fonction des conductivités thermiques λ_s et λ_f et de leur porosité ε .

L'objectif du cinquième chapitre débute par la présentation d'une manière rapide les méthodes de mesures de la conductivité thermique. Ensuite, nous présenterons notre dispositif de mesure expérimental de la conductivité thermique. Une présentation de quelques modèles analytiques de prédiction de la conductivité thermique avec lesquels sera faite une comparaison des résultats expérimentaux et les valeurs théoriques.

Essentiellement, le cinquième chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats expérimentaux et d'explicitier l'effet des différentes caractéristiques qui peuvent influencer la conductivité thermique apparente comme, la masse volumique, la porosité et la résistance à la compression qui présente un critère important pour les matériaux de construction. Il existe une relation très étroite entre la conductivité thermique, la résistance mécanique et les agrégats constituants majoritaires dans la confection du béton.

Chapitre I

IDENTIFICATION DES MATERIAUX

I.1. INTRODUCTION

Les granulats sont définis par la norme P 18-540 comme un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, destinés à la confection des mortiers, des bétons

Les différents granulats forment le squelette granulaire du béton. L'impact sur la fiabilité de l'utilisation de ces matériaux dans le domaine du bâtiment exige une analyse et une caractérisation d'ordre chimique, minéralogique et physique [2].

I.2. CARACTERISATION CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE

I.2.1 L'analyse chimique

En général, la composition chimique des granulats est à base de silice, chaux, alumine, chlorure, magnésie et oxydes alcalins qui à forte concentration peuvent nuire à la qualité du béton.

A titre indicatif, les oxydes alcalins réagissent de façon dangereuse avec le ciment, les chlorures modifient la cinétique d'hydratation du liant et favorisent la corrosion des armatures ou des câbles de précontrainte. [2]

Le but de l'analyse chimique est de déterminer les compositions élémentaires des différents minéraux des granulats. Le tableau.I.1 donne les caractéristiques chimiques de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf qui contient plus de 46,0 % de silice et environ 10 % de chaux donc une structure vitreuse. De plus, la différence entre la silice et la chaux est d'environ 36,44 %, ce qui est supérieure à 34 % [3], et qui veut dire que la teneur en verre est appréciable.

Composant	Symbole	Unité	Teneurs
La silice	SiO_2	%	46,60
L'alumine	Al_2O_3	%	17,50
L'oxyde de fer	Fe_2O_3	%	9,52
La chaux	CaO	%	10,10
La magnésie	MgO	%	2,40
Les sulfates	SO_3	%	0,40
Les chlores	Cl	%	0,00
Les oxydes de potassium	K_2O	%	1,47
Les oxydes de sodium	Na_2O	%	3,23

Tableau I.1 Caractéristiques chimiques de la pouzzolane gisement de Bou Hamidi (Nord-Ouest algérien) [4]

I.2.2 L'analyse minéralogique

L'analyse minéralogique a pour but d'identifier les espèces minérales et l'état de cristallisation des minéraux. Le caractère amorphe de ces éléments est déterminant pour leur

capacité à réagir avec la chaux en présence d’humidité pour donner des produits dotés de structure résistante [5].

La présence de clivages dans les minéraux (micas, feldspaths, etc.) accroît les retraits.

Si un granulat à un faible coefficient de dilatation thermique est favorable pour s'opposer à la fissuration de retrait thermique, mais défavorable-du point de vue de la tenue dans un milieu agressif acide [2].

Le diagramme de diffraction au rayon X(DRX) figure I.1, présente des raies fines qui indiquent un bon état de cristallisation. La pouzzolane de Béni Saf est riche en silice, alumine, fer et magnésium (Feldspath plagioclase, Pyroxène, quartz...). La couleur rouge est due à la présence de l’hématite [6].

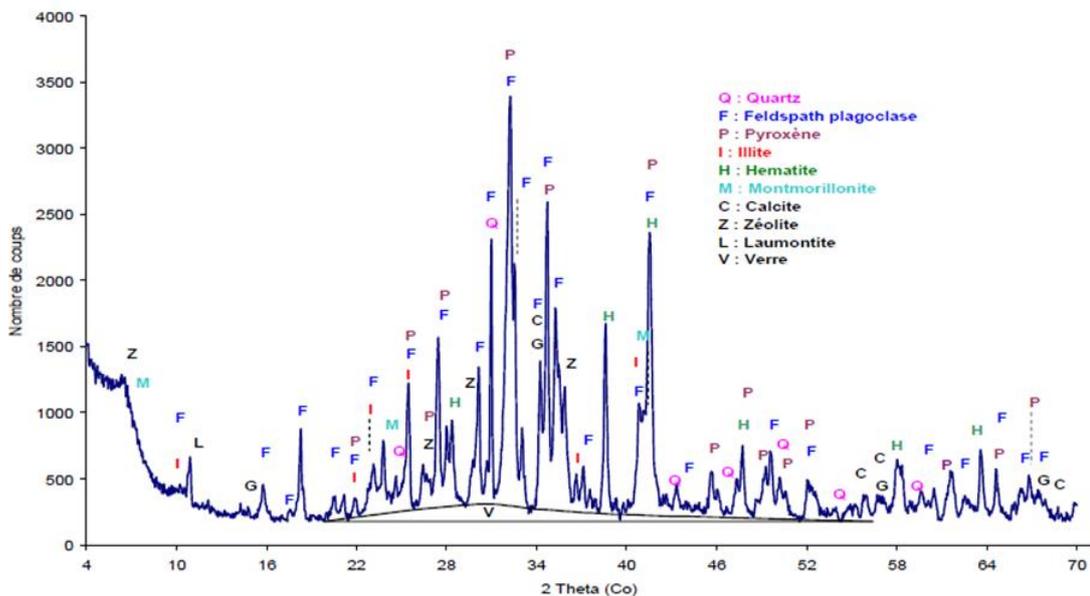


Figure I.1 : Spectre de diffraction des rayons X de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf [6]

En raison de la teneur élevée en silice amorphe, il est nécessaire de procéder à une étude plus approfondie des éventuelles réactions nocives de silice alcaline dans des propriétés des bétons légers [7]

I.3. CARACTERISATION PHYSIQUES

I.3.1. Aspects physiques

Les grains d’un gravier se distinguent par leurs formes et leurs états de surfaces. Ces deux caractéristiques influent directement sur la mise en œuvre et la qualité du béton confectionné.

La forme du granulat de la pouzzolane de Béni-Saf est irrégulière et va vers la forme ramassée et ronde, présentant une surface rugueuse qui, éventuellement mélangé à un liant donnera une résistance mécanique appréciable [8].

Les grains de la pouzzolane ont une structure poreuse constituée de pores assez rapprochés les uns des autres, comme le montre la figure I.2.



Figure I.2 : Pouzzolane de Béni-Saf

On peut distinguer deux types de porosité, celle dite pores ouverts et l'autre appelée pores fermés.

La figure I.3 présente les pores suivant leur position par rapport au milieu extérieur :

Les pores interconnectés ou pores ouverts qui communiquent avec l'extérieur par deux extrémités (au moins).

les pores isolés qui ne communiquent pas avec l'extérieur.

les pores ou bras morts sont interconnectés avec le milieu extérieur par une seule de leurs extrémités. Ils peuvent donc être accessibles à un fluide extérieur mais ne participent pas au transport.

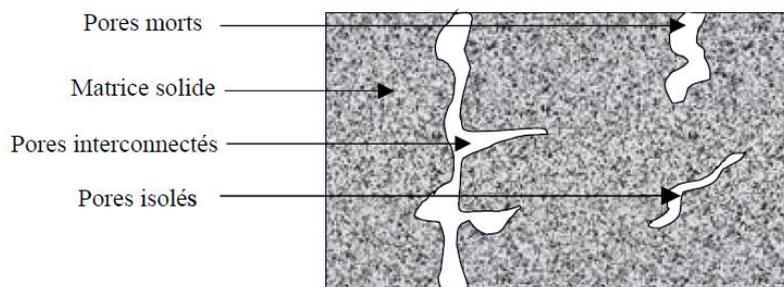


Figure I.3 : Coupe d'un matériau poreux

I.3.2 L'analyse granulométrique

Les granulats sont classés d'après leurs dimensions suivant la norme NFP18-101 de sorte qu'une classe de granulat est noté d/D caractérisée par les dimensions extrêmes d et D

représentant simultanément le diamètre minimum (tamisat ou passant) et le diamètre maximum des grains (refus).

Lorsque d est inférieur à 0,5 mm le granulat est dénommé 0/D

I.3.2.1 Principe de l'essai

a. Le concassage

Dans un premier temps, nous avons procédé à un concassage de la pouzzolane à l'aide des deux concasseurs du laboratoire Mécanique de Construction (MC) au niveau du département du génie civil pour les classes 3/8 ,8/16 et la classe 0/3. Figure I.4.



Figure I.4 : Les deux concasseurs du laboratoire M.C

b. Le tamisage

L'essai consiste à séparer au moyen d'une série de tamis pendant une durée de deux minutes le matériau concassé en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Figure I.5.

En pesant les masses des différents refus et tamisât, nous obtiendrons les pourcentages pondéraux qui seront exploités sous forme graphique.



Figure I.5 : Les tamis de l'analyse granulométrique

c. Courbes granulométriques

Il suffit de porter les pourcentages pondéraux des tamisats cumulés et les diamètres des tamis sur une feuille semi-logarithmique :

En abscisse : les dimensions des mailles, échelle logarithmique.

En ordonnée : les pourcentages des tamisats sur une échelle arithmétique.

La courbe granulométrique obtenue nous renseigne sur la distribution en pourcentage des granulats se trouvant dans une classe granulaire d/D. L'étalement du granulat, la plus ou moins grande proportion d'éléments fins et la continuité ou la discontinuité de la granularité.

Les résultats obtenus des passants cumulés et les courbes granulométriques correspondantes après concassage et analyse granulométrique faite au laboratoire M.C du département du génie civil sur des échantillons de pouzzolane de classes (0/3, 3/8, et 8/16) sont présentés comme suit :

1. Sable de pouzzolane 0/3

Le sable utilisé est un granulat normal de classe granulaire s'étendant entre 0 et 3 mm, figure I.6. La figure I.7 montre une granulométrie continue et il est un peu grossier. Il donnera éventuellement des bétons relativement résistants. Le tableau I.2 présente les tamissats cumulés.



Figure I.6 : Sable concassée de la pouzzolane de Béni-Saf

Diamètre tamis (mm)	Masse des refus (g)	Masse des refus cumulés Mc (g)	% des refus cumulés Pr=(Mc/M)100	Module du tamis Pt=100-Pr
3,15	0	0	0	100,00
2,5	49,5	49,5	2,475	97,53
2	281	330,5	16,525	83,48
1,6	549	879,5	43,975	56,03
1,25	359	1238,5	61,925	38,08
0,63	239,5	1478	73,9	26,10
0,315	227	1705	85,25	14,75
0,16	121,5	1826,5	91,325	8,68
0,125	57,5	1884	94,2	5,80
0,08	80,5	1964,5	98,225	1,78
Fond	32,5			

Tableau I.2 : Tamissats cumulés pour la classe granulaire 0/3 Masse sèche M=2 Kg

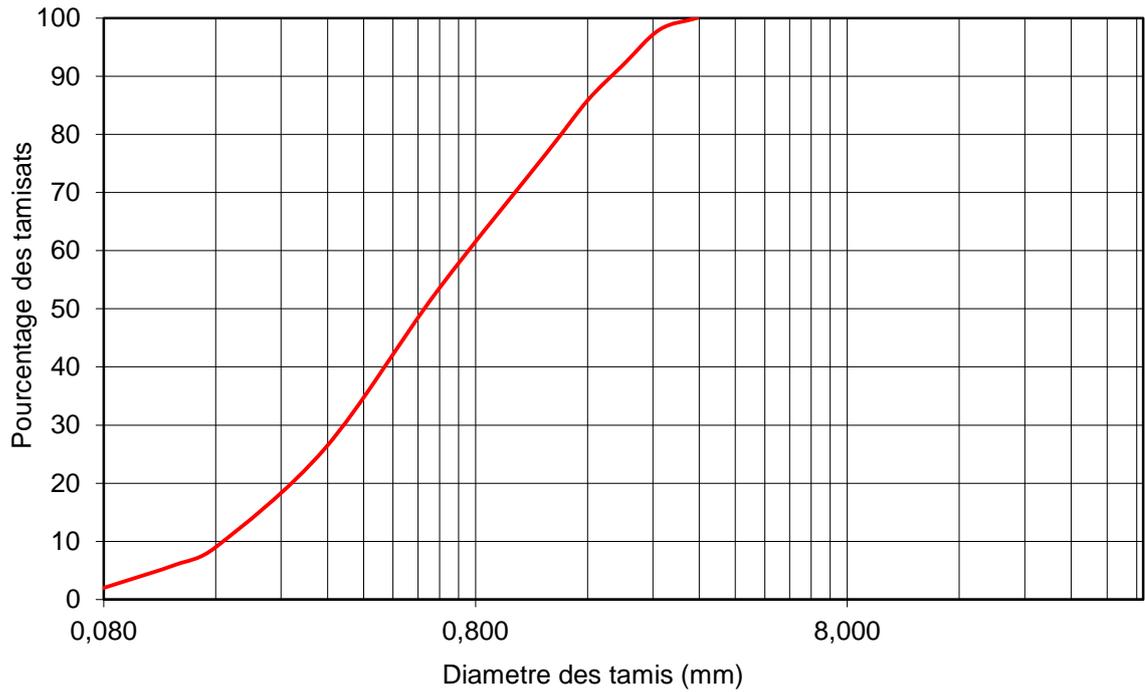


Figure I.7 : Courbe granulométrique de la pouzzolane concassée 0/3 de Béni-Saf

2. Classe granulaire 3/8

La figure I.8 montre le granulat 3/8 de classe granulaire présentant une courbe a granulométrie continue constatée sur la figure I.9. Ce granulat est effectivement un gravier fin.

Les tamissats cumulés pour cette classe granulaire sont représentés sur le tableau I.3



Figure I.8 : Granulat 3/8 de la pouzzolane de Béni-Saf

Diamètre tamis (mm)	Masse des refus (g)	Masse des refus cumulés Mc (g)	% des refus cumulés $Pr=(Mc/M)100$	Module du tamis $Pt=100-Pr$
10	0	0	0	100,00
8	458	458	22,9	77,10
6,3	481	939	46,95	53,05
5	317,5	1256,50	62,825	37,18
4	315,5	1572	78,6	21,40
3,25	216,5	1788,5	89,425	10,58
2,5	110,5	1899	94,95	5,05
2	82,5	1981,5	99,075	0,92
1,7	16,5	1998	99,9	0,10
Fond	1,75	1999,75	99,987	0,01

Tableau I.3 : Tamissats cumulés pour la classe granulaire 3/8
Masse sèche M=2 Kg

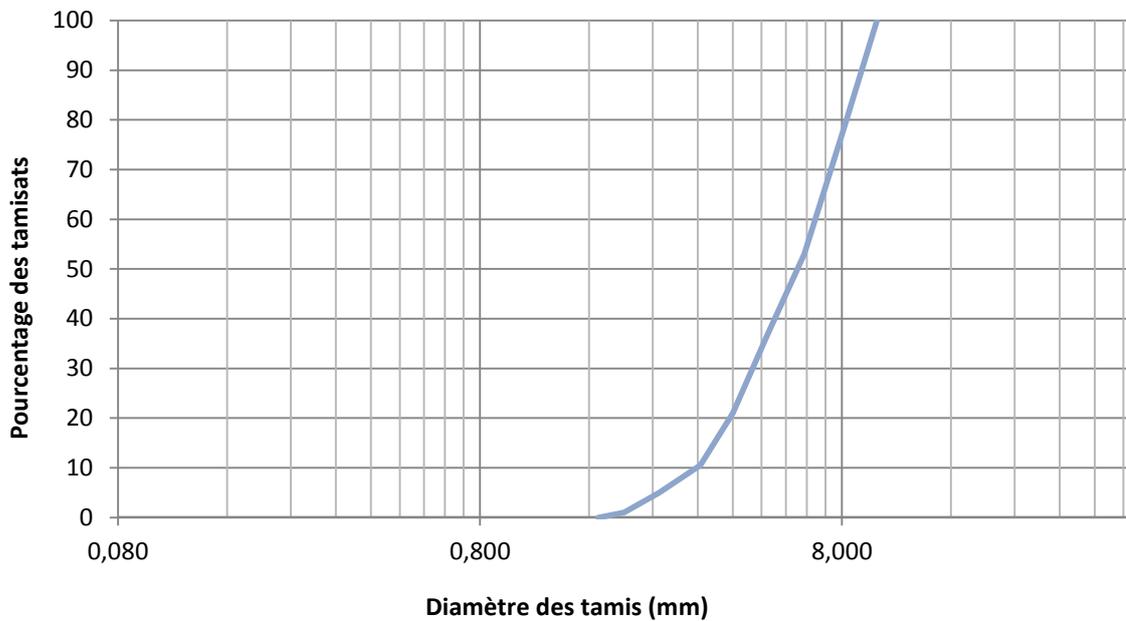


Figure I.9 : Courbe granulométrique de la pouzzolane concassée 3/8 de Béni-Saf

3. Classe granulaire 8/16

La courbe granulométrique figure I.11 de cette classe ne présente pas de discontinuité.



Figure I.10: Classe granulaire 8/16 de la pouzzolane de Béni-Saf.

Les tamissats cumulés pour la classe granulaire 8/16 sont représentés sur le tableau I.4

Diamètre tamis (mm)	Masse des refus (g)	Masse des refus cumulés Mc (g)	% des refus cumulés $Pr=(Mc/M)100$	Module du tamis $Pt=100-Pr$
16,000	0	0	0,00	100,00
15,000	379,5	379,5	18,98	81,03
14,000	329,5	709	35,45	64,55
12,500	412,5	1121,50	56,08	43,93
10,000	410,5	1532	76,60	23,40
8	449,5	1981,5	99,08	0,92
6,3	15	1996,5	99,83	0,17
Fond	3			

Tableau I.4 : Tamusats cumulés pour la classe granulaire 8/16

Masse sèche M=2 Kg

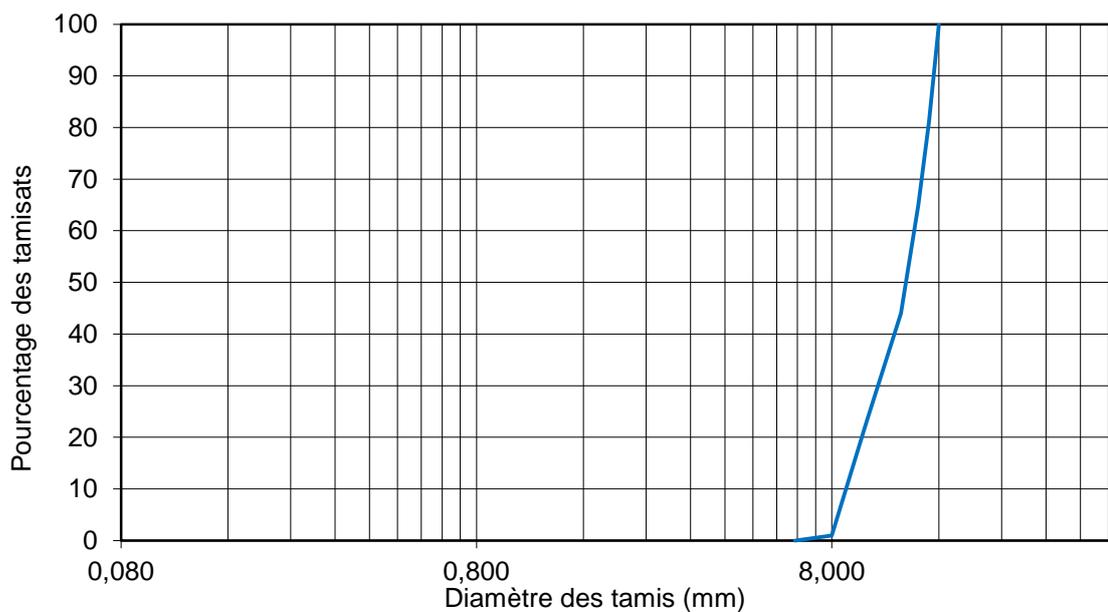


Figure I.11 : Courbe granulométrique de la pouzzolane concassée 8/16 de Béni-Saf

4. Sable de carrière de Sid El Abdelli

Le sable utilisé est un granulat de classe granulaire s'étendant entre 0 et 6 mm. C'est un produit, de la carrière ENG (Entreprise Nationale des Granulats, unité de Sid 'El Abdelli),

La courbe d'analyse granulométrique du sable de la carrière de Sid El Abdelli (ENG) présentée sur la figure I.12 mise à notre disposition, montre que ce sable est un sable plutôt grossier. Le tableau I.5 présente les caractéristiques du sable de carrière.

Caractéristiques	Sable de carrière Sidi Abdelli S _{ENG}
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1426
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2600
Module de finesse (MF)	2.95

Tableau I.5 : Caractéristiques du sable de carrière de Sid El Abdelli

:

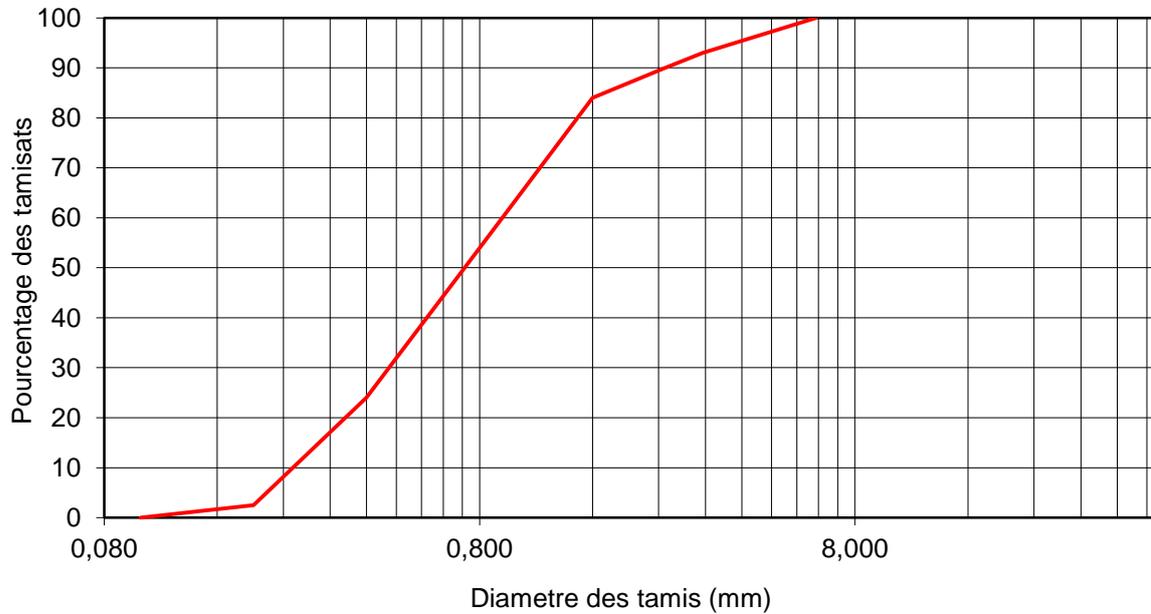


Figure I.12 : Courbe granulométrique du sable de la carrière de Sid El abdelli (ENG)

I.3.3. Ciment

Le ciment utilisé pour les différentes formulations appartient à la classe CPJ CEM II / A 42,5, qui répond à la norme de l'Algérie NA 442/2000, produit par la cimenterie de Béni Saf de la wilaya de Ain-Témouchent [9]. Il se compose de 80% de clinker et de 15% de pouzzolane naturelle. Ses caractéristiques sont présentées dans les tableaux I.6 et I.7.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaO libre
25,63	3,66	2,55	60,15	0,99	2,53	1,02

Tableau I.6 : Compositions chimique du ciment en %

Masse volumique apparente (kg/m ³)	1020
Masse volumique absolue (kg/m ³)	3071.2
Surface spécifique (cm ² /g)	3598.2

Tableau I.7 Caractéristiques physiques du ciment

I.3.4. Masses volumiques

I.3.4.1. Masse volumique apparente ρ_{app}

La masse volumique apparente d'un granulat donné est le rapport entre sa masse m et son volume apparent qu'il occupe, vides inter-granulaires compris.

$$\rho_{app} = \frac{m}{V_{app}} \quad (I.1)$$

Conduite de l'essai

- Prélever un échantillon de granulat donné de masse $m=2000g$
- Remplir le bécher en laissant tomber le granulat d'une dizaine de centimètre et sans tasser.
- Le bécher doit être arasé avec un réglé
- Peser le bécher rempli et araser (cette pesée indique la masse m du granulat).

Les résultats obtenus sont présentés sur le tableau I.8

Classe granulaire	0/3	3/8	8/16
1 ^{er} essai	1150	875	755
2 ^{ème} essai	1055	895	820
3 ^{ème} essai	1255	890	780
Masse volumique apparente moyenne (Kg/m ³)	1153,33	886,67	785,00

Tableau I.8 : masse volumique apparente de la pouzzolane concassée

I.3.4.2. Masse volumique absolue ρ_{abs}

La masse volumique absolue d'un granulat donné est le rapport entre sa masse m et le volume absolu sans tenir compte des vides occupés par les pores ouverts ou fermés.

$$\rho_{abs} = \frac{m}{V_{abs}} \quad (I.2)$$

Conduite de l'essai voir figure I.13

- Prélever un échantillon de granulat sec donné de masse $m=300g$
- Remplir l'éprouvette graduée avec un volume d'eau V_1 .
- Introduire le granulat dans l'éprouvette graduée en chassant les bulles d'air.
- lire le nouveau volume V_2 .

La masse volumique absolue est : $\rho_{abs} = \frac{m}{V_2 - V_1}$ (I.3)

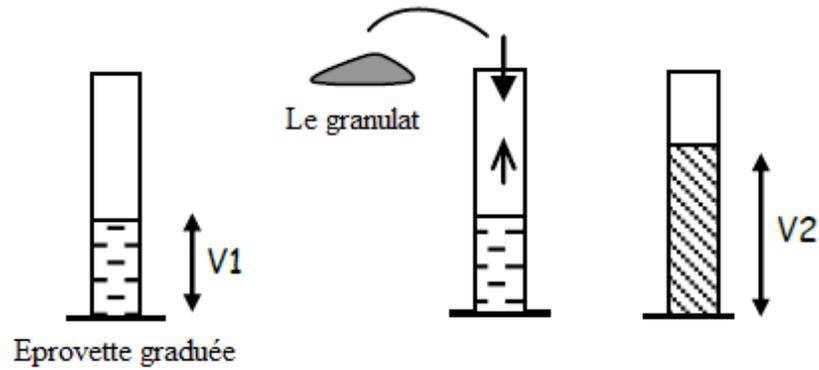


Figure I.13 : Méthode de l'éprouvette graduée pour la détermination de la masse volumique absolue.

Les résultats de la masse volumique absolue sont présentés sur le tableau I.9

Classes granulaires	0/3	3/8	8/16
1 ^{er} essai	2390	1845	1825
2 ^{ème} essai	2410	1915	1850
3 ^{ème} essai	2350	1835	1750
Masse volumique absolue moyenne (Kg/m ³)	2383,33	1865	1808,33

Tableau I.9 : masse volumique absolue de la pouzzolane concassée

I.5. CONCLUSION

Les classes granulaires 3/8 et 8/16 de pouzzolane présentent des masses volumiques absolues égales à 1800 Kg/m³, ils font partie des granulats dit granulats légers. Leur forme ronde et ramassée facilitera la mise en œuvre du béton de pouzzolane qui donneront certainement des matériaux de construction plus légers vu leurs masses volumiques.

La pouzzolane naturelle de Béni-Saf contient plus de 46,0 % de silice et environ 10 % de chaux, ce qui caractérise un bon état de cristallisation. Elle possède une aptitude à réagir avec la chaux pour former un bon liant qui donnera des bétons assez résistants. C'est l'effet de l'activité pouzzolanique, l'aptitude de fixation de l'hydroxyde de calcium par la pouzzolane [10,11].

Chapitre II

FORMULATION DU BETON DE POUZZOLANE

II.1. INTRODUCTION

Le béton est un mélange dont la nature de ses constituants et leurs teneurs respectives influent sur ses caractéristiques. La formulation d'une composition d'un béton type, exige l'obtention et le respect des propriétés souhaitées telles que la résistance mécanique, la durabilité, l'aspect architectural (formes, teintes, textures), l'isolation thermique et phonique.

Ces différentes caractéristiques passent dans un premier temps, par deux phases.

- a. Approche graphique telle que la méthode de Faury et celle de Dreux et Goriss.
- b. Approche expérimentale de façon à ajuster expérimentalement la composition en fonction des résultats obtenus dans le laboratoire.

II.2. FORMULATION DU BETON

II.2.1. Définition

La composition d'un béton consiste à réaliser le mélange optimal des diverses proportions des granulats (sable et gravillons), du dosage du ciment, ainsi que la quantité d'eau de gâchage nécessaire.

Pour la formulation de notre béton, nous avons choisi la méthode de Dreux et Goriss qui est pratique et simple.

II.2.2. Méthode de formulation de Dreux et Goriss

Elle consiste à rechercher conjointement la résistance à la compression et l'ouvrabilité désirée à partir des données de base essentielles pour la formulation du béton telles que la dimension des granulats (D_{max}). Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton. Il faut déterminer au préalable le rapport C/E, le mélange optimal à minimum de vide conduisant à la compacité maximale et les masses des granulats.

II.2.2.1. Détermination du dosage en ciment

On commencera par évaluer approximativement le rapport C/E en fonction de la résistance moyenne désirée σ_{cm28}

$$\frac{C}{E} = \frac{\sigma_{cm28}}{G \cdot \sigma_{c28}} + G \quad (II.1)$$

Le coefficient granulaire G est déterminé à partir du tableau II.1 suivant :

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins (D ≤ 16 mm)	Moyen (25 ≤ D ≤ 40 mm)	Gros (D ≥ 63 mm)
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

Tableau II.1 Valeur du coefficient granulaire (G) [2]

Le dosage en ciment est en fonction de C/E. L'abaque de la figure II.1 permet de déterminer le dosage du ciment en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée qui doit être considérée comme une donnée au problème.

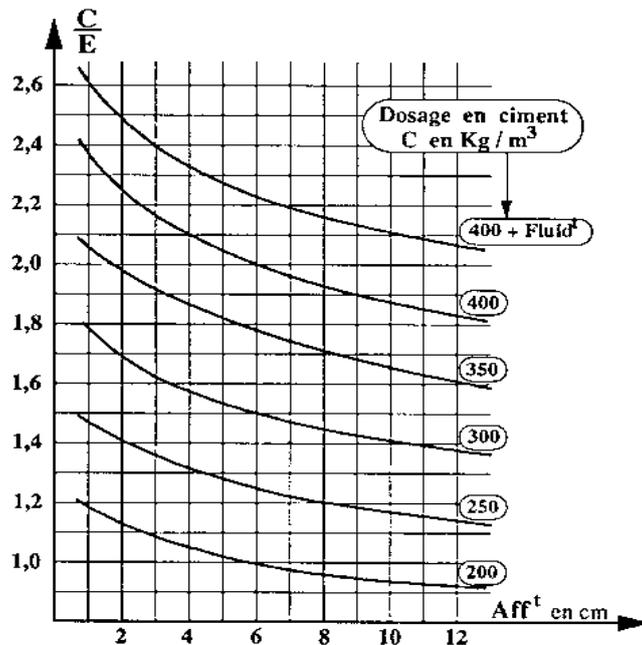


Figure II.1 : Abaque permettant d'évaluer le dosage en ciment en fonction du rapport C/E et de l'affaissement [2]

II.2.2.2. Détermination du dosage en eau

L'eau joue un rôle très important dans la composition du béton, c'est le facteur le plus difficile à déterminer et à mettre en exécution. Réellement, c'est par des essais sur des éprouvettes que l'eau de gâchage est définitivement dosée.

On estime que la moitié de l'eau sert à l'hydratation et la prise du ciment, le reste est une eau de mouillage interstitielle qui contribue à la plasticité du béton.

II.2.2.3. Tracé de la courbe granulaire

Sur un graphique d'analyse granulométrique figure II.2, on trace la courbe granulaire de référence OAB.

Le point B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D_{max} du plus gros granulat.

Le point de brisure A, à pour coordonnées :

En abscisse

Si $D_{max} \leq 25 \text{ mm}$; $X = D_{max}/2$.

Si $D_{max} > 25 \text{ mm}$; X est située au milieu du segment limité par le Module 38 (5mm) et le module correspond à D_{max} .

En ordonnée :
$$Y = 50 - \sqrt{D_{max}} + K \tag{II.2}$$

où K est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité de serrage, de la forme des granulats (roulés ou concassés) et également de module de finesse du sable.

La valeur de K est donnée sur le tableau II.2 :

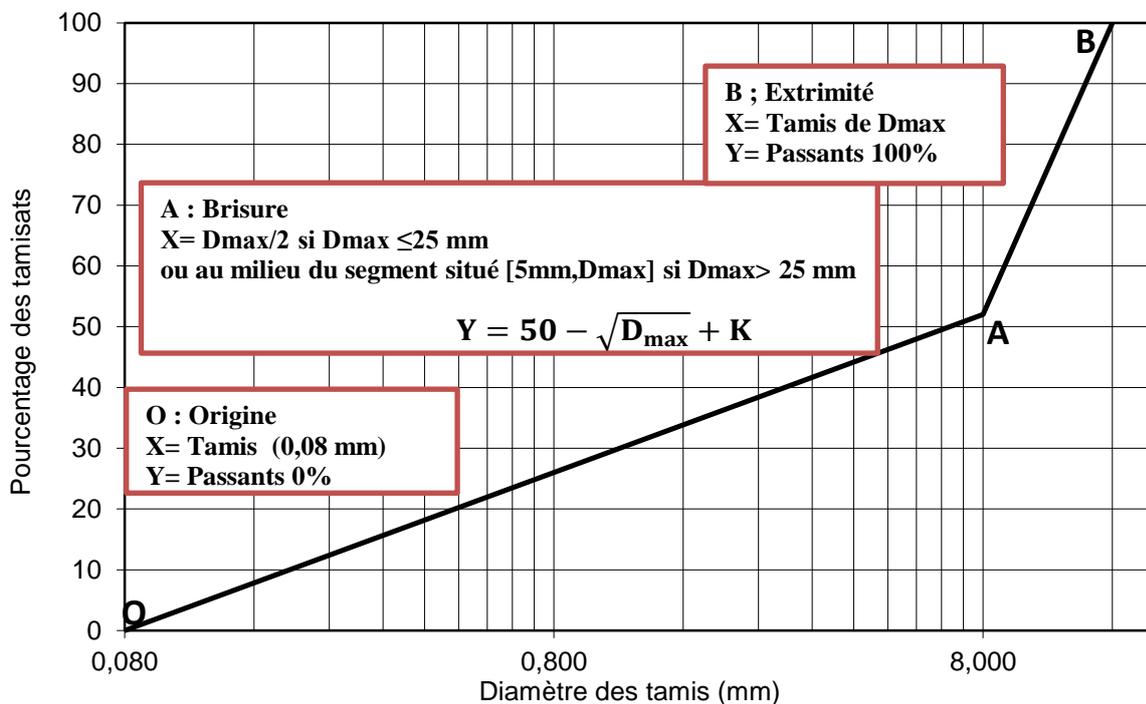


Figure II.2 : Courbe granulométrique de référence

Vibration		Faible		normale		Puissante	
Forme des granulats		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment	400+fluidif	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+2	+4	0	+2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

Tableau II.2 : Valeur du terme correcteur (K) [2]

Nota 1: Si le module de finesse du sable est fort (sable grossier), une correction supplémentaire sera effectuée de façon à relever le point A, ce qui correspond à augmenter le dosage en sable et vice versa. La correction supplémentaire (sur K) peut être effectuée en ajoutant la valeur $K_s = 6M_f - 15$.

Nota 2: Si la quantité du béton est précisée « pompable », il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité « courante ». On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur $K_p = +5$ à +10 environ, selon le degré de plasticité désiré.

II.2.2.4. Détermination du dosage des granulats

1. Coefficient de compacité (γ) :

Le coefficient de compacité γ : valeur tabulée en fonction de la consistance, le serrage et la dimension maximale des grains de granulat D et en fonction de terme correctif sur le type de granulats (concassés, roulés) et le dosage en ciment. On choisira une valeur approximative de γ dans le tableau II.3.

Consistance	Compactage (serrage)	Coefficient de compacité						
		D=5	D=10	D=16	D=25	D=40	D=63	D=100
Molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.819	0.815	0.820
	Vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.829	0.820	0.825
	Vibration normale	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
Plastique	Piquage	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
	Vibration faible	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.830	0.835
	Vibration normale	0.770	0.800	0.815	0.825	0.830	0.835	0.840
	Vibration puissante	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
Ferme	Vibration faible	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
	Vibration normale	0.780	0.810	0.825	0.835	0.840	0.845	0.850
	Vibration puissante	0.785	0.815	0.830	0.840	0.845	0.850	0.855

Tableau II.3 : Valeur du coefficient de compacité (γ) [2]

Note : Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d’apporter les corrections suivantes :

Sable roulé et gravier concassé = - **0.01** ;

Sable et gravier = - **0.03**.

Pour les granulats légers, on pourra diminuer de 0.03 les valeurs de γ qui correspondent ici à des granulats denses ordinaires.

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier, au point à 5% de la courbe du granulats suivant, et ainsi de suite.

On lira cependant sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage, le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats g_1, g_2, g_3 .

2. Volume absolu des constituants:

Si C est le dosage en ciment, le volume absolu des grains de ciment est :

- Volume absolu du ciment:

$$c = \frac{C}{3,1} \quad (l/m^3) \quad (II.3)$$

- Volume absolu des granulats: sable + gravier

$$V = 1000 \cdot \gamma - c \quad (l/m^3) \quad (II.4)$$

- Volume absolu du sable:

$$v_s = V \cdot \% \text{ sable} \quad (l/m^3) \quad (II.5)$$

- Volume absolu du gravier: 3/8

$$v_{g\ 3/8} = V \cdot \% \text{ gravier } 3/8 \quad (l/m^3) \quad (II.6)$$

- Volume absolu du gravier: 8/16

$$v_{g\ 8/16} = V \cdot \% \text{ gravier } 8/16 \quad (l/m^3) \quad (II.7)$$

- Dosage pondéral des granulats (pour 1 m3 de béton):

Si les masses spécifiques de chacun des granulats sont ρ_{ENG} , ρ_{PZ} , $\rho_{g3/8}$ et $\rho_{g8/16}$; les dosages pondéraux des granulats sont déterminés par les formules suivantes :

Dosage sable ENG :

$$S_{ENG} = v_{ENG} \cdot \rho_{ENG} \quad (Kg/m^3) \quad (II.8)$$

Dosage sable de pouzzolane :

$$S_{PZ} = v_{PZ} \cdot \rho_{PZ} \quad (Kg/m^3) \quad (II.9)$$

Dosage granulat PZ 3/8 :

$$G_{PZ\ 3/8} = v_{PZg3/8} \cdot \rho_{PZg3/8} \quad (Kg/m^3) \quad (II.10)$$

Dosage granulat PZ 8/16 :

$$G_{PZ\ 8/16} = v_{PZg8/16} \cdot \rho_{PZg8/16} \quad (Kg/m^3) \quad (II.11)$$

II.2.2.5. Détermination de la densité théorique du béton frais ρ_{fb}

La densité théorique du béton frais est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{fb} = \frac{C+E+S+G_{3/8}+G_{8/16}}{1000} \quad (II.12)$$

Le dosage pondéral en ciment (volume absolu du ciment) est fixé à l'avance selon le type de béton à réaliser. Nous avons opté pour trois dosages différents : 350, 300, et 250 kg/m³. Les figures II.3 à II.8, représentent la détermination des pourcentages en volume absolu de matériau pour les différents types de béton confectionnés.

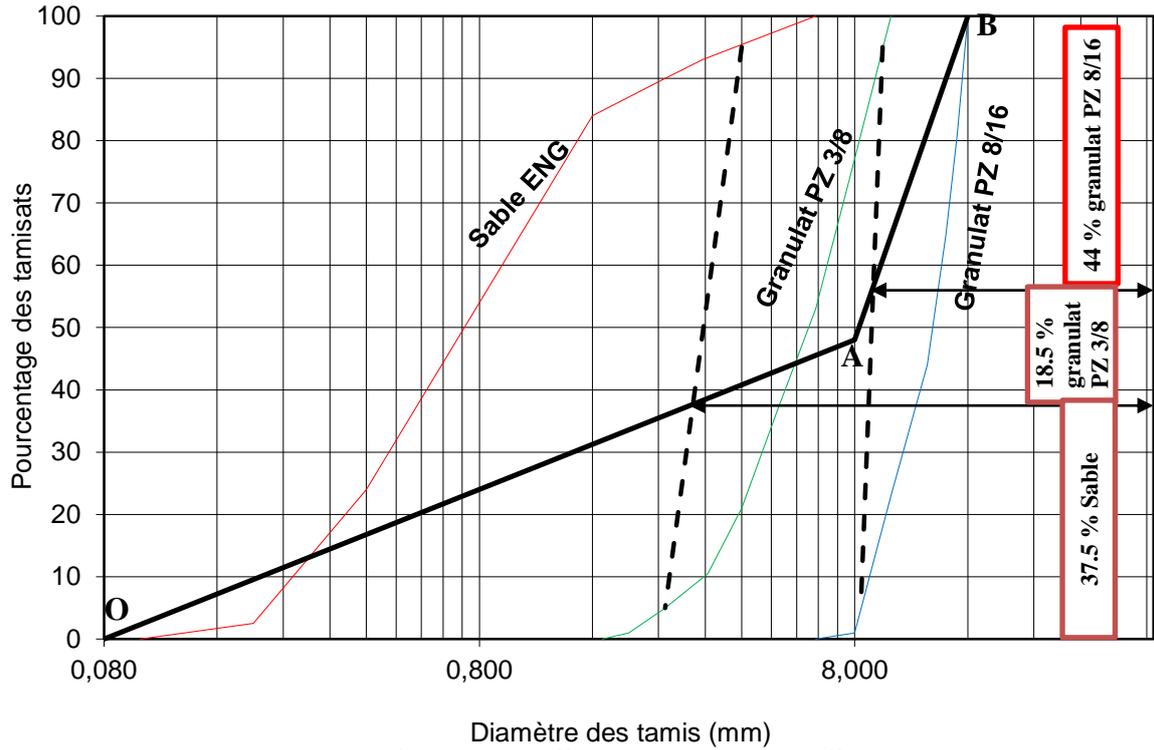


Figure II.3 : Détermination des pourcentages en volume absolu de matériau pour le béton type BGPZ1 pour un dosage en ciment de 350 kg/m^3

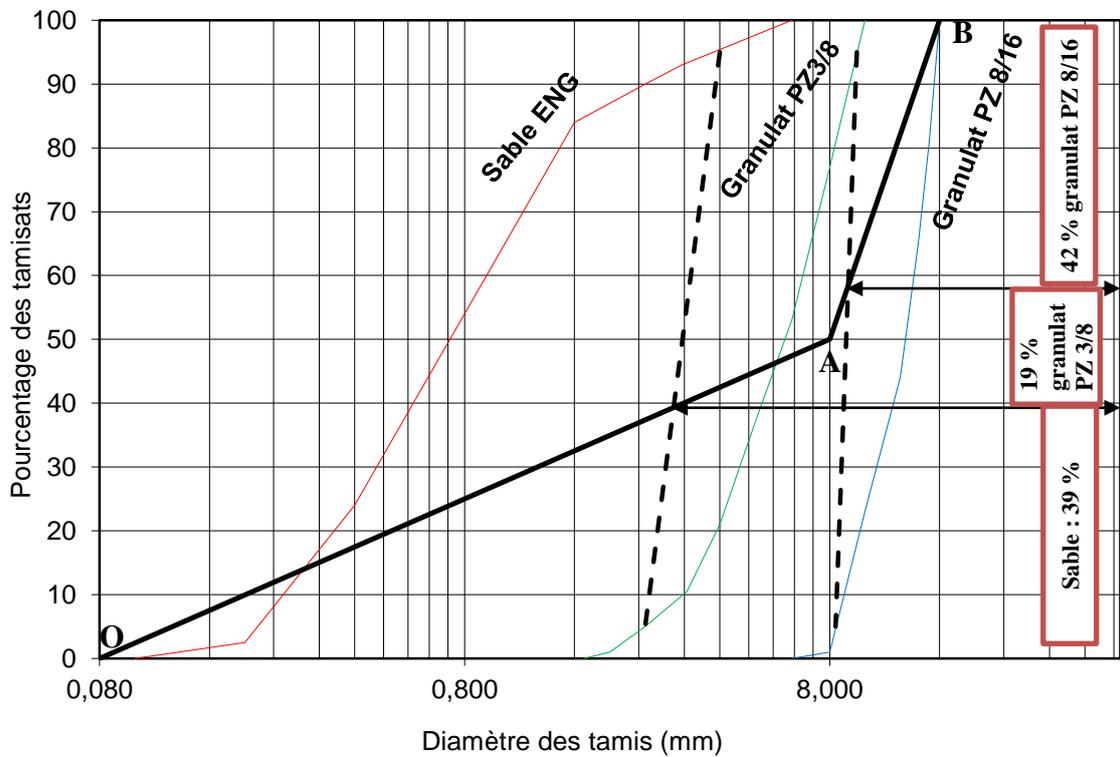


Figure II.4 : Détermination des pourcentages en volume absolu de matériau pour le béton type BGPZ2 pour un dosage en ciment de 300 kg/m^3

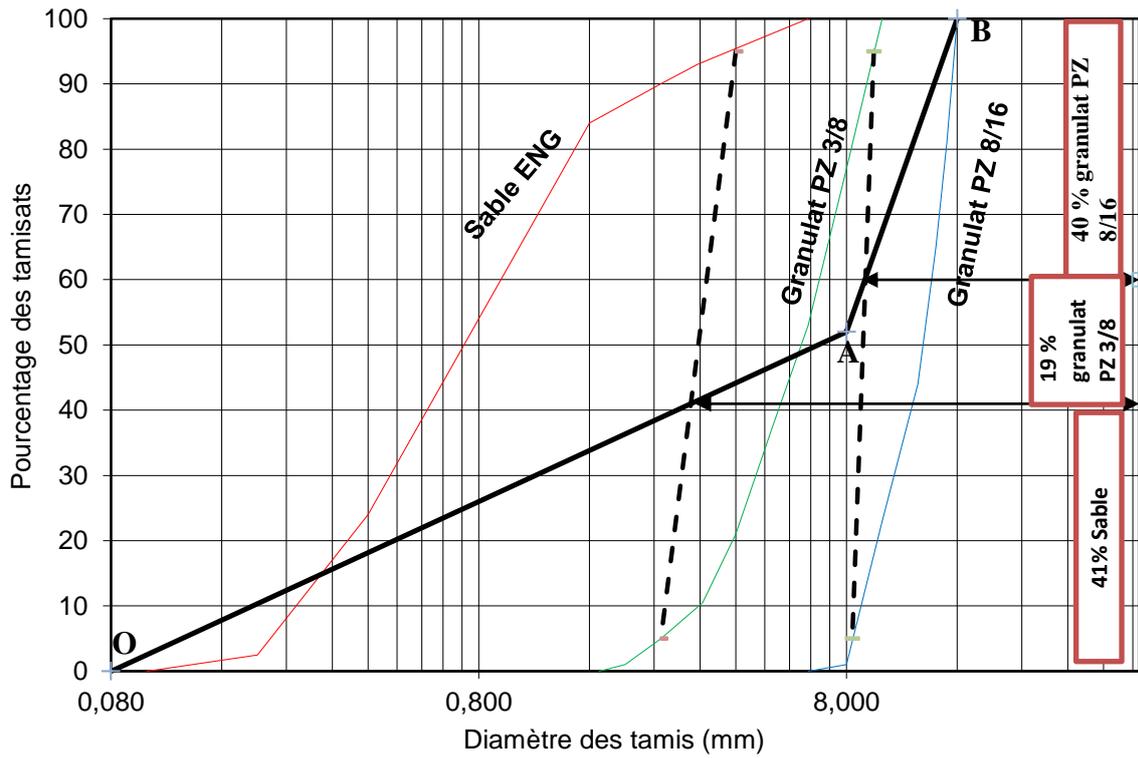


Figure II.5 : Détermination des pourcentages en volume absolu de matériau pour le béton type BGPZ3 pour un dosage en ciment de 250 kg/m^3

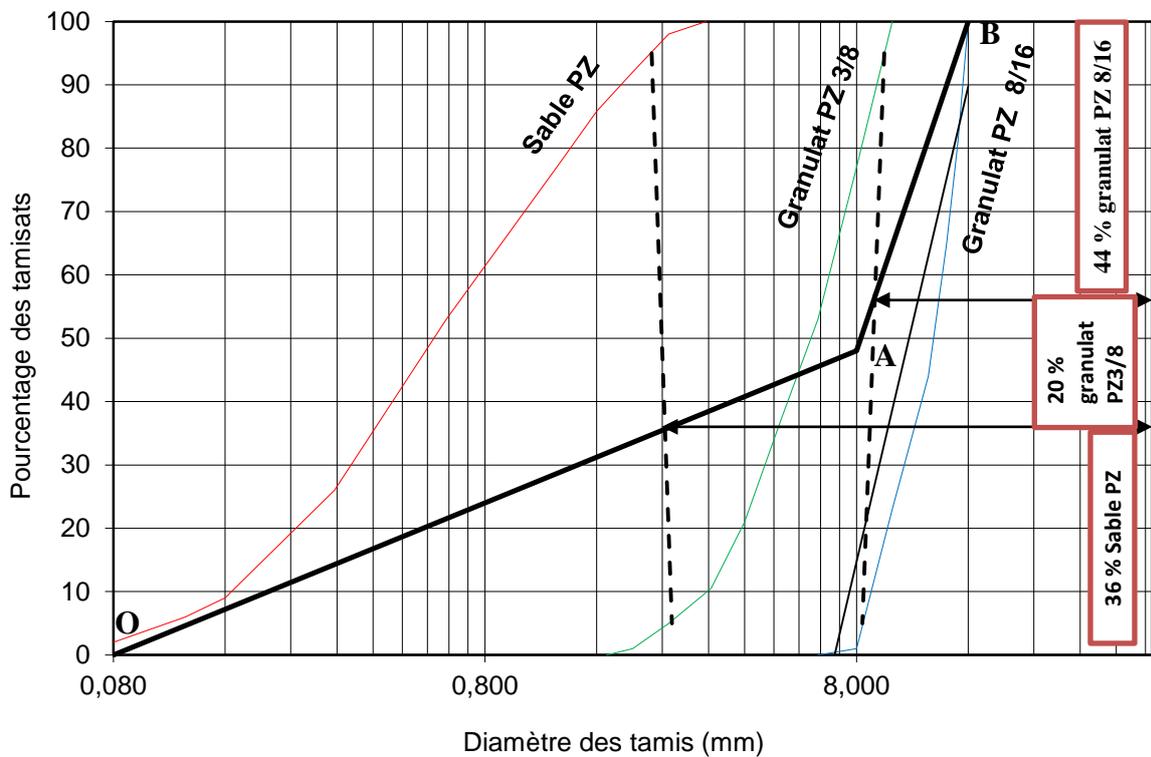


Figure II.6 : Détermination des pourcentages en volume absolu de matériau pour le béton type BPZ1 pour un dosage en ciment de 350 kg/m^3

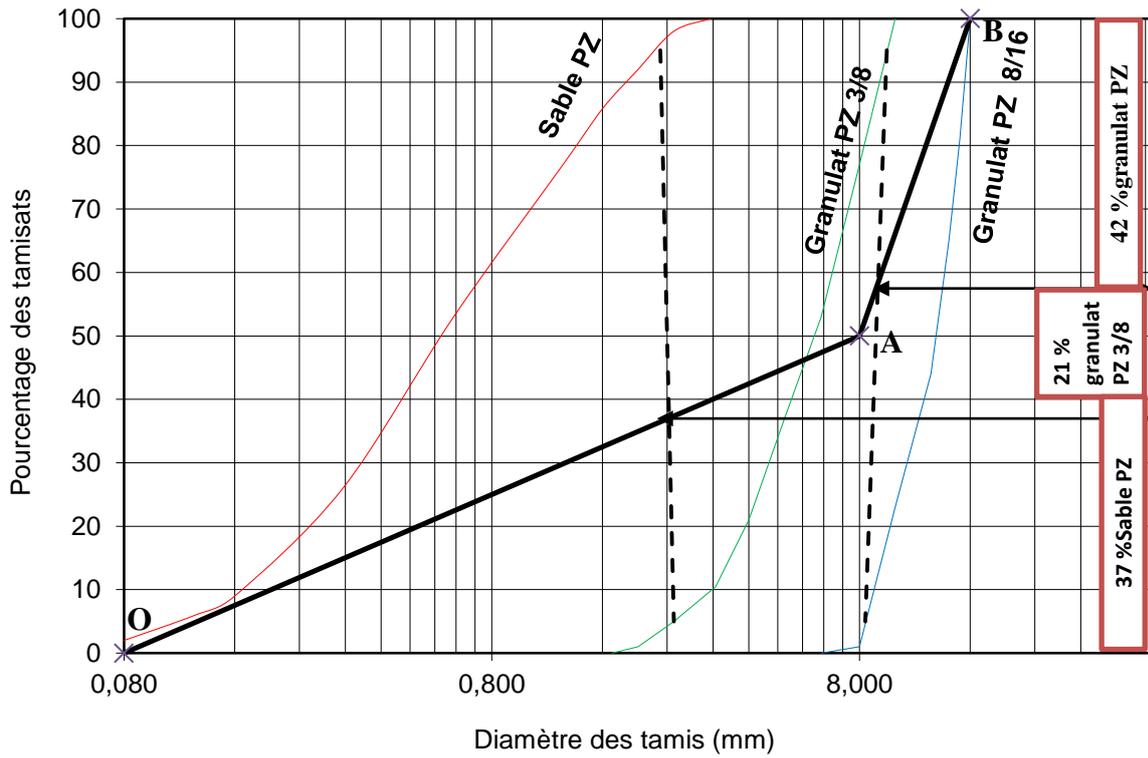


Figure II.7 : Détermination des pourcentages en volume absolu de matériau pour le béton type BPZ2 pour un dosage en ciment de 300 kg/m^3

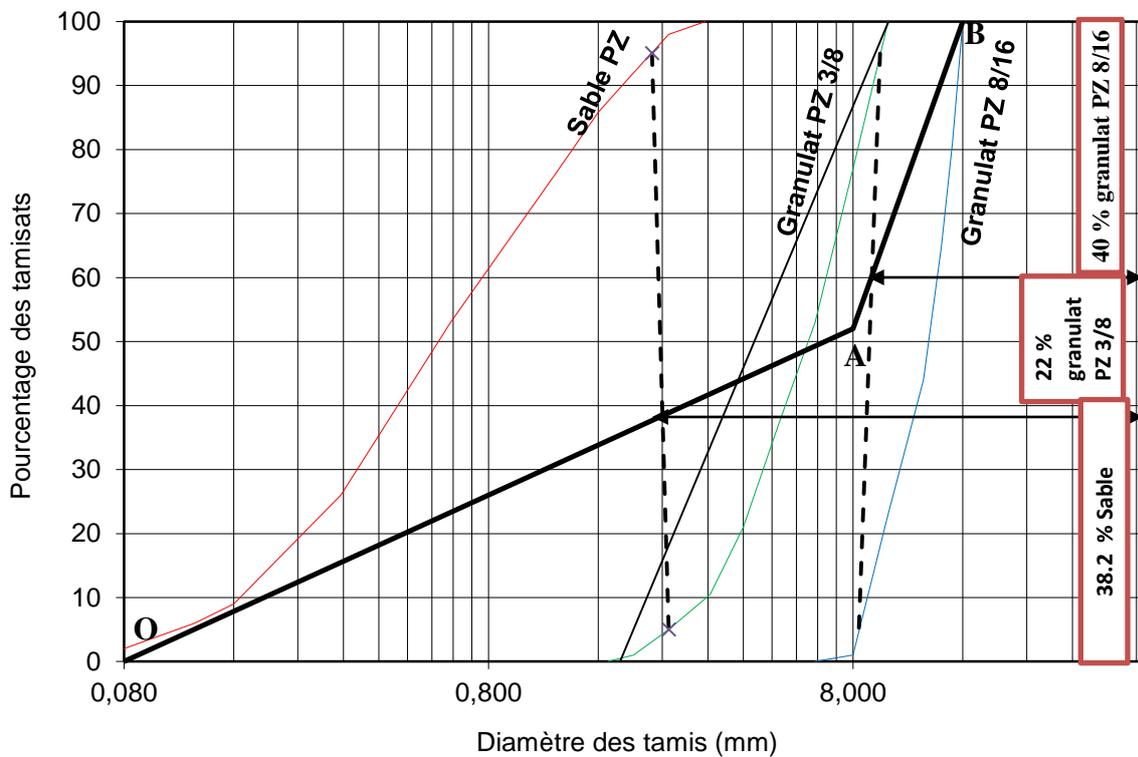


Figure II.8 : Détermination des pourcentages en volume absolu de matériau pour le béton type BPZ3 pour un dosage en ciment de 250 kg/m^3

Les proportions de chaque composant constituant le béton de pouzzolane ne peuvent être déterminés qu'à la limite d'essais d'étude à l'aide des gâchées de béton moyennant des éprouvettes afin de vérifier la consistance et la résistance.

Après plusieurs essais et corrections, nous avons déterminé les formulations suivantes, désignées sur le tableau II.4.

Désignation du béton	Dosage ciment C (kg/m ³)	Sable ENG S _{ENG} (kg/m ³)	Sable pouzzolane S _{PZ} (kg/m ³)	Granulat pouzzolane G 3/8 (kg/m ³)	Granulat pouzzolane G 8/16 (kg/m ³)	Eau E (l)	Le rapport E/C	Le rapport G/S
BGPZ1	350	665	-	235	559	212	0.60	1.19
BGPZ1/3		443	-	457	559	200	0.57	2.29
BGPZ2	300	708	-	247	546	200	0.67	1.12
BGPZ2/3		472	-	483	546	200	0.67	2.18
BGPZ3	250	762	-	253	532	160	0.64	1.03
BGPZ3/3		508	-	507	532	150	0.60	2.05
BPZ1	350	-	602	254	559	224	0.60	1.35
BPZ2	300	-	633	273	546	200	0.64	1.29
BPZ1	250	-	669	293	532	190	0.76	1.23

Tableau II.4 : Composition des bétons de pouzzolane

Pour ce qui concerne les compositions BGPZ1/3, BGPZ2/3 et BGPZ3/3, nous avons diminué de 1/3 le dosage pondéral du sable de l'ENG de carrière, déterminé à partir de la méthode de Dreux et Goriss et augmenté de 1/3 celui des granulats 3/8 de pouzzolane [12].

II.3. CONCLUSION

Théoriquement les différentes proportions des quatre principaux composants du béton de pouzzolane (gravillons, sable, ciment et eau), ont été déterminées par la méthode de formulation Dreux et Goriss et expérimentalement après plusieurs essais et corrections.

On espère que les résultats obtenus à travers les neuf compositions aboutissent à des bétons répondant aux normes spécifiques de bétons de pouzzolane (bétons légers).

Chapitre III

CARACTERISATION MECANIQUE DU BETON DE
POZZOLANE

III.1. INTRODUCTION

L'action simultanée du poids et de la réaction du sol provoque dans le matériau une résistance à la compression.

Le granulat de la pouzzolane naturelle appartient au milieu des granulats légers et poreux, donc moins résistant qu'un granulat usuel. Le comportement mécanique et le mode de rupture des matériaux contenant de la pouzzolane sont donc modifiés par rapport à ceux d'un matériau contenant des granulats rigides.

Le choix du diamètre du granulat et la proportion entre les différentes granulométries est important pour l'obtention d'un matériau de construction le plus compact possible surtout pour la formulation d'un béton.

Pour un béton à granulat rigide ou poreux, on cherche toujours à améliorer la résistance mécanique à la compression, qui est une qualité essentielle à rechercher [13].

L'utilisation de la pouzzolane de Béni-Saf comme constituant essentiel de nos différentes formulations de béton nous conduit à vérifier l'impact et la fiabilité de ces matériaux dans le domaine du bâtiment. Il est nécessaire de connaître le comportement et les réponses du béton de pouzzolane vis-à-vis des sollicitations mécaniques pouvant être appliquées.

III.2. CONFECTION DES EPROUVETTES

Un malaxage à sec des différents constituants du béton est effectué durant 3 minutes à l'aide d'une bétonnière.

Les matériaux sont introduits dans la bétonnière en respectant l'ordre suivant : Granulat 8/16, granulat 3/8, le sable et le ciment.

Le volume d'eau introduit est déterminé par tâtonnements au cours du malaxage de façon à avoir un mélange homogène et ne pas perdre une quantité importante de laitance lors du coulage et la vibration de l'ensemble moule matériaux.

La mise en place du mélange obtenu dans des moules se fait en deux ou trois couches avec un piquage intermédiaire et une vibration de l'ensemble sur la table vibrante.

III.3. RESISTANCES MECANIQUES

Les mesures de résistances mécaniques, en compression ont été effectuées au niveau du laboratoire de structure au département de génie civil de l'université de Tlemcen sur des éprouvettes normalisées à l'aide de la machine d'essai à la compression figure III.1

Dans un programme expérimental, les essais à la compression pour chaque formule de béton, nécessite l'écrasement de trois éprouvettes pour déduire la moyenne de la contrainte à la compression des trois résultats.



Figure III.1 : Machine d'essai à la compression

Notre objectif dans cette partie était aussi la réalisation de quelques essais à la traction, mais la quantité nécessaire de la pouzzolane à notre disposition ne permet pas la confection d'autres éprouvettes normalisées pour cet essai. La résistance à la traction a été calculée par la formule du BAEL $\sigma_{Tj} = 0.6 + 0.06\sigma_{Cj}$

III.3.1. Résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression sont effectués sur des éprouvettes cylindriques suivant la norme NFP 18-406 ($16 \times 32 \text{cm}^3$) figure III.2. Un démoulage a eu lieu après 24 heures, la conservation s'est faite sous l'environnement du laboratoire (air ambiant $T=20 \pm 2^\circ$ et $HR=45 \pm 10\%$), à des échéances de 7j, 14j, 28j et 90j avant les essais de résistances.

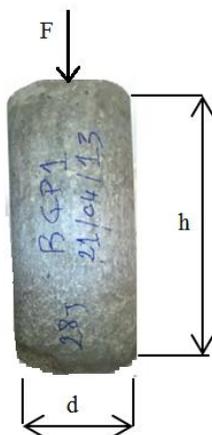


Figure III.2 : Eprouvette cylindrique

III.4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les figures III.3, III.4 et III.5 montrent l'évolution de la résistance à la compression à différents âges de durcissement des bétons de pouzzolane pour les trois dosages choisis (350, 300 et 250 kg/m³). On remarque une augmentation de la résistance à la compression pour toutes les compositions des bétons. Pour un dosage de 350 kg/m³, les bétons de pouzzolane BGPZ1, BGPZ1/3 et BPZ1 montrent des résistances plus élevées pour tous les âges par rapport aux autres compositions avec les dosages de 300 et 250 kg/m³.

Dans la figure III.5, on constate que les compositions BGPZ3/3 et BPZ3 possèdent la même résistance à 28j, par contre à 90j, le béton BPZ3 a une résistance légèrement supérieure. L'effet de la pouzzolanité joue un rôle important dans l'augmentation de la résistance.

L'activité pouzzolanique se caractérise par deux aspects distincts :

- * La quantité totale d'hydroxyde de calcium qu'une pouzzolane est capable de fixer.
- * La rapidité de fixation de l'hydroxyde de calcium par la pouzzolane [14,15].

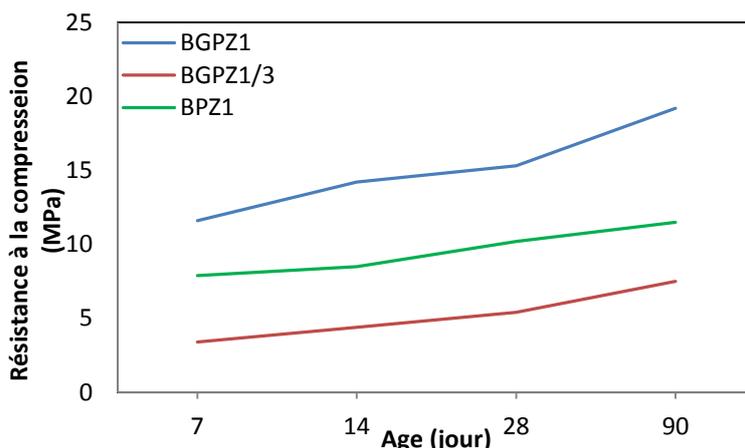


Figure III.3: Résistance à la compression du béton de pouzzolane pour un dosage en ciment de 350 kg/m³

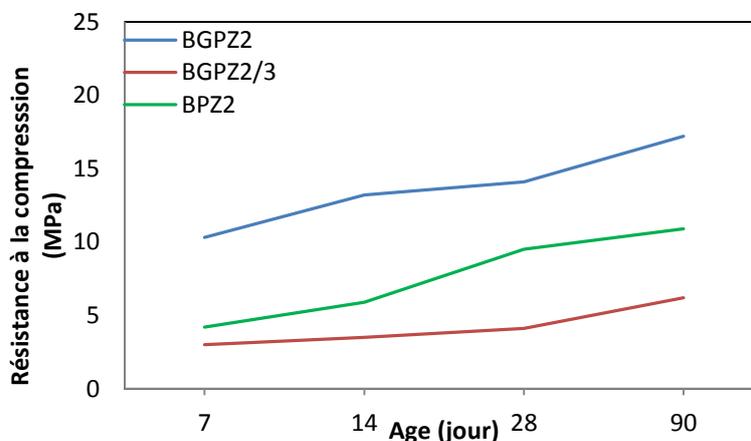


Figure III.4 : Résistance à la compression du béton de pouzzolane pour un dosage en ciment de 300 kg/m³

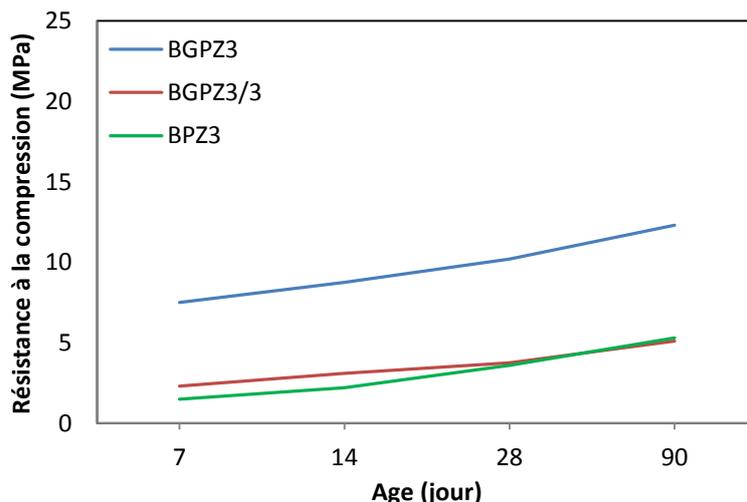


Figure III.5 : Résistance à la compression du béton de pouzzolane pour un dosage en ciment de 250 kg/m³

La figure III.6 montre l'effet de l'utilisation du sable de carrière de Sidi Abdelli S_{ENG} . On constate que les compositions BGPZ1/3, BGPZ2/3 et BGPZ3/3 présentent les plus faibles résistances à la compression. Ceci est en relation avec la diminution du volume du sable de carrière de 1/3 et l'augmentation de 1/3 en volume du granulat 3/8. Aussi, nous remarquons que les bétons BPZ1, BPZ2 et BPZ3 qui sont composés seulement du sable de pouzzolane et des deux classes granulaires 3/8 et 8/16 donnent des résistances assez faibles par rapport aux compositions BGPZ1, BGPZ2 et BGPZ3. Le remplacement d'éléments plus résistants (sable de carrière) par des éléments moins résistants (sable de pouzzolane et granulats légers) affecte négativement les performances mécaniques du béton [16].

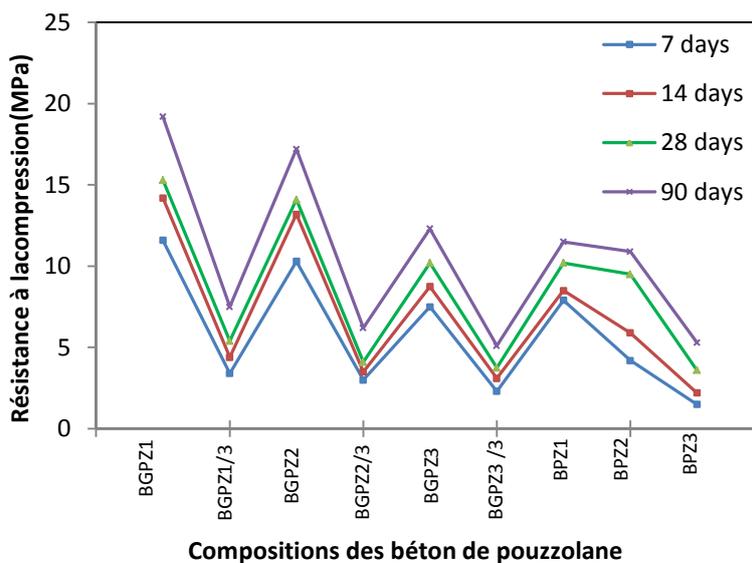


Figure III.6 : Effet du sable de carrier de Sidi El Abdelli S_{ENG} sur la résistance à la compression

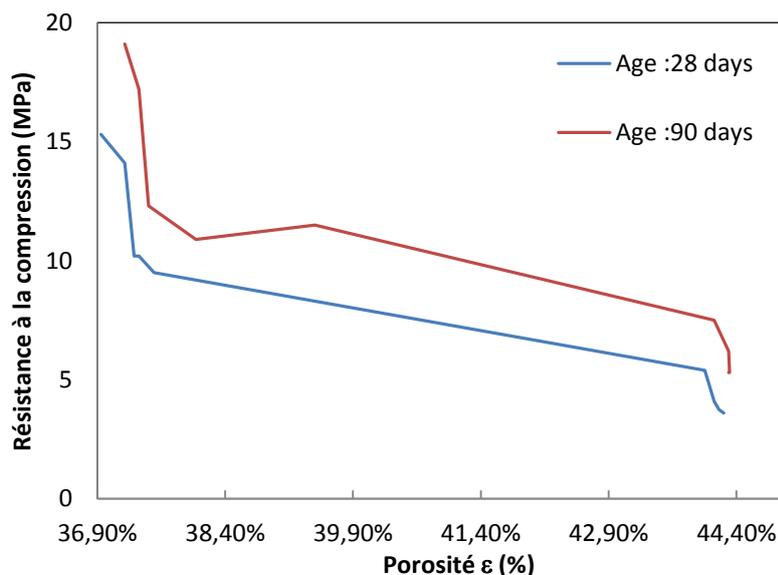


Figure III.7 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de la porosité ε pour les différents bétons de pouzzolane (28 jours et 90 jours)

Dans la figure III.7, on présente l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la porosité ε pour différents bétons à 28 et 90 jours. La porosité ε est déterminée par la relation suivante [17].

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho}{\rho_{ag}} \quad (\text{III.1})$$

ρ : Masse volumique apparente du béton

ρ_{ag} : Masse volumique absolue du grain

La figure III.7 présente l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la porosité ε pour les différentes compositions du béton au 28^{ème} et 90^{ème} jour de mûrissement. On observe que la résistance à la compression diminue quand la porosité augmente. La plus grande valeur de la résistance réalisée pour différents âges correspond à un rapport G/S de 1,19 constaté dans la figure 12. L'effet des granulats de pouzzolane sur la résistance est causé par sa structure interne constituée de pores, la cellule et la taille des pores sont d'autres facteurs qui influent sur la résistance à la compression [18].

La figure III.8, montre l'effet du rapport G/S sur la résistance à la compression à différents âge de mûrissement. La résistance est maximale pour une valeur du rapport G/S optimum qui est égale à 1.19. Ce résultat, correspond à la formulation BPGZ1 pour un dosage de 350 kg/m³. Par ailleurs, conformément à ce qui est généralement observé avec les bétons classiques, nous pouvons voir que l'augmentation du rapport G/S entraîne une diminution de la résistance de compression.

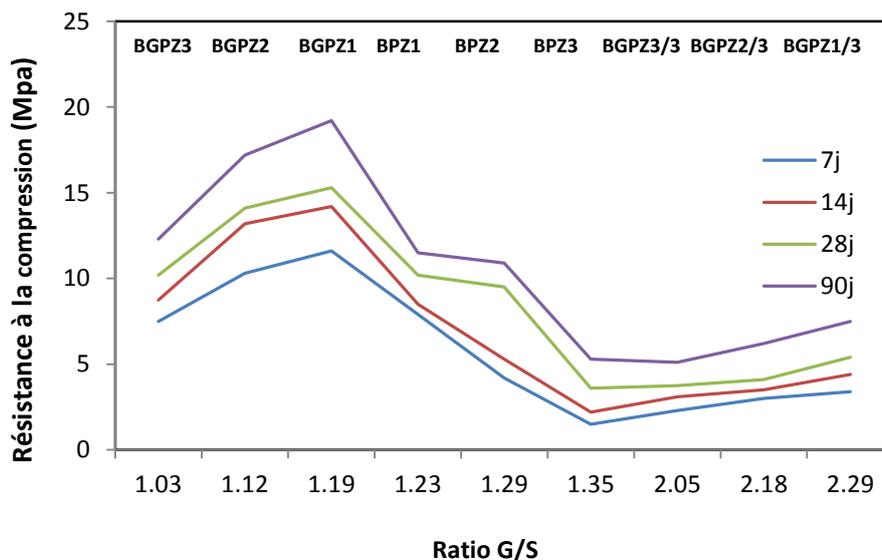


Figure III.8 : Effet du rapport G/S sur la résistance à la compression des bétons de pouzzolane pour les âges 7j, 14j, 28j, et 90j.

La figure III.8 montre l'effet du rapport G/S sur la résistance à la compression à différents âges. La résistance est maximale pour une valeur du rapport G/S optimum qui est égale à 1.19.

Enfin, nous remarquons, que toutes les compositions de béton de pouzzolane présentent une fissuration plutôt verticale lors du test de compression lorsque le seuil critique de contrainte est atteint; Ceci est principalement dû aux agrégats qui ont une faible adhérence [19].

Les figures III.9, III.10 et III.11, montrent l'évolution de la résistance à la traction du béton de pouzzolane pour différents dosages en ciment. Les mêmes observations sont déduites que dans le cas de l'évolution de la contrainte à la compression.

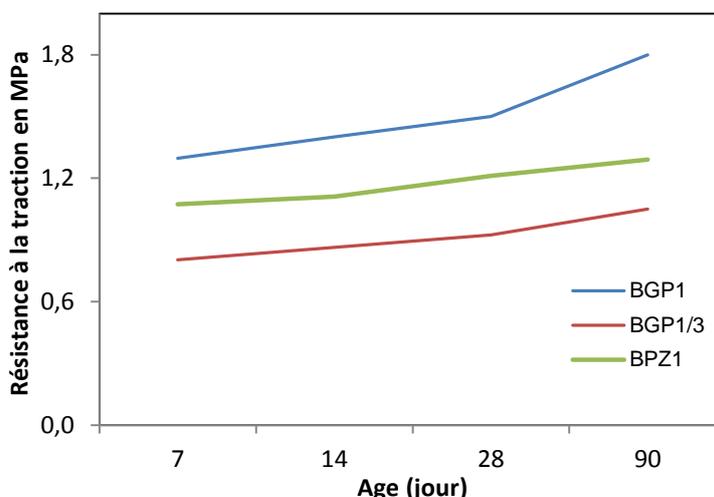


Figure III.9 : Résistance à la traction du béton de pouzzolane pour un dosage en ciment de 350 kg/m³

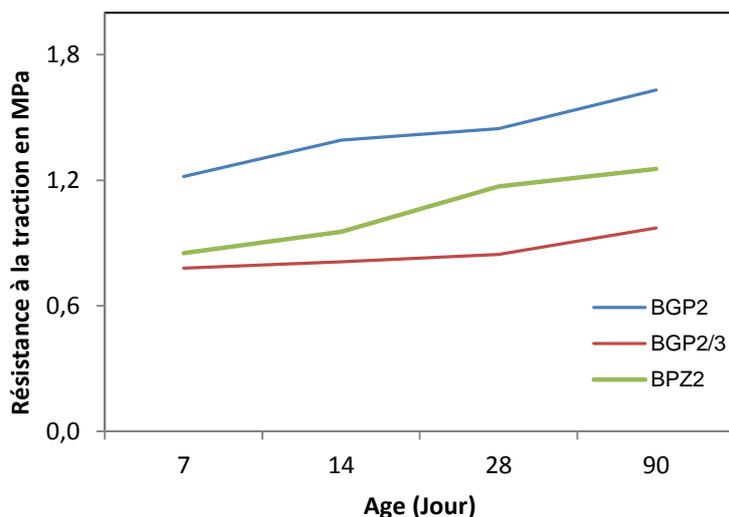


Figure III.10 : Résistance à la traction du béton de pouzzolane pour un dosage en ciment de 300 kg/m³

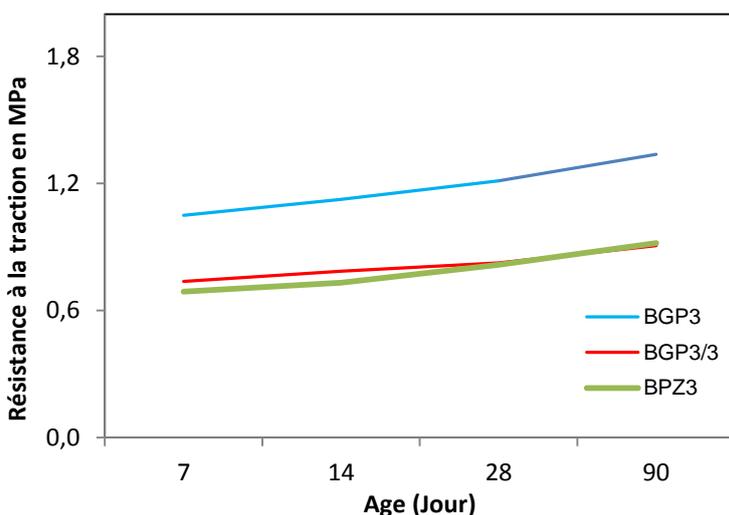


Figure III.11 : Résistance à la traction du béton de pouzzolane pour un dosage en ciment de 250 kg/m³

La figure III.12 montre l'évolution de la masse volumique du béton en fonction de l'âge de durcissement. La masse volumique a tendance à diminuer en fonction de l'âge, et d'une façon continue pour les bétons formulés. En général, cette chute de masse volumique est causée par l'évaporation de l'eau de gâchage.

Nous constatons sur la figure III.12 que les bétons à faible dosage en ciment comme les types BPZ3, BGPZ3 et BGPZ3/3 présentent les plus faibles masses volumiques par rapport aux autres compositions.

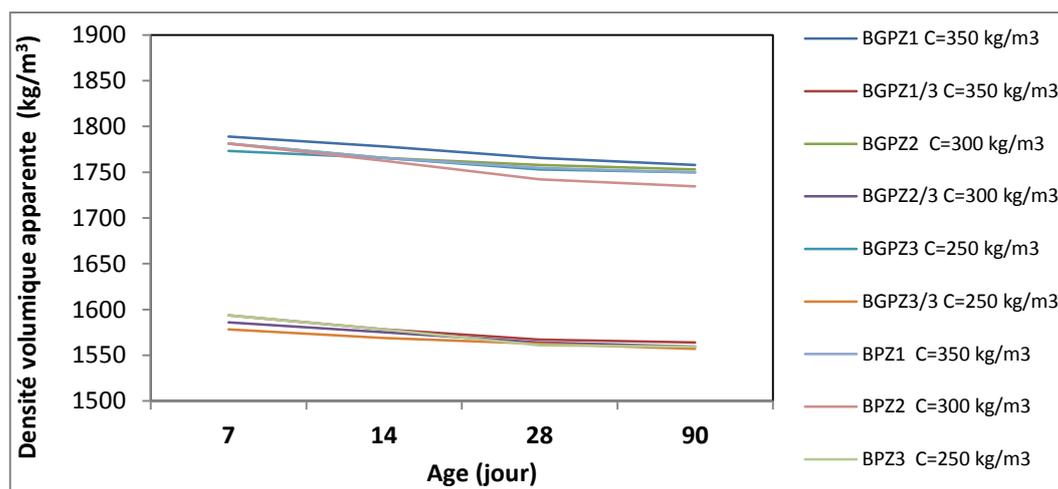


Figure .III.12 : Masse volumique apparente du béton de pouzzolane en fonction de l'âge

III.5. CONCLUSION

A l'issue d'essais expérimentaux, l'objectif majeur dans cette étude est l'éventuelle substitution des matériaux granulaires usuels utilisés dans la confection du béton par un matériau à base de granulats légers de la pouzzolane naturelle. L'accent a été mis sur l'influence du dosage en granulats, les différents dosages en ciment de type CPJ CEM II / A 42,5 et le mode de conservation qui est dans notre cas l'air ambiant. Une réduction relativement modeste en poids peut assurer une économie considérable en coût et en main d'œuvre.

Une des qualités recherchée est la légèreté des bétons confectionnés et en deuxième lieu, une résistance à la compression assez acceptable.

Nous tirons les remarques suivantes :

Pour les différents dosages en ciment choisis, les masses volumiques apparentes des bétons formulés sont inférieures à 1800 kg/m^3 , dans l'ensemble, notre matériau répond à la définition de béton léger.

On constate sur la figure III.12 que le dosage en ciment de 250 kg/m^3 présente un impact très important sur la masse volumique apparente. Les bétons BPZ3, BGPZ3 et BGPZ3/3, ont des masses volumiques inférieures à 1600 kg/m^3 . Ce résultat est peut-être dû au mélange des différents matériaux (ciment+sable+granulats), l'ensemble forme une matrice solide présentant des vides intra granulaires plus important que les autres formulations.

La résistance à la compression augmente pour toutes les compositions des bétons à différents âges, et croit aussi en fonction du dosage en ciment.

Les bétons qui sont composés seulement du sable de pouzzolane donnent des résistances assez faibles par rapport aux compositions avec sable de carrière.

La résistance à la compression diminue quand la porosité augmente. La composition BGPZ1 a donné les plus grandes valeurs de la résistance à la compression qui correspondent à un rapport G/S optimum égal à 1.19. Ce résultat peut être traduit par l'influence du dosage en ciment qui est de 350 kg/m^3 , une faible porosité apparente et l'utilisation de sable de carrière.

Finalement, les résultats de la caractérisation mécanique obtenus montrent que notre composition de ce matériaux à base de pouzzolane léger est conforme avec la norme en vigueur [20].

Chapitre IV

**TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONDUCTION ET
OUTILS MATHÉMATIQUES DE CHANGEMENT
D'ÉCHELLE DANS UN MILIEU POREUX**

IV.1. INTRODUCTION

En général, le transfert de chaleur peut être défini comme la transmission de l'énergie d'une région à une autre sous l'influence d'un gradient de température. Le deuxième principe de la thermodynamique et les observations expérimentales nous indiquent que le transfert de la chaleur dans un système n'est pas permis d'une région à basse température vers une région à haute température.

Le transfert de chaleur peut se réaliser sous trois modes de transmission de chaleur : la conduction sous l'effet d'un gradient de température, la convection et le rayonnement.

La conduction est un mode de transfert de chaleur par contact et à l'intérieur d'un milieu solide sans déplacement de la matière. La chaleur se propage par contact direct grâce à des porteurs élémentaires d'énergie comme les molécules et les électrons. Le problème fondamental de la conduction est la détermination de la répartition de la température et de la conductivité qui est une caractéristique du matériau.

La convection est un phénomène qui est dû au déplacement global du milieu considéré. Elle a lieu entre une paroi solide immobile et un fluide qui lui est adjacent. On distingue deux types de convection, la convection libre induite par le propre échauffement du fluide dû à la différence de température qui provoque un mouvement de fluide. La convection forcée est le résultat d'un agent extérieur au système qui impose un mouvement bien défini pour le fluide causé par un mécanisme de pompage.

Le phénomène du rayonnement est possible lorsqu'un corps chaud et un corps froid sont séparés par le vide absolu. Dans cette situation, le corps chaud disperse dans l'espace, de l'énergie sous forme de rayonnement qui sera intercepté par le corps froid jouant le rôle d'un corps récepteur.

Dans ce chapitre, nous donnerons les définitions générales sur les caractéristiques thermophysiques et nous présenterons un bilan thermique sur le mode de transfert de chaleur par conduction dans un milieu poreux. Le premier obstacle rencontré après l'établissement des équations de chaleur locales au niveau microscopique est le manque de données fiables sur les variables d'état locales et la géométrie de l'espace microstructurale. Une des possibilités offertes pour l'étude du phénomène de la conduction locale est de procéder à une extrapolation du comportement thermique par une description de tout le système du milieu à l'aide de modèles macroscopiques.

Ces modèles de prédictions développés afin d'appréhender les mécanismes de transfert thermique dans les milieux granulaires sont obtenus en appliquant aux différentes équations de la

conduction à l'échelle microscopique, une méthode de changement d'échelle appelée technique de prise de moyenne volumique.

IV.2. LES CARACTÉRISTIQUES THERMO-PHYSIQUES

Cette faculté acquise par la chaleur de se propager dans un corps est due aux caractéristiques thermo physiques des matériaux utilisés, comme la conductivité thermique, la diffusivité thermique, l'effusivité thermique et la chaleur massique.

IV.2.1. La Diffusivité thermique

L'équation fondamentale de la conduction thermique est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique.

Dans un milieu homogène et isotrope, la conductivité thermique λ est une constante, l'équation de Fourier s'écrit

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \Delta T$$

Avec
$$\Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 z}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \Delta T$$

Cette relation fait apparaître le rapport $a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$ en (m²/s) qui représente la diffusivité thermique du milieu

La diffusivité thermique, est proportionnelle à la conductivité thermique, et inversement proportionnelle à la chaleur volumique (ρC_p). Elle caractérise l'inertie thermique des matériaux.

IV.2.2. L'effusivité thermique

L'effusivité thermique mesure la propriété qu'a un corps d'arracher de la chaleur à un autre corps avec lequel il est mis en contact. Physiquement, elle représente la capacité d'un milieu à résister (en température) à une perturbation thermique. Elle se calcule à partir de l'expression suivante $E = \sqrt{\lambda \rho C_p}$:

IV.2.3. La chaleur massique

L'équation calorimétrique classique $Q = m C_m (T_2 - T_1)$ montre que la quantité de chaleur absorbée par un corps de masse m , quand sa température augmente de T_1 à T_2 est proportionnelle à la chaleur massique C_m du solide considéré. Pratiquement, la chaleur massique C d'un corps correspond à la quantité de chaleur dont il a besoin pour que la température d'une unité de sa masse s'élève d'un degré. Ceci met en évidence l'importance de la chaleur massique pour tous les calculs de stockage de chaleur ou de transport de chaleur.

IV.2.4. La conductivité thermique

La loi de Fourier donne la quantité de chaleur dQ_{cd} pour un élément de volume dont sa surface dS est traversée par un flux de chaleur de conduction pendant le temps dt

$$dQ_{cd} = -\lambda \frac{dT}{dx} dS dt \quad (IV.1)$$

λ : Conductivité thermique du matériau en w/mK

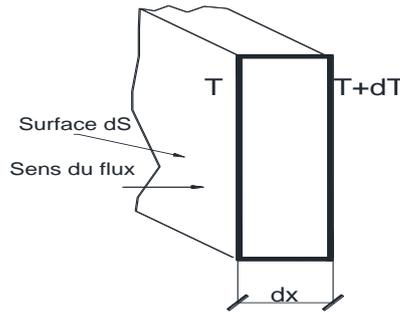


Figure. IV.1 Élément de volume

Le flux de chaleur élémentaire $d\Phi_{cd}$ est la quantité de chaleur par unité de temps

$$d\Phi_{cd} = \frac{dQ_{cd}}{dt} = -\lambda \frac{dT}{dx} dS \quad (IV.2)$$

Le flux de chaleur par conduction totale Φ_{cd} transmis dans un matériau dans le cas d'un écoulement unidimensionnel est égal au produit des trois quantités suivantes

$$\Phi_{cd} = -\lambda \frac{dT}{dx} \cdot S \quad (VI.3)$$

S : l'aire de la section à travers laquelle s'écoule la chaleur

$\frac{dT}{dx}$: Le rapport de la variation de la température T à la distance parcourue par le flux thermique.

Pour un mur homogène et isotrope d'épaisseur e , figure (IV.2) et de température T_c et T_f , respectivement température chaude et froide, le flux de chaleur en régime permanent sera sous la forme suivante :

$$\Phi_{cd} = \lambda \cdot S \frac{(T_c - T_f)}{e} \quad (VI.4)$$

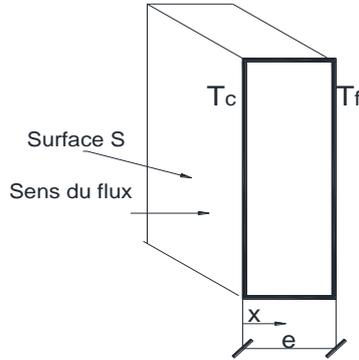


Figure. IV.2 Mur simple

On constate que le flux de chaleur est proportionnel à la conductivité thermique du mur. La conductivité thermique λ est une valeur caractéristique et intrinsèque du matériau.

IV.3. LE TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONDUCTION DANS UN MILIEU POREUX

IV.3.1. La conductivité thermique apparente

La conductivité thermique λ appelée aussi conductivité thermique vraie est déterminée directement de la loi de Fourier et elle est valable que dans le cas des matériaux homogènes et isotropes. Or, dans le cas d'un corps poreux soumis aux mêmes conditions, la conductivité thermique apparente dépend du taux de porosité, la taille et la forme des pores. Ces derniers, sont généralement occupés par une phase fluide immobile qui avec la phase solide Figure (IV.3) influe sur la valeur finale de la conductivité thermique notée λ_{app} .

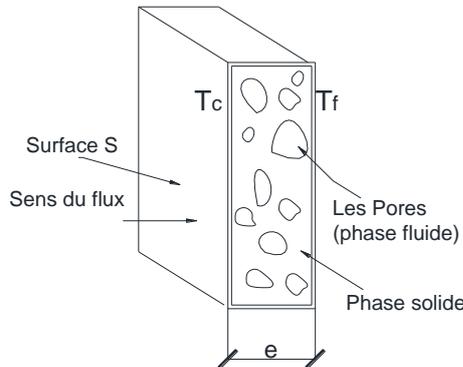


Figure. IV.3 Matériaux poreux

Le milieu est anisotrope, la conductivité thermique apparente doit prendre en compte certains paramètres tels que la conductivité thermique de chaque phase, la structure de la matière solide, et les zones de contacts entre particules [21].

En utilisant la même formulation que pour le milieu homogène, la loi de Fourier sera sous la forme :

$$\Phi_{cd} = \lambda_{app} \cdot S \frac{(T_c - T_f)}{e} \quad (IV.5)$$

Où λ_{app} dépend des conductivités thermiques des phases solide λ_s et fluide λ_f constituant le matériau.

Pour les matériaux de construction en bâtiment, la conductivité thermique apparente prend sa valeur de l'effet direct ou indirect de la masse volumique, des pourcentages des différents granulats ainsi que les dosages en ciment [12].

La transmission de la chaleur par conduction pure s'effectue dans les gaz (l'air) inclus dans les pores et dans la structure solide.

Le transfert par convection est négligeable pour les deux hypothèses suivantes
L'air est immobile à l'intérieur des pores.

Les dimensions des pores sont faibles [22].

La fraction du transfert radiatif, transmise est pratiquement nulle puisque les températures des parois sont en général voisines de la température ambiante. [23,24].

IV.3.2. Prise de moyenne volumique

L'utilisation directe de la loi de Fourier tel que présentée par la formule (IV.5), n'a aucun intérêt pour le calcul de la conductivité thermique apparente λ_{app} d'un échantillon de matériau poreux. Si on suppose que les matériaux de construction peuvent être assimilés à un milieu granulaire, donc poreux. L'utilisation des modèles macroscopiques permettent la prédiction de la conductivité thermique apparente λ_{app} de matériaux granulaires diphasiques en fonction des conductivités thermiques λ_s et λ_f et de leur porosité ε .

La résolution de l'équation de chaleur et l'utilisation de la technique de prise de moyenne volumique et ces théorèmes permettra l'établissement des équations moyennes de la conduction à l'échelle macroscopique [25]. A partir de ces équations moyennes, on déduit les modèles analytiques de prédiction de la conductivité apparente.

La méthode de prise de moyenne volumique qui consiste à définir les variables à grande échelle comme les moyennes des variables locales sur un volume élémentaire représentatif

(VER), [26-27-28]. Le passage d'un milieu hétérogène vers un milieu dit homogène, consiste à définir un volume élémentaire représentatif (VER) figure (IV.4), où on considère deux échelles pour la description des phénomènes au niveau microscopique et macroscopique.

Une échelle microscopique qui est associée au diamètre moyen des pores d_p , et une échelle macroscopique qui caractérise le milieu poreux, associée à une dimension géométrique du milieu, L , de telle sorte qu'on aura l'inégalité suivante : $d_p < \ell < L$, ℓ désigne la dimension caractéristique du V.E.R.

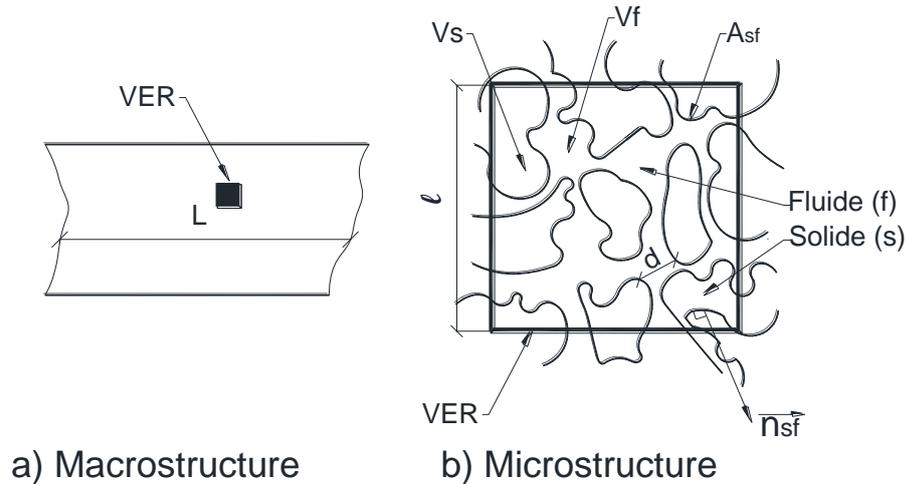


Figure. IV.4 Volume élémentaire représentatif (VER)]

La prise de moyenne volumique est utilisée pour l'obtention d'une moyenne volumique sur différentes variables qui régissent le phénomène de transfert de chaleur et de masses, telles que la température, la pression ainsi que le flux thermique. Ces grandeurs moyennées sont directement utilisées dans les équations à l'échelle macroscopique.

Pour toute grandeur microscopique notée Ψ , la moyenne volumique est définie par la formule suivante : [29-30]

$$\langle \psi \rangle = \frac{1}{V} \int_V \psi \cdot dV \quad (IV.6)$$

On définit aussi, une moyenne volumique des phases solide et fluide comme suit :

La moyenne volumique phase du solide $\langle \psi_s \rangle$ est donnée par :

$$\langle \psi_s \rangle = \frac{1}{V} \int_{V_s} \psi_s \cdot dV = (1 - \varepsilon) \langle \psi_s \rangle^s \quad (IV.7)$$

$\langle \psi_s \rangle^s$ Représente la moyenne volumique intrinsèque de la phase solide donnée par :

$$\langle \psi_s \rangle^s = \frac{1}{V_s} \int_{V_s} \psi_s \cdot dV \quad (IV.8)$$

(1-ε) : La fraction volumique de la phase solide

La moyenne volumique de la phase fluide $\langle \psi_f \rangle$ est donnée par

$$\langle \psi_f \rangle = \frac{1}{V} \int_V \psi_f \cdot dV = \varepsilon \langle \psi_f \rangle^f \quad (\text{IV.9})$$

$\langle \psi_f \rangle^f$ désigne la moyenne volumique intrinsèque de la phase fluide donnée par :

$$\langle \psi_f \rangle^f = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} \psi_f \cdot dV \quad (\text{IV.10})$$

(ε) : La fraction volumique de la phase fluide

L'application du théorème de prise de moyenne sur l'opérateur de dérivée spatiale ∇ et les grandeurs microscopiques de la phase solide ψ_s et fluide ψ_f , [31] sont données sous la forme suivante:

$$\langle \nabla \psi_s \rangle = \nabla \langle \psi_s \rangle + \frac{1}{V} \int_{A_{sf}} \psi_s \cdot dA \cdot \vec{n}_{sf} \quad (\text{IV.11})$$

$$\langle \nabla \psi_f \rangle = \nabla \langle \psi_f \rangle + \frac{1}{V} \int_{A_{fs}} \psi_f \cdot dA \cdot \vec{n}_{fs} \quad (\text{IV.12})$$

La grandeur ψ_s de la phase solide qui représente soit un champ de température ou de flux, peut-être décomposée en une valeur moyenne intrinsèque et une fluctuation [29], qui est sous la forme suivante:

$$\psi_s = \langle \psi_s \rangle^s + \tilde{\psi}_s \quad (\text{IV.13})$$

Par rapport à la taille du VER, la moyenne intrinsèque $\langle \psi_s \rangle^s$ varie faiblement et linéairement, aussi, la moyenne de la fluctuation notée $\langle \tilde{\psi}_s \rangle$ devrait être nulle. [32]

On montre que l'intégrale qui est dans le second membre de l'équation (IV.11) est calculée à l'aide de la fluctuation $\tilde{\psi}_s$ [33].

$$\frac{1}{V} \int_{A_{sf}} \psi_s \cdot dA \cdot \vec{n}_{sf} = \frac{1}{V} \int_{A_{sf}} (\langle \psi_s \rangle^s + \tilde{\psi}_s) \cdot dA \cdot \vec{n}_{sf} \simeq \frac{1}{V} \int_{A_{sf}} \tilde{\psi}_s \cdot dA \cdot \vec{n}_{sf} \quad (\text{IV.14})$$

Donc les équations (IV.11) et (IV.12) deviennent :

$$\langle \nabla \psi_s \rangle = (1 - \varepsilon) \nabla \langle \psi_s \rangle^s + \frac{1}{V} \int_{A_{sf}} \tilde{\psi}_s \cdot dA \cdot \vec{n}_{sf} \quad (\text{IV.15})$$

$$\langle \nabla \psi_f \rangle = (\varepsilon) \nabla \langle \psi_f \rangle^f + \frac{1}{V} \int_{A_{fs}} \tilde{\psi}_f \cdot dA \cdot \vec{n}_{fs} \quad (\text{IV.16})$$

Avec

$$\langle \psi_s \rangle = (1 - \varepsilon) \langle \psi_s \rangle^s \quad \text{et} \quad \langle \psi_f \rangle = \varepsilon \langle \psi_f \rangle^f$$

IV.3.3. Les équations locales et modélisation du transfert de conduction de chaleur

IV.3.3.1. Première étape : Écriture des lois de transfert dans un milieu diphasique et conditions aux limites

On retrouve les équations de conservation d'énergie pour le milieu poreux en projetant les hypothèses faites sur un milieu homogène pour un transfert de chaleur par conduction sur un volume élémentaire poreux

Les équations locales de conservation pour un milieu diphasique déduites sur les phases solide et fluide sont les suivantes :

$$(\rho c_p) \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla(\lambda_s \nabla T_s) \quad \text{Sur le volume du solide } V_s \quad (\text{IV.17})$$

$$(\rho c_p) \frac{\partial T_f}{\partial t} = \nabla(\lambda_f \nabla T_f) \quad \text{Sur le volume du fluide } V_f \quad (\text{IV.18})$$

Conditions aux limites :

$$T_s = T_f \quad \text{Sur l'interface solide/fluide } A_{sf} \quad (\text{IV.19})$$

$$\vec{n}_{sf} \lambda_s \nabla T_s = \vec{n}_{sf} \lambda_f \nabla T_f \quad \text{Sur l'interface solide/fluide } A_{sf} \quad (\text{IV.20})$$

IV.3.3.2. Deuxième étape : Obtention des champs des variables et densités de flux macroscopiques par prise de moyenne spatiale.

L'application de la prise de moyenne sur l'équation (IV.17)

$$(1 - \varepsilon)(\rho c_p) \frac{\partial \langle T_s \rangle}{\partial t} = \nabla \lambda_s \langle \nabla T_s \rangle + \frac{1}{V} \int_{A_{sf}} \lambda_s \nabla T_s \cdot dA \cdot \vec{n}_{sf} \quad (\text{IV.21})$$

Dans l'équation (IV.21), nous avons l'expression $\langle \nabla T_s \rangle$ qui peut être formulée comme suit à l'aide du théorème de la moyenne volumique sous la forme de l'équation (IV.15)

$$\langle \nabla T_s \rangle = (1 - \varepsilon) \nabla \langle T_s \rangle^s + \frac{1}{V} \int_{A_{sf}} \tilde{T}_s \cdot dA \cdot \vec{n}_{sf} \quad (\text{IV.22})$$

Avec

$\langle T_s \rangle$ la moyenne volumique de la température de la phase du solide donnée par

$$\langle T_s \rangle = \frac{1}{V} \int_V T_s \cdot dV = (1 - \varepsilon) \langle T_s \rangle^s \quad (\text{IV.23})$$

$\langle T_s \rangle^s$ la moyenne volumique intrinsèque de la température au niveau de la phase solide donnée par :

$$\langle T_s \rangle^s = \frac{1}{V_s} \int_{V_s} T_s \cdot dV \quad (\text{IV.24})$$

Le résultat final de la prise de moyenne sur l'équation (IV.17) de la phase solide s'écrit donc :

$$(1 - \varepsilon)(\rho c_p) \frac{\partial \langle T_s \rangle^s}{\partial t} = \nabla \left[\lambda_s (1 - \varepsilon) \nabla \langle T_s \rangle^s + \frac{\lambda_s}{V} \int_{A_{sf}} \tilde{T}_s \cdot dA \cdot \vec{n}_{sf} \right] + \frac{1}{V} \int_{A_{sf}} \lambda_s \nabla T_s \cdot dA \cdot \vec{n}_{sf} \quad (\text{IV.25})$$

Le même raisonnement est fait pour l'équation (IV.18) de la phase fluide, on aura en finalité la relation suivante :

$$\varepsilon \rho c_p \frac{\partial \langle T_f \rangle^f}{\partial t} = \nabla \left[\lambda_f \varepsilon \nabla \langle T_f \rangle^f + \frac{\lambda_f}{V} \int_{A_{fs}} \tilde{T}_f \cdot dA \cdot \vec{n}_{fs} \right] + \frac{1}{V} \int_{A_{fs}} \lambda_f \nabla T_f \cdot dA \cdot \vec{n}_{fs} \quad (\text{IV.26})$$

Les relations (IV.25) et (IV.26) présentent un modèle mathématique du phénomène de transfert de chaleur de conduction à l'échelle macroscopique pour les phases solide et fluide par rapport au volume élémentaire représentatif (VER).

La forme moyenne globale de l'équation de chaleur est traduite par la somme des équations (IV.25) et (IV.26), ainsi que l'hypothèse faite sur les dimensions géométriques locales par rapport au VER, $d \ll L$, de l'existence d'un équilibre thermique local entre les deux phases, solide/fluide qui se traduit par l'égalité des températures intrinsèques de chaque phase présentée par la relation (IV.27) et les conditions aux limites de (IV.19) et (IV.20).

$$\langle T_s \rangle^s = \langle T_f \rangle^f = T \quad (\text{IV.27})$$

La forme moyenne provisoire de l'équation de chaleur macroscopique est :

$$\langle \rho c_p \rangle \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left[[\varepsilon \lambda_f + (1 - \varepsilon) \lambda_s] \nabla T + \frac{\lambda_f - \lambda_s}{V} \int_{A_{fs}} \tilde{T} \cdot dA \cdot \vec{n}_{fs} \right] \quad (\text{IV.28})$$

Avec

$$\langle \rho c_p \rangle = \varepsilon \langle \rho c_p \rangle_f + (1 - \varepsilon) \langle \rho c_p \rangle_s \quad (\text{IV.29})$$

IV.3.3.3. Troisième étape : Fermeture

Le but, c'est de chercher une relation de fermeture qui donnera une reformulation des équations (IV.25) et (IV.26), en fonction de variables macroscopiques.

Dans l'équation (IV.28), l'intégrale du second membre présente un terme de fluctuation d'ordre microscopique qu'il faut expliciter.

D'après la relation de décomposition (IV.13), le champ de température peut être décomposé sous une somme de la moyenne volumique intrinsèque et d'une fluctuation de la température.

$$T = \langle T \rangle + \tilde{T} \quad (\text{IV.30})$$

Où $\tilde{T} = \vec{\nabla} \langle T \rangle \cdot \vec{X}$ représente un produit scalaire entre le gradient de la moyenne de température et le vecteur représentant cette fluctuation.

L'étude du milieu local présente une densité du flux concernant les deux phases solide et fluide

$$q_s = \lambda_s \nabla T_s \quad q_f = \lambda_f \nabla T_f$$

CL :

$$\begin{aligned} T_s &= T_f = T & \vec{n}_{sf} \lambda_s \nabla T_s &= \vec{n}_{sf} \lambda_f \nabla T_f \\ q_s &= -\lambda_s \nabla T_s = -\lambda_s \nabla [\langle T_s \rangle^s + \vec{\nabla} \langle T_s \rangle^s \vec{X}] = -\lambda_s [\delta_{ij} + \vec{\nabla} \vec{X}] \nabla \langle T_s \rangle^s \\ q_f &= -\lambda_f \nabla T_f = -\lambda_f \nabla [\langle T_f \rangle^f + \vec{\nabla} \langle T_f \rangle^f \vec{X}] = -\lambda_f [\delta_{ij} + \vec{\nabla} \vec{X}] \nabla \langle T_f \rangle^f \end{aligned}$$

Le symbole de *Kronecker* δ_{ij} représente le tenseur unité : $\delta_{ij} = 1$ si $i = j$; $\delta_{ij} = 0$ si $i \neq j$

On cherche la prise de moyenne de la densité du flux pour la phase solide

$$\langle q_s \rangle = -\lambda_s \langle \nabla T_s \rangle = -\lambda_s [\delta_{ij} + \langle \vec{\nabla} \vec{X} \rangle] \nabla \langle T_s \rangle^s$$

La moyenne du gradient de \vec{X} est : $\langle \vec{\nabla} \vec{X} \rangle = \nabla \langle \vec{X} \rangle + \frac{1}{V_s} \int_{A_{sf}} \vec{X} \cdot dA \cdot \vec{n}_{sf}$

$$\langle q_s \rangle = -\lambda_s [\delta_{ij} + \nabla \langle \vec{X} \rangle + \frac{1}{V_s} \int_{A_{sf}} \vec{X} \cdot dA \cdot \vec{n}_{sf}] \nabla \langle T_s \rangle^s$$

La moyenne $\langle \vec{X} \rangle$ qui est nulle, \vec{X} représente la fluctuation de la température au niveau des interfaces.

La densité du flux de la phase solide sera donnée par :

$$(1 - \varepsilon) \langle q_s \rangle = -(1 - \varepsilon) \lambda_s \left[\delta_{ij} + \frac{1}{V_s} \int_{A_{sf}} \vec{X} \cdot dA \cdot \vec{n}_{sf} \right] \nabla \langle T_s \rangle^s$$

Et la phase fluide par :

$$\varepsilon \langle q_f \rangle = -\varepsilon \lambda_f \left[\delta_{ij} + \frac{1}{V_f} \int_{A_{fs}} \vec{X} \cdot dA \cdot \vec{n}_{fs} \right] \nabla \langle T_f \rangle^f$$

La densité totale est donc :

$$\begin{aligned} q_t &= (1 - \varepsilon) \langle q_s \rangle + \varepsilon \langle q_f \rangle = \\ &= - \left\{ (1 - \varepsilon) \lambda_s \left[\delta_{ij} + \frac{1}{V_s} \int_{A_{sf}} \vec{X} \cdot dA \cdot \vec{n}_{sf} \right] + \varepsilon \lambda_f \left[\delta_{ij} + \frac{1}{V_f} \int_{A_{fs}} \vec{X} \cdot dA \cdot \vec{n}_{fs} \right] \right\} \nabla T = \lambda_{app} \nabla T \quad (IV.31) \end{aligned}$$

Avec

$$\langle T_s \rangle = \langle T_f \rangle = \langle T \rangle = T \text{ (Équilibre thermique local)}$$

Ou

$$\langle \rho c_p \rangle \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left\{ (1 - \varepsilon) \lambda_s \left[\delta_{ij} + \frac{1}{V_s} \int_{A_{sf}} \vec{X} \cdot dA \cdot \vec{n}_{sf} \right] + \varepsilon \lambda_f \left[\delta_{ij} + \frac{1}{V_f} \int_{A_{fs}} \vec{X} \cdot dA \cdot \vec{n}_{fs} \right] \right\} \nabla T \quad (IV.32)$$

$$\langle \rho c_p \rangle \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left[\varepsilon \lambda_f + (1 - \varepsilon) \lambda_s \right] \delta_{ij} + \frac{\lambda_f - \lambda_s}{V} \int_{A_{fs}} \vec{X} \cdot dA \cdot \vec{n}_{fs} \nabla T \quad (IV.33)$$

La conductivité thermique apparente λ_{app} est déduite directement de la relation (IV.33)

$$\lambda_{app} = \left[\varepsilon \lambda_f + (1 - \varepsilon) \lambda_s \right] \delta_{ij} + \frac{\lambda_f - \lambda_s}{V} \int_{A_{fs}} \vec{X} \cdot dA \cdot \vec{n}_{fs} \quad (IV.34)$$

$$\lambda_{app} = [\varepsilon\lambda_f + (1 - \varepsilon)\lambda_s]I + \frac{\lambda_f - \lambda_s}{V} \int_{A_{fs}} \vec{X} \cdot dA \cdot \vec{n}_{fs} \quad (IV.35)$$

Avec I : Tenseur unité

Le second membre des deux équations (IV.28) et (IV.33), représente la densité totale du flux de chaleur sous la forme macroscopique pour un milieu poreux, donnée par :

$$\left[[\varepsilon\lambda_f + (1 - \varepsilon)\lambda_s] \nabla T + \frac{\lambda_f - \lambda_s}{V} \int_{A_{fs}} \tilde{T}_f \cdot \vec{n}_{fs} \cdot dA \right] \quad (IV.36)$$

$$\left[[\varepsilon\lambda_f + (1 - \varepsilon)\lambda_s]I + \frac{\lambda_f - \lambda_s}{V} \int_{A_{fs}} \vec{X} \cdot \vec{n}_{fs} \cdot dA \right] \nabla T \quad (IV.37)$$

Par identification des deux relations et l'analyse du terme $\frac{1}{V} \int_{A_{fs}} \tilde{T}_f \cdot dA \cdot \vec{n}_{fs}$. [22]

La fluctuation de la température est remplacée par l'expression $\tilde{T} = \vec{X} \cdot \nabla \langle T \rangle = \vec{X} \cdot \nabla T$; on retrouve pratiquement la relation de la conductivité apparente.

$$\lambda_{app} = [\varepsilon\lambda_f + (1 - \varepsilon)\lambda_s]I + \frac{\lambda_f - \lambda_s}{V} \int_{A_{fs}} \vec{X} \cdot \vec{n}_{fs} \cdot dA$$

Le premier terme met en évidence la dépendance des fractions volumiques et des conductivités thermiques des phases solide et fluide. La deuxième partie exprime l'effet de la structure microscopique (la tortuosité), qui principalement, influe sur la conductivité thermique suivant la nature des équations et les conditions inter-faciales.

Dans le deuxième terme de la relation (IV.37), le vecteur \vec{X} représente le moyen de fermeture qui relie la déviation spatiale des températures aux variables macroscopiques.

Le calcul rigoureux de l'intégrale $\int_{A_{fs}} \vec{X} \cdot \vec{n}_{fs} \cdot dA$, dépend de la connaissance des données microstructurale de l'interface solide fluide, qui sont généralement défailtantes, surtout dans un milieu macroscopiquement isotrope [34].

Vu la complexité du phénomène de transfert de chaleur par conduction dans les milieux poreux, la conductivité thermique qui est sous forme d'un tenseur se réduit à une grandeur physique scalaire qui est généralement déterminée par voie expérimentale ou à l'aide de modèles analytiques de prédiction.

IV.4. CONCLUSION

Ce chapitre vise à exposer le phénomène de transfert de chaleur par conduction dans les milieux poreux et l'approche macroscopique qui est incontournable pour l'établissement des équations de transfert à l'échelle macroscopique.

L'approche macroscopique est obtenue par la méthode de la prise de moyenne volumique qui permet le passage de la petite échelle des équations de transfert définies localement vers les

équations macroscopiques (IV.25) et (IV.26), par les quelles apparaît le gradient des grandeurs moyennes et les intégrales inter-faciales. La forme finale de ces équations de transfert, sera obtenue à condition que le terme de fluctuation d'ordre locale qui apparaît sous l'intégrale inter-faciale soit défini par des grandeurs macroscopiques qui relient la valeur macroscopique à la valeur microscopique.

Nous avons décrit en détail les étapes de l'approche macroscopique et qui se résume comme suit :

Première étape : Écriture des lois de transfert dans un milieu diphasique et conditions aux limites aux interfaces des phases en présence

Deuxième étape : Obtention des champs des variables et densités de flux macroscopiques par prise de moyenne spatiale.

Troisième étape : représente une fermeture qui cherche une relation de fermeture qui donnera une reformulation des équations (IV.25) et (IV.26), en fonction de variables macroscopiques.

La forme moyenne de l'équation de transfert macroscopique (IV.32) sera en finalité exprimée au moyen d'intégrale inter-faciale, qui en réalité exprime les coefficients de transfert au niveau microscopique selon la connaissance réelle de l'espace géométrique poral.

L'utilisation de cette méthode pour établir des relations qui expriment la conductivité thermique apparente en fonction de paramètres macroscopiques est très complexe, et exige des connaissances pertinentes du milieu étudié.

La description morphologique d'un échantillon (VER) par imagerie haute résolution du milieu poreux, peut donner des informations sur la structure microscopique afin de choisir un volume élémentaire représentatif, de résoudre l'équation de transfert moyenne et déduire une estimation quantitative du coefficient de transfert.

Vu la complexité du phénomène de transfert de chaleur par conduction dans les milieux poreux, la conductivité thermique apparente est généralement déterminée par voie expérimentale ou à l'aide de modèles analytiques de prédiction établis à partir de différentes approches comme la prise de moyenne, statistique et analogie électrique.

Chapitre V

DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE MESURE ET MODELES
DE PREDICTION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE
APPARENTE

V 1. INTRODUCTION

Les matériaux de construction de l'habitat sont considérés comme un matériau poreux très proche des milieux granulaires. Cette approximation présente un avantage important à l'étude des transferts de chaleur au sein de ces milieux poreux caractérisés par leur porosité et présentant une phase solide et une phase fluide.

Notre étude du comportement thermique des milieux granulaires est principalement consacrée à la prédiction de la conductivité thermique apparente qui est une propriété physique caractérisant l'importance du transfert thermique dans les matériaux de construction.

La détermination de cette conductivité dépend de certains paramètres tels que, la conductivité thermique de chaque phase, le taux et le type de porosité ouverte et/ou fermée, et l'existence de surface de contact entre les particules [21]

L'objectif de ce chapitre débute par la présentation d'une manière rapide les méthodes de mesures de la conductivité thermique. Ensuite, nous présenterons notre dispositif de mesure expérimental de la conductivité thermique.

Une présentation rapide de quelques modèles analytiques de prédiction de la conductivité thermique avec lesquels, sera faite une comparaison des résultats expérimentaux et les valeurs théoriques.

V.2. LES METHODES DE MESURE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE APPARENTE

Par l'étude d'un échange de chaleur dans un système, la conductivité thermique est devenue une propriété thermo-physique incontournable et la plus recherchée pour le choix des matériaux de construction présentant un certain degré d'isolation [35]. L'évaluation de cette grandeur par des mesures expérimentales en utilisant différentes techniques, demande un temps d'expérimentation assez long. Elles sont fondées sur l'application d'un flux thermique unidirectionnel sur l'échantillon à étudier. Les résultats ou les mesures effectuées sont sous la forme d'un flux de chaleur ou de températures permettant la déduction de la conductivité thermique [36].

La technique de mesure de la conductivité thermique se distingue en deux méthodes et suivant le régime thermique (permanent ou non permanent) : les méthodes photo-thermiques, (l'échantillon est chauffé par l'absorption de photons) [37] et les méthodes électrothermiques, (L'échantillon est chauffé par effet Joule produit par des résistances électriques) [38].

Ces méthodes de mesure sont généralement basées sur les équations de conduction de chaleur.

Le choix d'une méthode de mesure de la conductivité thermique dépend de certains paramètres à prendre en compte : le type du milieu granulaire, l'état de ce milieu liquide ou solide, le régime thermique, la forme géométrique du milieu, les dimensions, et la simplicité de la méthode.

V.2.1. Les méthodes en régime stationnaire

La méthode de la plaque chaude gardée, méthode des boîtes et celle du fil chaud font partie des méthodes électrothermiques utilisées en régime stationnaire.

Ces méthodes sont conçues pour mesurer les conductivités thermiques des milieux isolants se basant sur un modèle unidirectionnel et stationnaire [39]. Le temps est assez long surtout pour des matériaux à faible conductivité thermique. La mesure de la température le long de la normale de l'échantillon à géométrie particulière est choisie de telle sorte à considérer le problème comme unidirectionnel de manière que l'utilisation des équations de Fourier et les conditions aux limites aboutissent à une expression faisant intervenir la conductivité thermique et les facteurs géométriques [40].

V.2.1.1 Méthode de la plaque chaude gardée

Le schéma de principe est représenté sur la figure V.1

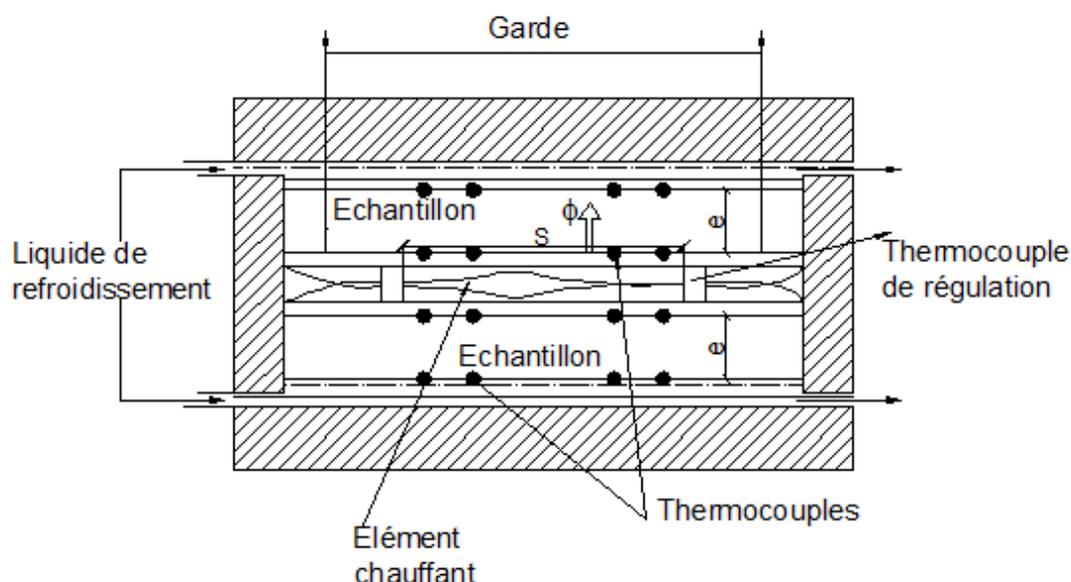


Figure V.1 : Schéma de principe de la méthode de la plaque chaude gardée, [39]

Cette méthode est utilisée en général pour mesurer la conductivité thermique des isolants qui présentent une conductivité inférieure à 1 W/mK. [41, 42]

La figure V.1 montre le principe du montage expérimental de la méthode. L'élément chauffant produit un flux de chaleur Φ qui est transmis aux deux échantillons identiques d'épaisseur « e » par l'intermédiaire de la surface S (zone de mesure). Ce flux sera divisé en deux parties de part et d'autre des échantillons.

On utilise une garde active, afin d'assurer le transfert 1D dans la zone chauffante de mesure par un anneau de garde pour que la température de l'anneau soit égale à la température de la plaque chauffante pour minimiser les pertes latérales aux extrémités.

Des thermocouples sont placés de part et d'autre des deux faces des échantillons pour mesurer les écarts de température ΔT

Le modèle est simple puisqu' il est basé sur le transfert unidirectionnel en régime permanent ; la conductivité thermique est déduite par :

$$\lambda = \frac{\Phi.e}{S.\Delta T} \quad (V.1)$$

S représente la surface de la plaque chauffante.

V.2.1.2. Méthode des boîtes

Le principe de cette méthode, mise au point par le Laboratoire d'Etudes Thermiques et Solaires de l'Université Claude Bernard de Lyon, est schématisé sur la figure V.2

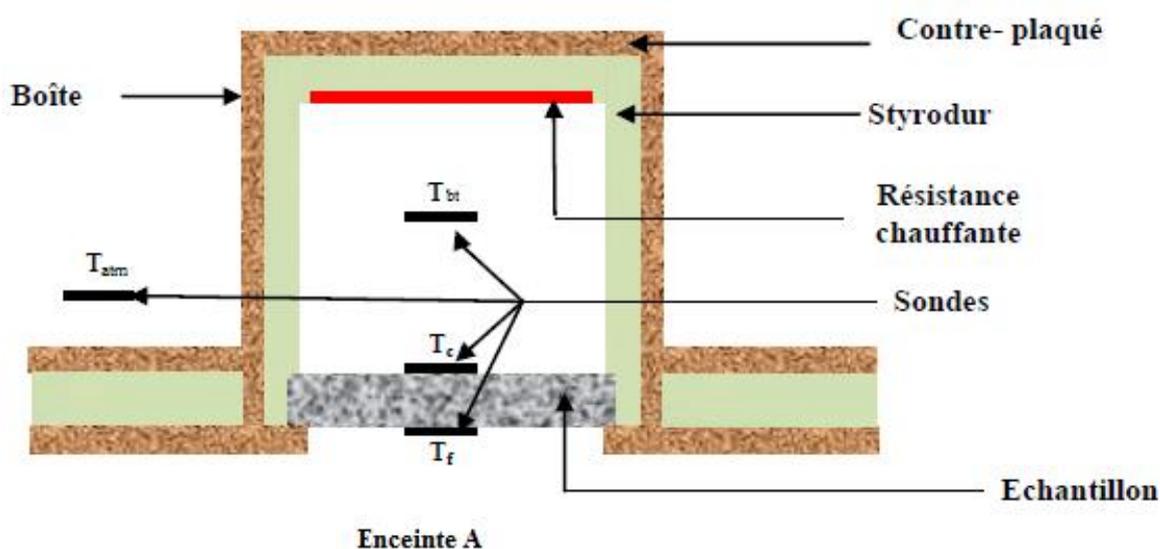


Figure V.2 : Coupe du dispositif " boîte de mesure"

L'enceinte A est maintenue à une température plus basse que la boîte grâce à un échangeur basse température . Les plaques chauffantes C situées dans les boîtes créent un gradient de température à travers l'échantillon E.

Les températures sur les faces supérieure et inférieure de l'échantillon E et le flux de chaleur émis par la résistance chauffante sont mesurées et permettent de calculer les caractéristiques thermiques de l'échantillon.

La stabilisation des températures T_C et T_F des faces chaude et froide de l'échantillon, nous conduit à conclure que le régime permanent est atteint (variation de l'ordre du $1/10^\circ$ de degré en une heure).Le temps nécessaire à atteindre est de 4 à 7 heures. Elle présente les avantages suivants :

- * Présente une bonne précision et dans des conditions réelles d'utilisation,
- * Permet des mesures sur des matériaux humides,
- * Permet des mesures sur tous les types de matériaux utilisés dans l'industrie et le bâtiment, à l'exception des métaux [43].

Le bilan énergétique du "local boîte" permet de considérer les trois flux suivants :

- Effet joule produit par la résistance chauffante

$$\phi_j = \frac{V^2}{R} \quad (V.2)$$

- Déperdition thermique à travers la boîte

$$\phi_d = C_d (T_{bt} - T_{atm}) \quad (V.3)$$

C_d : coefficient de déperdition

- Le flux de conduction à travers l'échantillon

$$\phi_c = \frac{\lambda_e A}{e} (T_C - T_F) \quad (V.4)$$

On a $\phi_j = \phi_d + \phi_c \Rightarrow$

$$\lambda = \frac{e}{A(T_C - T_F)} \left[\frac{V^2}{R} - C_d (T_{bt} - T_{atm}) \right] \quad (V.5)$$

V.2.2. Les méthodes en régime instationnaire

Le principe de mesure des méthodes en régime instationnaire s'appuie sur l'évolution temporelle de la température. Le modèle est obtenu à partir de l'équation de conservation de l'énergie qui permet de trouver une relation directe entre les paramètres d'entrée et les grandeurs mesurées. Par rapport aux méthodes en régime permanent, elles permettent la mesure de la diffusivité thermique et d'en déduire la capacité thermique.

Parmi ces méthodes de mesures des propriétés thermo-physiques, on rencontre la méthode du fil chaud, Hot Disk, le plan chaud, ruban chaud et la méthode flash. [39,44, 45].

V.2.2.1. Méthode du fil chaud

La méthode du fil chaud est la plus utilisée dans le monde industriel vu sa facilité de mise en œuvre et sa rapidité. Elle fut développée en premier lieu pour l'étude de la conductivité thermique de liquide et des gaz [46] et étendue par la suite à la caractérisation de milieux solides et aux milieux poreux, [47]. Le principe expérimental est simple : on place un fil métallique (source de chaleur) entre deux blocs du matériau à étudier pour les matériaux solides et pour les gaz et les liquides, la source de chaleur est immergée dans le milieu à caractériser.

L'échelon de flux de chaleur appliqué est constant ($\phi = 0$ si $t < t_0$ et $\phi = \phi_0$ si $t > t_0$) au fil chauffant et on relève l'évolution de la température $T_s(t)$ de ce fil. Pendant le temps où la perturbation n'a pas atteint les autres faces des échantillons, c'est-à-dire où l'hypothèse du milieu semi-infini est valide.

Dans le cas des solides pulvérulents (grains, poudres...), le fil chauffant est placé avec le thermocouple dans un cylindre de très petit diamètre. Ce cylindre est inséré dans le matériau à caractériser avant de démarrer le chauffage et l'acquisition de la température.

- Modélisation du fil chaud

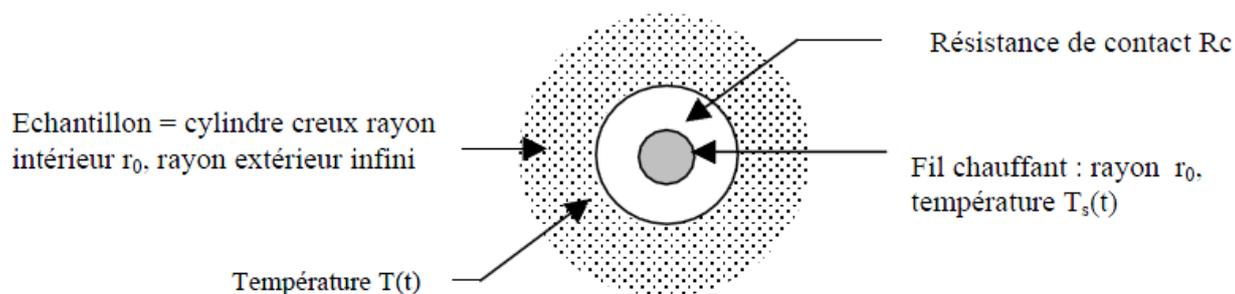


Figure V.3 : Schéma des transferts autour du fil chaud

L'équation de la chaleur en coordonnées cylindriques s'écrit :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{V.6})$$

Avec les conditions aux limites

$$\begin{cases} T(r, 0) = T_s(0) = T \\ T(\infty, t) = T_i \\ h[T_0(t) - T(0, t)] = -\lambda \frac{\partial T(0, t)}{\partial r} \\ \phi_0 = mc \frac{dT_0}{dt} + hS[T_0(t) - T(0, t)] \end{cases}$$

L'évolution de la température est donnée par la formule suivante :

$$T_0(t) - T_0(0) = \frac{\phi_0}{4\pi\lambda L} \ln(t) + \phi_0 \left[R_c - \frac{\gamma\phi_0}{4\pi\lambda L} - \frac{\ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{\alpha}}\right)}{2\pi\lambda L} \right] \quad (\text{V.7})$$

La conductivité thermique de l'échantillon est déterminée en traçant la courbe de la variation de la température en fonction de $\ln(t)$. Cette courbe est une droite de pente $\frac{\phi_0}{24\lambda L}$ dont la détermination nous permet de calculer la conductivité λ .

Des difficultés pratiques peuvent engendrer des erreurs significatives lorsque :

Le milieu est un fluide, les phénomènes de convection et de rayonnement peuvent entrer en jeu. Néanmoins, si le gradient de température est très petit, ces phénomènes deviennent pratiquement négligeables.

L'inertie du fil et la résistance de contact entre l'échantillon et la sonde sont importantes. Toutefois, pour des températures aux temps longs, l'influence n'est pas très importante. En outre, elle présente des avantages avérés tel que :

La rapidité et la précision des mesures de la conductivité thermique.

L'observation de l'évolution des propriétés, thermo-physiques en fonction du temps

V.2.2.2. Méthode flash

Le but de cette méthode est la mesure de la diffusivité thermique des solides. Le principe consiste à éclairer une face de l'échantillon par une impulsion de forte puissance et très courte

figure V.4. Un thermocouple placé sur la surface parallèle de l'échantillon, nous permet d'enregistrer l'évolution de la température et de tracer un thermogramme. L'estimation de la diffusivité thermique est donc possible par comparaison du thermogramme avec l'équation caractéristique du modèle.

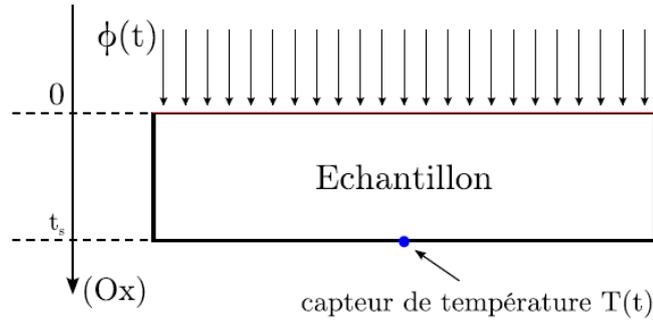


Figure V.4 : Schéma de principe de la méthode flash [40]

Le problème est posé de la façon suivante : [48]

$$\frac{\delta T(x,t)}{\delta t} = a \frac{\delta^2(x,t)}{\delta x^2} \quad (V.8)$$

Conditions aux limites :

$$\begin{cases} x = 0 & T(x,t) = -\frac{\phi}{\lambda} \delta(t) \\ x = t_s & T(x,t) = 0 \\ t < 0 & T(x,t) = T_0 \end{cases}$$

L'équation qui permettra de remonter à la diffusivité thermique est donné par :

$$T(x = t_s, t) = T_{hom} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(\frac{-n^2 \pi a}{t_s^2} t\right) \right) \quad (V.9)$$

Avec T_{hom} : Température homogène ou adiabatique

V.2.2.3. Choix d'une méthode

Le choix d'une technique de mesure des propriétés thermo-physiques des matériaux granulaires doit obéir à différents critères tels que :

La nature de l'aspect physique du milieu à caractériser (solide, liquide, gaz, poudre, ...) et des moyens disponibles.

La détermination directe de la conductivité thermique est possible que par les méthodes en régime permanent alors que les méthodes instationnaires, leur caractérisation se base

essentiellement sur la diffusivité thermique qui automatiquement est complétée par des mesures calorimétriques afin d'en déduire la conductivité thermique.

V.3. DISPOSITIF DE MESURE EXPERIMENTAL DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons décrit quelques méthodes de mesures de la conductivité thermique apparente en régime permanent et instationnaire. Notre dispositif de mesure utilisé s'adapte avec les méthodes en régime stationnaire.

V.3.1. Description du dispositif de mesure

La conductivité thermique est la caractéristique que nous avons mesuré avec le dispositif expérimental. Son schéma de principe présenté sur la figure V.5, se base sur le principe des méthodes en régime permanent tel que la méthode de la plaque chaude gardée, la méthode des boîtes [29, 39] et les travaux réalisés par [50].

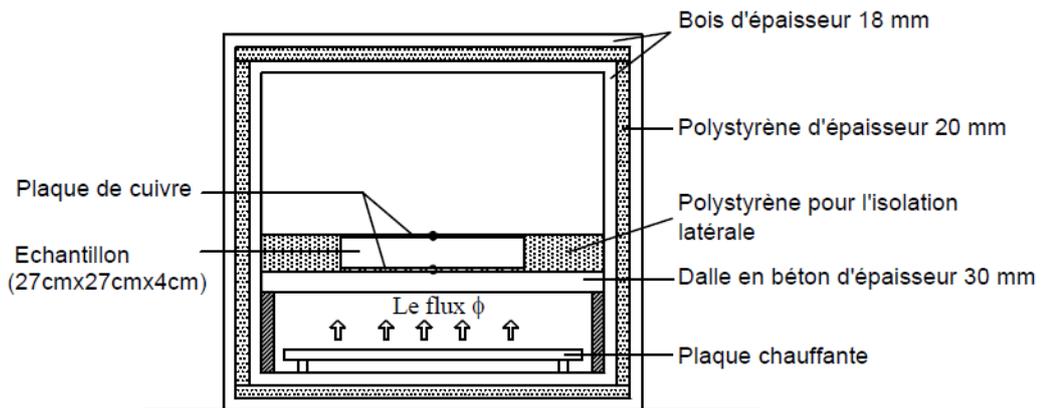


Figure V.5 : Schéma de principe du dispositif de mesure de la conductivité thermique

Tous les échantillons doivent avoir une forme parallélépipédique de 27 cm de côté et d'épaisseur de 2 à 6 cm. L'échantillon est positionné de sorte qu'il aura une face chaude et une face froide. Figure V.6

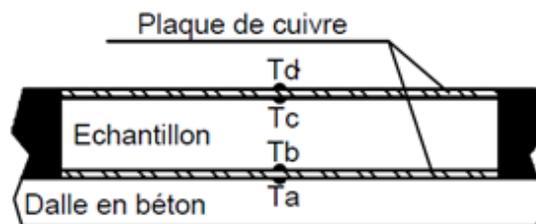


Figure V.6 : Vue agrandie du montage plaques de cuivre et l'échantillon

La figure V.7 représente le boîtier contenant le dispositif expérimental de dimensions extérieures 64*56*48 cm en bois double paroi isolée avec du polystyrène. L'intérieur de la boîte présente l'ambiance chaude totalement close afin de minimiser le transfert thermique par convection autour du système de mesure.

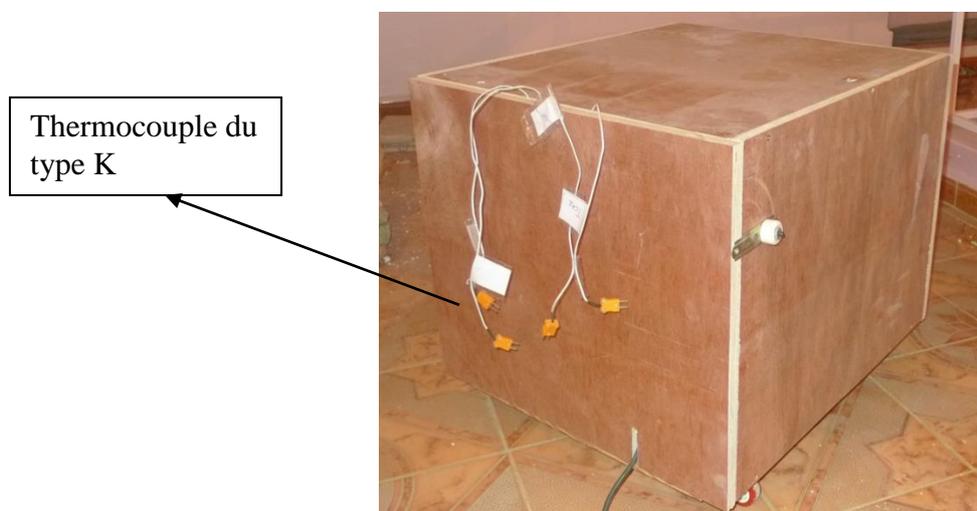


Figure V.7 : Boîtier de mesure

La boîte est munie d'une plaque chauffante placée sous une dalle en béton de 5 cm d'épaisseur. La dalle est chauffée à une température supérieure à 40°C. Figure V.8

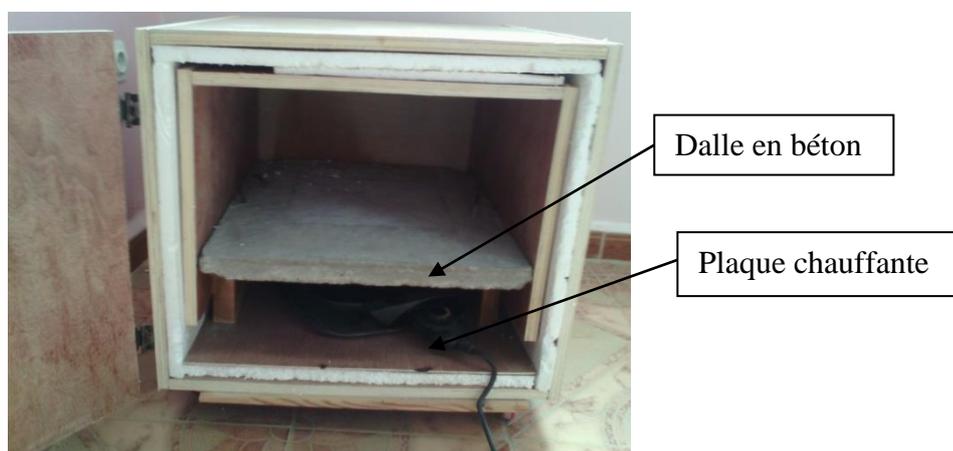


Figure V.8 : Plaque chauffante et dalle en béton

Pour les besoins de mesure des différentes températures T_a , T_b , T_c et T_d , nous avons utilisé des thermocouples de type K composition (alliage nickel + chrome) adapté pour la haute température et placé de part et d'autre sur les des deux plaques de cuivre (Figure V.6 et V.7). Les valeurs de ces températures sont relevées directement par le multimètre M890C+. Capacité de lecture de la température entre -50°C et +400°C. Figure V.9.



Figure V.9 : Multimètre M890C+

V.3.1.1. Montage et mesure du dispositif

1. Montage

Sur la figure V.10, nous présentons la disposition du premier ensemble thermocouples et plaque de cuivre de dimension 27*27*0.04 cm sur la dalle en béton. Les deux thermocouples sont collés de part et d'autre sur la surface de la plaque en cuivre afin de mesurer les températures T_a et T_b respectivement température d'entrée et de sortie de la plaque de cuivre. Ces deux températures serviront à déterminer le flux de conduction entrant dans l'échantillon Φ_{cde} .

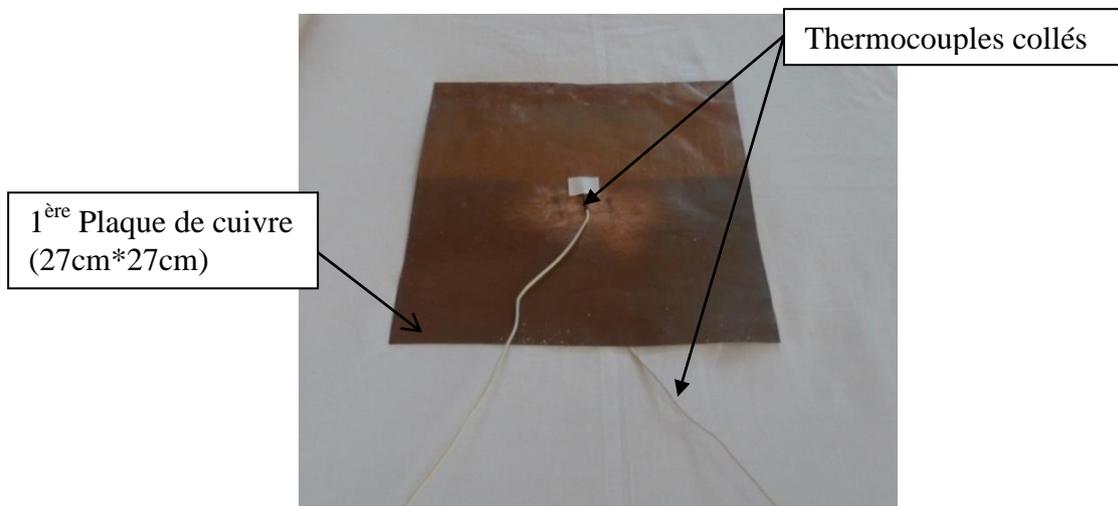


Figure V.10 : Le premier ensemble thermocouples et plaque de cuivre

On place directement l'échantillon à tester sur le premier ensemble thermocouples+plaque de cuivre. Figure V.11

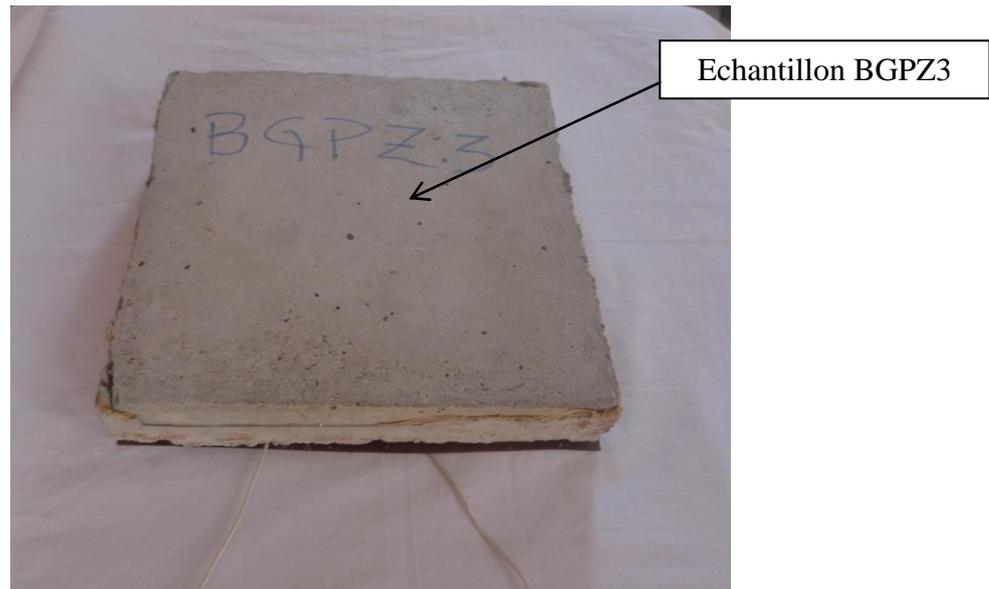


Figure V.11 : (Ensemble thermocouples + plaque de cuivre) + (échantillon à tester)

Ensuite, nous plaçons le deuxième ensemble thermocouples et plaque de cuivre de dimension 27*27*0.04 cm sur l'échantillon à tester. Les deux thermocouples sont collés de part et d'autre sur la surface de la plaque en cuivre afin de mesurer les températures Tc et Td respectivement température d'entrée et de sortie de la plaque de cuivre. Ces deux températures indiqueront le flux de conduction sortant ϕ_{cds} . Figure V.12

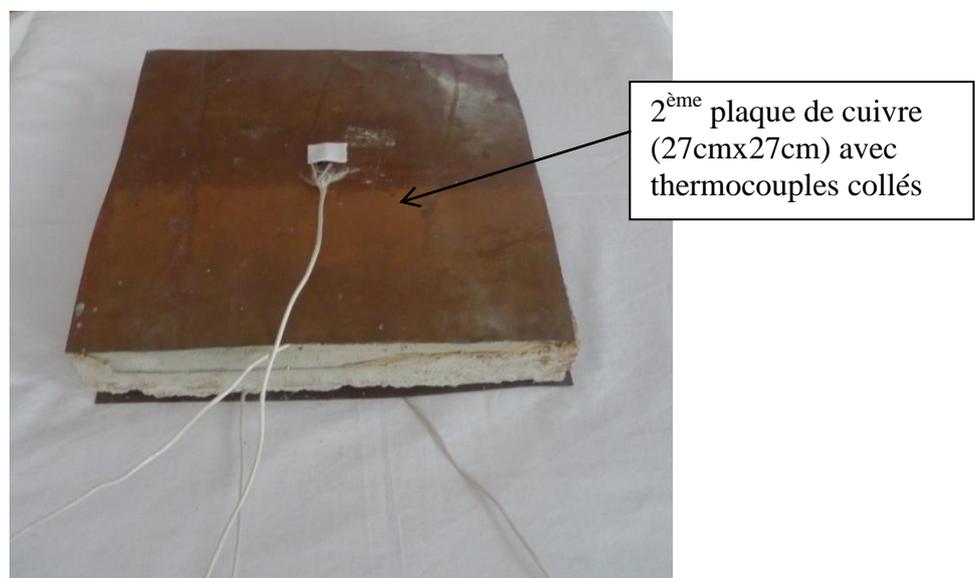


Figure V.12 : Premier et deuxième ensemble thermocouples + plaque de cuivre + (échantillon à tester)

L'ensemble thermocouple + plaques de cuivre + échantillon est entouré d'un anneau de garde en polystyrène disposé de sorte que les pertes de flux sur les côtés seront minimisées. Figure V.13.

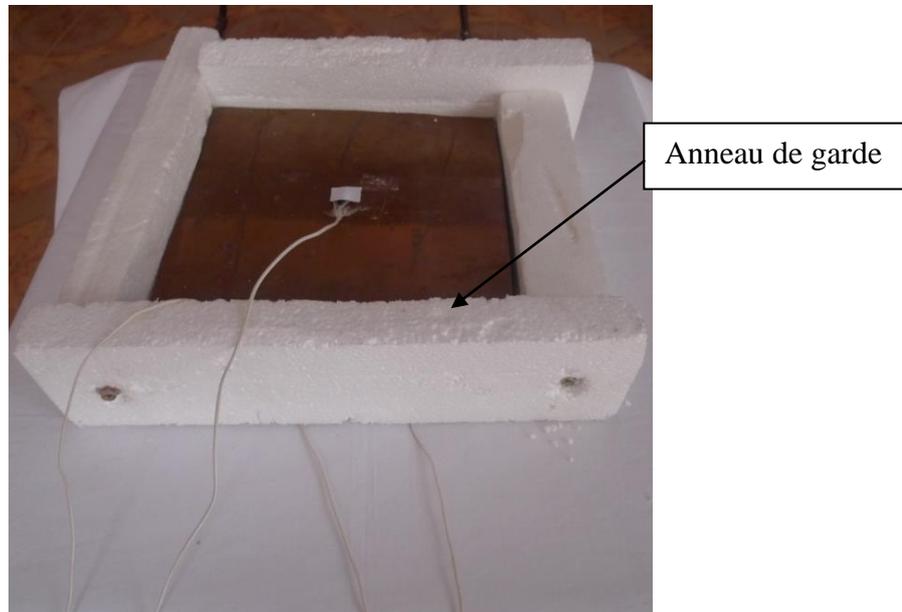


Figure V.13 : Anneau de garde

Sur la figure V.14, nous montrons l'ensemble du boîtier avec le dispositif de mesure.

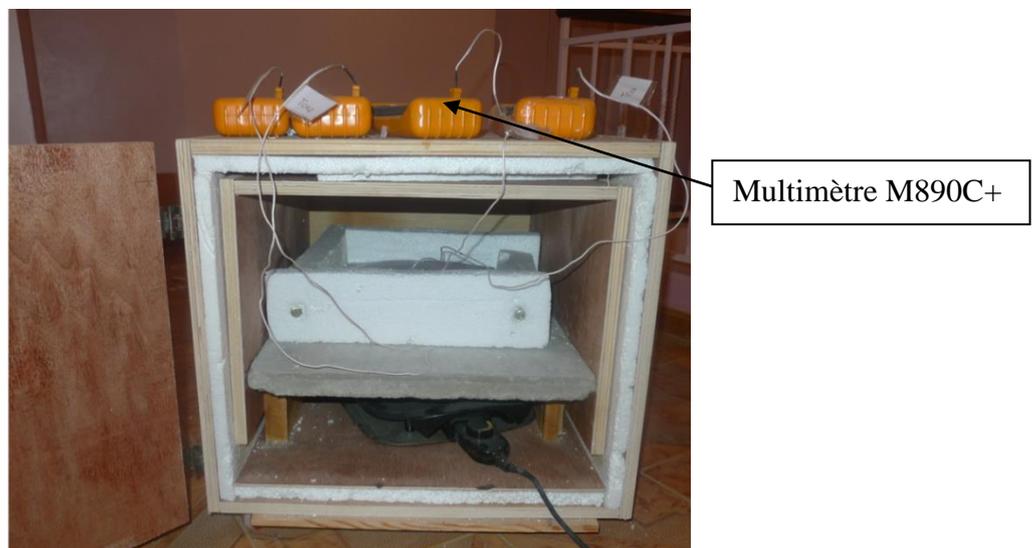


Figure V.14 : Vue d'ensemble du boîtier et du dispositif de mesure

2. Différentes phases de mesure

Une fois la boîte fermée, la plaque chauffante sera allumée avec un réglage du thermostat entre les positions 1 et 2

Le régime permanent est atteint lorsque les différentes températures T_a , T_b , T_c , T_d à l'intérieur de la boîte restent constantes pendant aux moins 90 minutes. Pour atteindre le régime permanent, il faut au moins huit heures d'attente.

La conductibilité thermique λ est définie comme la constante de proportionnalité entre le gradient de température et le flux de chaleur qu'il provoque et qui se traduit par l'équation (V.10)

$$\Phi_{cd} = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (V.10)$$

Comme toutes les méthodes stationnaires, notre dispositif se base sur l'équation (V.10). Le régime permanent est atteint que si le flux entrant sera égal au flux sortant. Il suffit alors de mesurer les quatre températures aux points a, b, c et d. Figure V.6.

En régime permanent, le flux de chaleur traversant l'échantillon sera donc:

$$\Phi_{cd} = \lambda_{app} S \frac{(T_b - T_c)}{e_{echan}} \quad (V.11)$$

Les flux entrant et sortant sont déterminés successivement par les formules (V.12) et (V.13)

$$\Phi_{cde} = \lambda_{cuiivre} S \frac{(T_a - T_b)}{e_{cuiivre}} \quad (V.12)$$

$$\Phi_{cde} = \lambda_{cuiivre} \cdot S \frac{(T_c - T_d)}{e_{cuiivre}} \quad (V.13)$$

On peut écrire que

$$\Phi_{cd} = \Phi_{cde} = \Phi_{cde} \quad (V.14)$$

La valeur de la conductivité thermique apparente se calcule en s'appuyant sur la formule suivante:

$$\lambda_{app} = \lambda_{cuiivre} \frac{(T_c - T_d) \cdot e_{echan}}{(T_b - T_c) \cdot e_{cuiivre}} = \lambda_{cuiivre} \frac{\Delta T_{cd} \cdot e_{echan}}{\Delta T_{bc} \cdot e_{cuiivre}} \quad (V.15)$$

V.4.CALCUL D'ERREURS EXPERIMENTALES

Quel que soit la précision des instruments de mesure utilisés, la mesure d'une grandeur physique est toujours une valeur approchée de la valeur vraie. La valeur exacte (vraie) d'une mesure est comprise entre deux valeurs limites, l'une dite approche par défaut et la deuxième est une approche par excès.

L'écriture de la valeur de la conductivité thermique sera sous la forme suivante :

$$\lambda_{vraie} = \lambda_{mesurée} \pm \Delta\lambda \quad (V.16)$$

Le terme $\Delta\lambda$ de la formule (V.16) représente un intervalle de confiance qu'il faut estimer dans le cas d'un travail expérimental.

Une série de mesures d'une grandeur physique telle que la conductivité thermique qui est en fonction de plusieurs variables, formule (V.15) est en général affectée par plusieurs erreurs d'origine différentes compliquant l'approche probable de la vraie valeur.

V.4.1.Methode d'estimation statistique

Notre conductivité thermique apparente est une fonction de plusieurs variables

$$\lambda_{app} = f(\lambda_{cuiivre}, e_{cuiivre}, e_{echan}, \Delta T_{cd}, \Delta T_{bc})$$

Les moyennes de chaque variable sont respectivement $\bar{\lambda}_{cuiivre}$, $\bar{e}_{cuiivre}$, \bar{e}_{echan} , $\overline{\Delta T}_{cd}$ et $\overline{\Delta T}_{bc}$ déterminées par les formules suivantes :

$$\bar{\lambda}_{cuiivre} = \frac{\sum_i^n \lambda_i^{cuiivre}}{n}$$

$$\bar{e}_{cuiivre} = \frac{\sum_i^n e_i^{cuiivre}}{n}$$

$$\bar{e}_{echan} = \frac{\sum_i^n e_i^{echan}}{n}$$

$$\overline{\Delta T}_{cd} = \frac{\sum_i^n \Delta T_i^{cd}}{n}$$

$$\overline{\Delta T}_{bc} = \frac{\sum_i^n \Delta T_i^{bc}}{n}$$

On note par $s^2(x)=\sigma^2(x)$ l'incertitude type individuelle de chaque mesure expérimental, aussi appelé écart type

$$\sigma^2(x) = s^2(x) = \frac{1}{n-1} \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (V.17)$$

L'incertitude type de la valeur moyenne est donnée par :

$$\Delta\bar{x} = \sigma^2(\bar{x}) = s^2(\bar{x}) = \frac{s^2(x)}{n} = \frac{\sigma^2(x)}{n} \quad (V.18)$$

, x et \bar{x} représente respectivement les mesurantes et leurs moyennes.

Le calcul de l'incertitude relative est donné par

$$\frac{\Delta\lambda_{app}}{\lambda_{app}} = \frac{\Delta\lambda_{cuivre}}{\lambda_{cuivre}} + \frac{\Delta(\Delta T_{cd})}{\Delta T_{cd}} + \frac{\Delta e_{echan}}{e_{echan}} + \frac{\Delta(\Delta T_{bc})}{\Delta T_{bc}} + \frac{\Delta e_{cuivre}}{e_{cuivre}} \quad (V.19)$$

	e _{échan} (m)	e _{cuivre} (m)	ΔT _{cd} (°C)	ΔT _{bc} (°C)	λ _{cuivre} (wm ⁻¹ k ⁻¹)
	5,4E-02	4,0E-04	2	8	380
	5,2E-02	4,5E-04	3	9	379,5
	5,4E-02	5,0E-04	2	8	381,5
	5,0E-02	5,5E-04	1	10	386
	5,0E-02	4,0E-04	2	8	382,2
	5,2E-02	4,5E-04	3	9	384
	4,9E-02	5,5E-04	2	8	378,9
	5,1E-02	4,0E-04	2	9	380
Moyenne	5,9E-02	4,6E-04	2,13	8,63	381,51
Ecart type (incertitude type individuelle)	2,3E-06	2,8E-09	1,9E-01	3,9E-01	3,6696191
Ecart type sur la moyenne (incertitude type sur la valeur moyenne)	2,8E-07	3,5E-10	2,4E-02	4,9E-02	4,6E-01

Tableau V.I : calcul d'écart type et écart type sur la moyenne

Numériquement, on obtient :

$$\Delta\lambda_{app} = 0.03 \text{ wm}^{-1}\text{k}^{-1}$$

Approximativement, l'erreur sur la conductivité thermique est de 4%

V.5.MODELES DE PREDICTION ANALYTIQUES DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE

Dans le chapitre IV, nous avons vu que la conductivité thermique apparente dans les milieux poreux est généralement déterminée par voie expérimentale ou à l'aide de modèles analytiques de prédiction établis à partir des différentes approches comme la résolution de l'équation de chaleur, et l'analogie électrique.

Les modèles que nous présenterons appartiennent aux milieux granulaires diphasiques. La phase solide représentée par l'ensemble des granulats et le liant. D'autre part, la phase fluide est représentée simplement par de l'air.

En général, il existe un encadrement de cette conductivité apparente par une limite supérieure matérialisée par un milieu en strate parallèle et une limite inférieure sous forme d'un milieu en strate en série.

$$\lambda_{série} < \lambda_{app} < \lambda_{parallèle} \quad (V.20)$$

V.5.1. Modèles parallèle et série

Dans le modèle parallèle, l'orientation des strates par rapport à la direction du flux de chaleur est parallèle. Par contre, le modèle série correspond à un milieu où le flux de chaleur est perpendiculaire aux strates Figure V.15

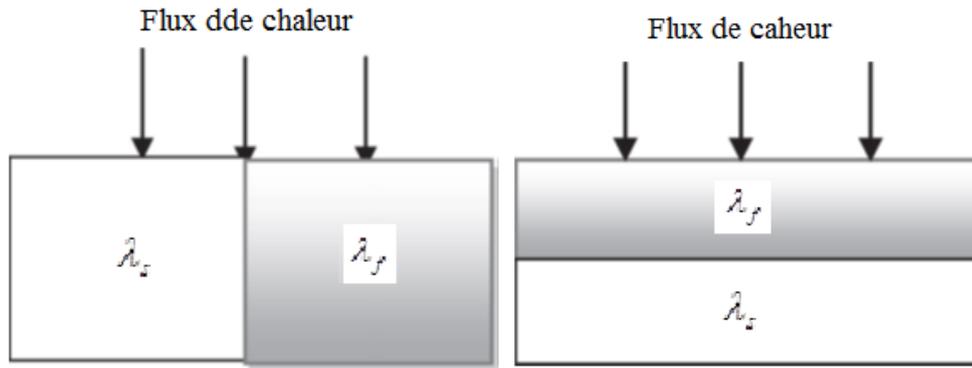


Figure V.15 : Modèle parallèle et série

La conductivité thermique apparente du milieu s'écrit

$$\lambda_{série} = \frac{1}{\frac{\varepsilon}{\lambda_f} + \frac{\alpha}{\lambda_s}} \quad (V.21)$$

$$\lambda_{parallèle} = \alpha\lambda_s + \varepsilon\lambda_f \quad (V.22)$$

V.5.2 Modèle de Hashin-Shtrikman

Ce modèle calcule les bornes inférieure et supérieure de la conductivité thermique apparente d'un matériau biphasé. Ces bornes sont plus restrictives que celle données par les modèles série et parallèle. Les équations (V.23 et V.24) donnent respectivement les bornes inférieure et supérieure de la conductivité apparente. [51]

$$\frac{\lambda_{app.min}}{\lambda_f} = \frac{\lambda_s}{\lambda_f} + \frac{\varepsilon}{\frac{1}{1 - \frac{\lambda_s}{\lambda_f}} + \frac{\alpha}{3 \frac{\lambda_s}{\lambda_f}}} \quad (V.23)$$

$$\frac{\lambda_{app.max}}{\lambda_f} = 1 + \frac{\alpha}{\frac{1}{\frac{\lambda_s}{\lambda_f} - 1} + \frac{\varepsilon}{3\lambda_f}} \quad (V.24)$$

V.5.3. Modèle de Krischer

Le matériau est formé de deux ensembles de plaques en série et en parallèle. C'est une juxtaposition du modèle en série et du modèle parallèle, figure V.16. La conductivité thermique est une fonction de deux conductivités série $\lambda_{série}$ et parallèle $\lambda_{parallèle}$. Les trois strates sont en série par rapport à la direction du flux thermique. [52]

n_{kr} représente la part de disposition en parallèle et $(1 - n_{kr})$ celle de la disposition en série.

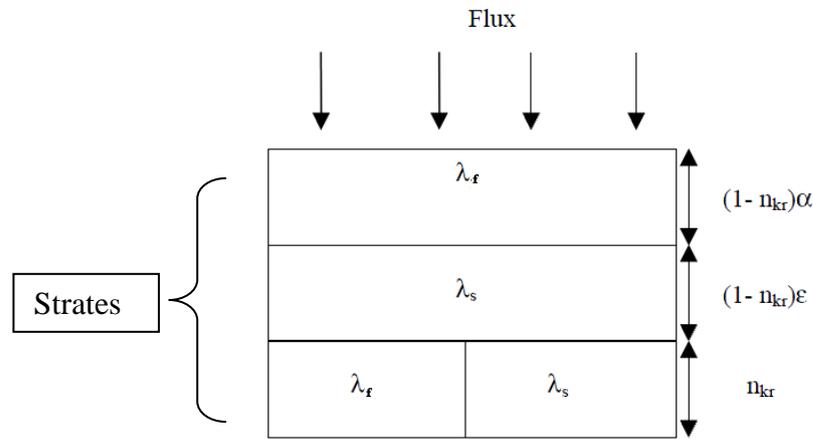


Figure V.16 : Représentation du modèle de Krischer

$$\lambda_{app} = \frac{\lambda_{série} \lambda_{parallèle}}{n_{kr} \lambda_{série} + (1 - n_{kr}) \lambda_{parallèle}} \quad (V.25)$$

V.5.4. Modèle de Willy et Soutwik

Ce modèle part du même principe que celui du modèle de Krischer. La direction du flux de chaleur est parallèle par rapport aux trois strates. Figure V.17 [53].

La part de disposition en série sera notée (n_w) et celle de la disposition en parallèle ($1 - n_w$).

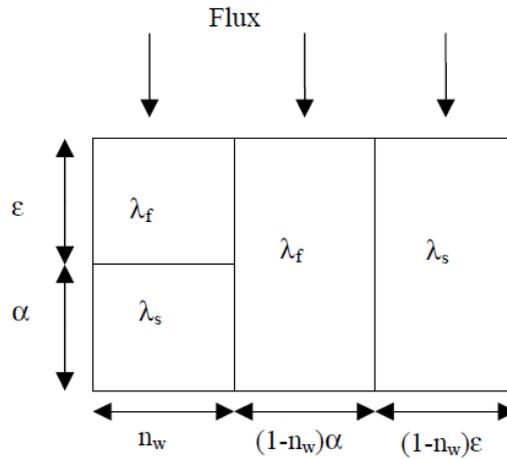


Figure V.17 : Représentation du modèle Willy et Soutwick

$$\lambda_{app} = \frac{n_w \lambda_s}{\varepsilon \frac{\lambda_s}{\lambda_f} + \alpha} + (1 - n_w)(\alpha \lambda_s + \varepsilon \lambda_f) \quad (V.26)$$

V.5.5. Modèle de Maxwell

Maxwell suppose que le milieu granulaire est constitué de plusieurs particules sphériques noyées dans une phase fluide [54,55], constitué d'une phase continue et de particules sphériques non poreuses (Figure V.18). Ce modèle de calcul concerne les milieux granulaires de forte porosité. Les particules sont séparées d'une distance et il n'y pas d'interaction mutuelle entre deux particules, par conséquent le milieu est fortement dilaté (pas de contact entre les particules). [39]

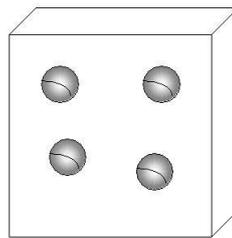


Figure V.18 : Modèle de Maxwell avec inclusions sphériques.

La densité de flux de chaleur dans le milieu s'écrit :

$$(q) = \varepsilon (q_f)^f + \alpha (q_s)^s \quad (V.27)$$

Avec

$(q_f)^f$: La moyenne intrinsèque des densités de flux de chaleur (phase fluide)

$(q_s)^s$: La moyenne intrinsèque des densités de flux de chaleur (phase solide) :

$$(q_s)^s = \frac{1}{V_s} \int_{V_s} (-\lambda_s \nabla T_s) dV = -\lambda_s \langle \nabla T_s \rangle^s \quad (V.28)$$

$$(q_f)^f = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} (-\lambda_f \nabla T_f) dV = -\lambda_f \langle \nabla T_f \rangle^f \quad (V.329)$$

La densité de flux de chaleur moyenne peut être exprimée en fonction de la conductivité thermique apparente du milieu :

$$\langle q \rangle = -\lambda_{app} \left[\varepsilon \langle \nabla T_f \rangle^f + \alpha \langle \nabla T_s \rangle^s \right] \quad (V.30)$$

L'expression de la conductivité thermique du milieu donnée par Maxwell :

$$\lambda_{app} = \frac{\varepsilon \lambda_f (2\lambda_f + \lambda_s) + 3\alpha \lambda_s \lambda_f}{\varepsilon (2\lambda_f + \lambda_s) + 3\alpha \lambda_f} \quad (V.31)$$

V.5.6. Modèle mixte série parallèle

C'est un modèle qui s'inspire des modèles de Krischer et Willy et Soutwick On considère que la part de la disposition en parallèle sera notée θ et celle de la disposition en série $(1-\theta)$. La valeur de θ est telle que la conductivité thermique du modèle ainsi réalisé, exprimé par la relation (V.32), soit égale à la conductivité thermique apparente mesurée λ_m .

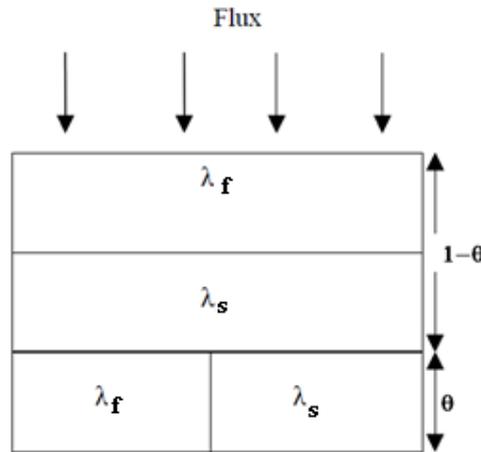


Figure V.19 : Représentation du modèle mixte série-parallèle

$$\lambda_{app} = \frac{\lambda_{série} \lambda_{parallèle}}{\theta \lambda_{série} + (1-\theta) \lambda_{parallèle}} \quad (V.32)$$

$$\theta = \frac{\lambda_{parallèle} (\lambda_m - \lambda_{série})}{\lambda_m (\lambda_{parallèle} - \lambda_{série})} \quad (V.33)$$

V.6. CONCLUSION

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté d'une manière générale la métrologie thermique de quelques méthodes de mesures de la conductivité thermique suivant leur régime thermique.

Pour le régime stationnaire on utilise la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode des boîtes

Pour le régime instationnaire, on utilise la méthode du fil chaud et la méthode flash.

La nature du milieu solide ou liquide à caractériser et les moyens disponibles sont souvent les facteurs importants à prendre en considération pour le choix d'une technique de mesure.

La deuxième partie de ce chapitre a été consacrée à notre dispositif de mesure de la conductivité thermique dont les principes de fonctionnement et de mesure ont été présentés en détail.

Dans une troisième partie, nous avons exposé quelques modèles de prédiction bi-phasique de la conductivité thermique apparente issus de différentes approches.

Chapitre VI

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATION

VI.1. INTRODUCTION

Dans le chapitre IV, nous avons conclu que l'établissement des relations qui expriment la conductivité thermique apparente en fonction de paramètres macroscopiques est très complexe et exige des connaissances pertinentes du milieu étudié.

Cette difficulté à déterminer la conductivité thermique apparente dans les milieux poreux est généralement résolue par la voie expérimentale ou à l'aide de modèles analytiques de prédiction établis à partir de différentes approches comme la prise de moyenne et analogie électrique.

Une comparaison des résultats expérimentaux et théoriques issus des modèles analytiques, nous a permis de valider nos résultats expérimentaux.

Essentiellement, ce chapitre est consacré à la présentation et interprétation des résultats expérimentaux et d'explicitier l'effet des différents caractéristiques qui peuvent influencer la conductivité thermique apparente comme par exemple, la masse volumique, la porosité et la résistance à la compression qui présente un critère important pour les matériaux de construction. Il existe une relation très étroite entre la conductivité thermique, la résistance mécanique et les agrégats constituants majoritaires dans la confection du béton.

VI.2. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATION

Les figures VI.1 à VI.4 représentent l'évolution de la conductivité thermique apparente λ mesurée et calculée par les modèles série, parallèle, le modèle mixte et celui de Hashin et Shtrikman, pour quelques valeurs types de la conductivité de la phase solide. Nous constatons que la conductivité diminue quand la porosité augmente.

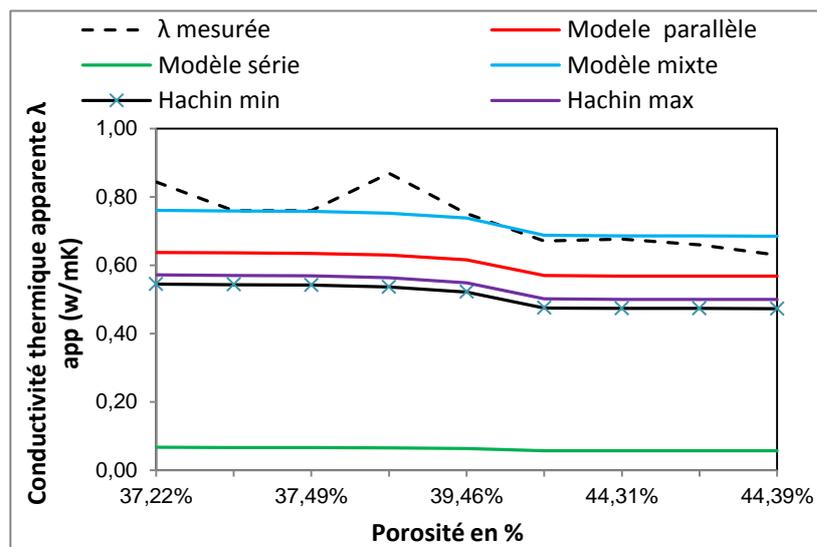


Figure VI.1 : L'évolution de la conductivité thermique apparente λ mesurée et calculée par les modèles série, parallèle, le modèle mixte et celui de Hashin et Shtrikman, en fonction de la porosité des bétons pour ($\lambda_s = 1 \text{ W/mK}$)

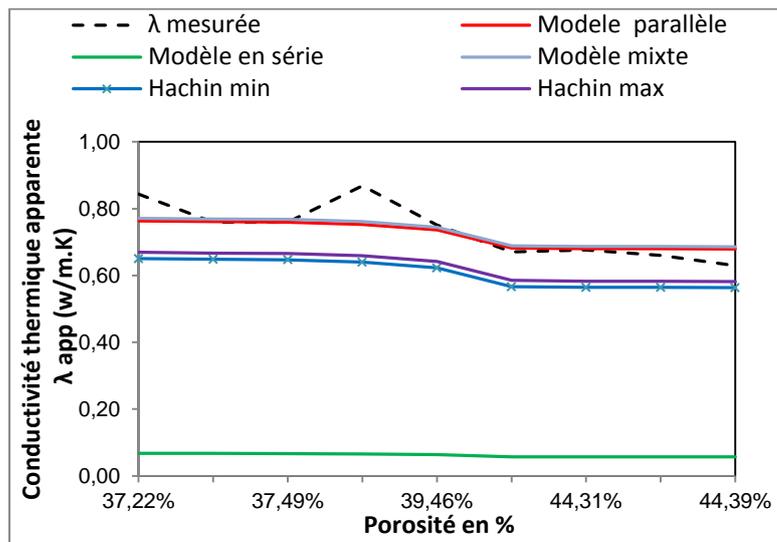


Figure VI.2 : L'évolution de la conductivité thermique apparente λ mesurée et calculée par les modèles série, parallèle, le modèle mixte et celui de Hashin et Shtrikman, en fonction de la porosité des bétons pour ($\lambda_s = 1,2 \text{ w/mk}$)

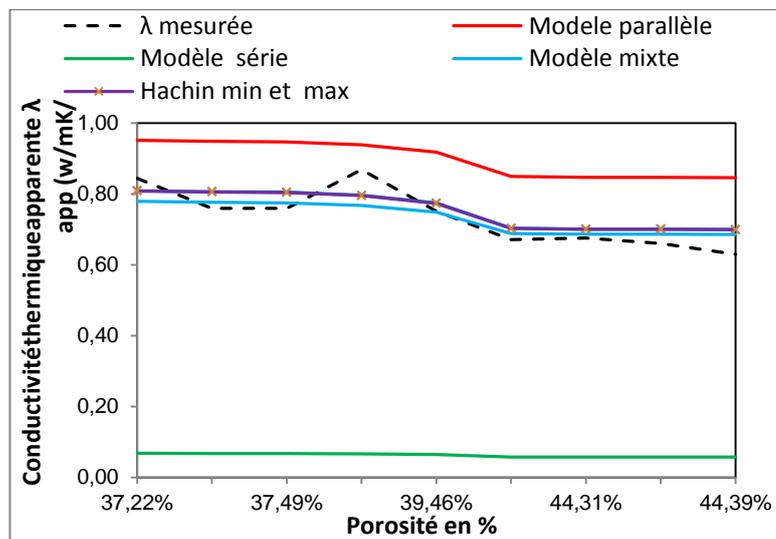


Figure VI.3 : L'évolution de la conductivité thermique apparente λ mesurée et calculée par les modèles série, parallèle, le modèle mixte et celui de Hashin et Shtrikman, en fonction de la porosité des bétons pour ($\lambda_s = 1,5 \text{ w/mk}$)

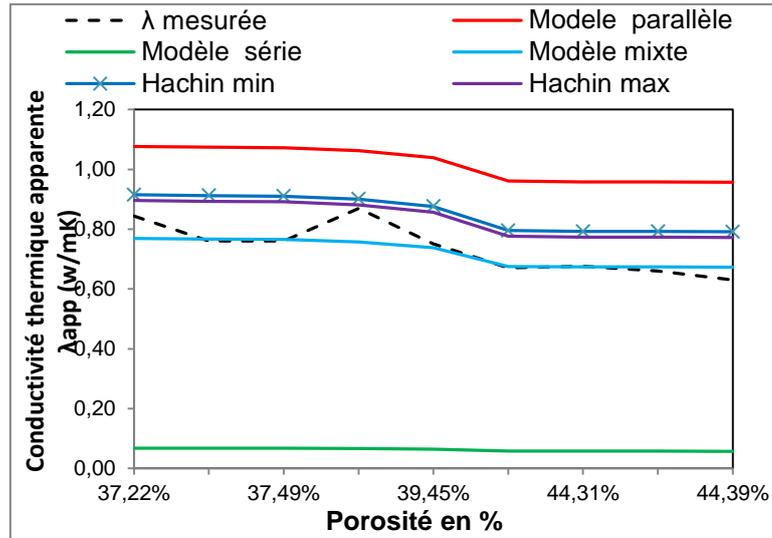


Figure VI.4 : L'évolution de la conductivité thermique apparente λ mesurée et calculée par les modèles série, parallèle, le modèle mixte et celui de Hashin et Shtrikman, en fonction de la porosité des bétons pour ($\lambda_s = 1,7 \text{ w/mk}$)

On remarque que dans la figure VI.2 et la figure VI.4, la conductivité thermique mesurée et celle du modèle mixte, est toujours comprise entre les conductivités thermiques des modèles série et parallèle. Nous observons que pour la valeur de la conductivité de la phase solide $\lambda_s = 1 \text{ W/m K}$, (figure VI.1), les valeurs de la conductivité thermique mesurée et celle du modèle mixte se trouvent pratiquement à l'extérieur des limites des modèles série et parallèle. Les résultats obtenus du modèle mixte et les valeurs mesurées, aboutissent à une bonne concordance et ce pour toutes les valeurs de la conductivité de la phase solide. Ce résultat est la conséquence directe du calage expérimental qui fait en sorte que ce modèle dépend fortement de la qualité des mesures.

Sur la figure VI.3, les valeurs théoriques du modèle mixte et du modèle de hashin sont en concordance avec les valeurs expérimentales. En plus, les résultats obtenus se trouvent entre les valeurs extrêmes des modèles série et parallèle.

Dans la figure VI.4, L'écart entre les limites des modèles série et parallèle est trop important pour une modélisation prédictive de la conduction thermique. Cela veut dire que la phase solide impose la conductivité totale. Le modèle de Hashin qui présente des limites supérieure et inférieure les plus restrictives ne donne pas le résultat escompté puisque ces valeurs limites se sont inversées pour la valeur de la conductivité thermique de la phase solide $\lambda_s = 1.7 \text{ W/m K}$.

La figure VI.3, présente les résultats les plus logiques pour une prédiction de la conductivité thermique apparente et la déduction de la valeur de la conductivité de la phase solide. La conductivité thermique d'un milieu consolidé dépend étroitement de la conductivité thermique de

la phase solide. La mesure de la conductivité de la phase solide, est un obstacle sérieux du point de vu expérimental.

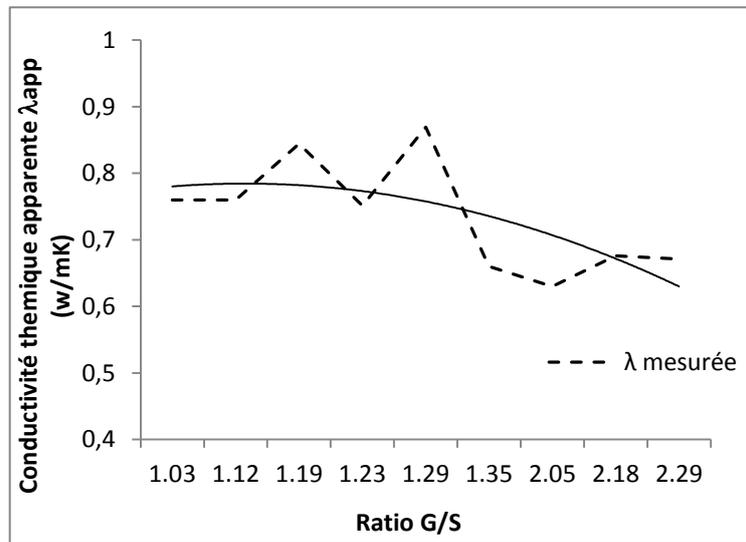


Figure VI.5 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée en fonction du rapport gravier /sable (G/S).

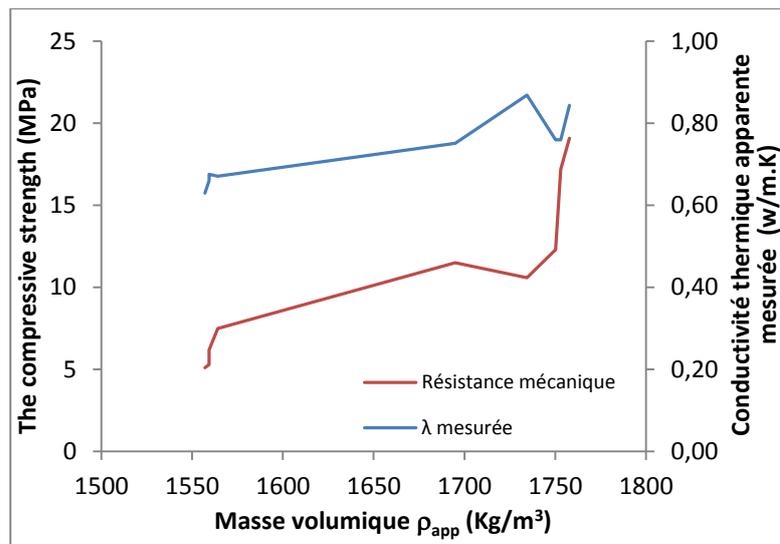


Figure VI.6 : La variation de la conductivité thermique et de la résistance mécanique en fonction de la masse volumique apparente du béton.

La figure VI.5, montre l'évolution de la conductivité thermique mesurée en fonction du rapport Granulat/Sable ; G/S. Nous pouvons observer sur la figure que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation du rapport G/S, La même observation a été faite par [56], .quand le volume d'agrégats augmente, la densité et la conductivité thermique diminuent. .Malheureusement, d'après la figure III.8 (voir chapitre III), l'augmentation du rapport G/S entraîne une diminution de la résistance de compression. La conductivité thermique et la résistance mécanique varient toutes les deux en diminution par rapport à l'augmentation du rapport G/S. L'augmentation du rapport G/S

signifie l'augmentation du pourcentage de l'ensemble des agrégats légers utilisés. Ces agrégats représentent le plus grand pourcentage par rapport au volume total du béton et qui pourrait directement ou indirectement influer sur la valeur de la conductivité thermique [57]. Aussi, leur structure poreuse qui emprisonne de l'air donne une conductivité plus faible.

Par ailleurs, la figure VI.6 montre que l'augmentation de la masse volumique conduit à l'augmentation de la conductivité thermique et de la résistance mécanique [58]. Nous constatons également que la densité des agrégats légers est souvent le principal critère pour évaluer la qualité et l'influence sur les propriétés du béton de granulats légers. [59]

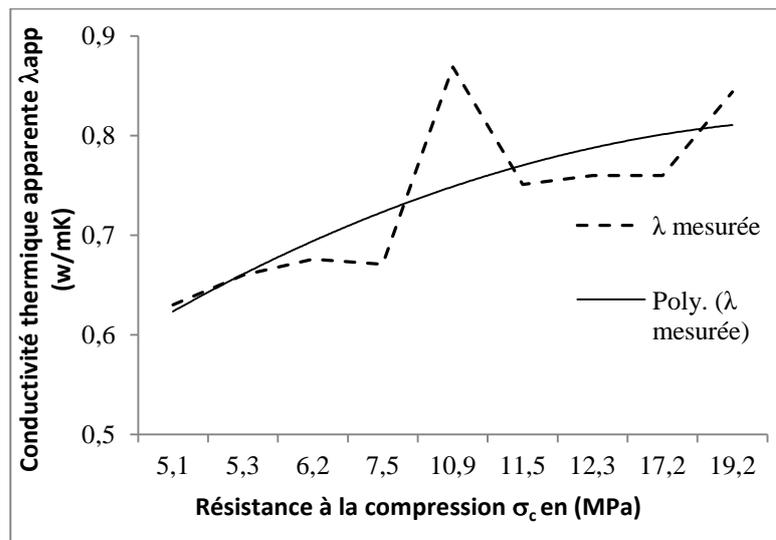


Figure VI.7 : La variation de la conductivité thermique en fonction de la résistance à la compression des bétons.

Le tracé de la figure VI.7 représente l'évolution de la conductivité thermique mesurée en fonction de la résistance à la compression. On observe aisément, que la conductivité thermique augmente lorsque la contrainte mécanique augmente. C'est une problématique qui peut faire obstacle lors de la préparation d'une formulation de béton avec agrégats légers. Un critère de choix du domaine des matériaux allégés pour lequel les bétons légers peuvent être utilisés comme isolants thermiques ou comme isolants porteurs.

Il existe des bétons légers à haute résistance à la compression fabriqués à partir des granulats légers qui ont pour origine l'argile ou les cendres volantes. D'autres formulations sont réalisées par des granulats ayant une très grande porosité comme le béton à perlite expansée, ou le béton cellulaire qui sont de très bons isolants thermiques mais moins résistants. Pour notre béton de pouzzolane et suivant les résultats expérimentaux obtenus de la résistance à la compression, nous pouvons le classer comme étant un béton à résistance modérée. Les tableaux VI.1 et VI.2 présentent un classement des bétons légers selon [60,61].

Sur la base du classement des bétons légers établi par [49,50], nous avons essayé de situer notre matériau vis-à-vis de sa résistance à la compression, de sa masse volumique et de sa conductivité thermique. Le résultat est présenté sur le tableau VI.3.

Classe de béton	Masse volumique (Kg/m ³)	Résistance à la compression (MPa)	Conductivité thermique (W/m.K)
Isolation thermique	800 à 1200	>5	0,3 <λ<0,6
Isolation Thermique et porteur	1000 à 1400	>10	<0,8
Structure	1300 à 1800	>20	
Structure haute résistance	1500 à 1800	>30	

Tableau VI.1 ; Classification des bétons légers selon [49]

Classification	Masse volumique (Kg/m ³)	Résistance à la compression (MPa)
Bétons légers de structure	1350 à 1900	>17
Bétons légers de résistance modérée	800 à 1350	7 à 17
Bétons de faible densité	300 à 800	<7

Tableau VI.2 : Classification des bétons légers selon [50]

Désignations	Classe de béton	Masse volumique (Kg/m ³)	Résistance à la compression (MPa)	Conductivité thermique (W/m.K)
BPZ3	Isolation Thermique	1500 -1600	5-8	<0,70
BGPZ3/3				
BGPZ2/3				
BGPZ1/3				
BPZ1	Isolation Thermique et structure	1600-1800	11-19	0,75-0,86
BPZ2				
BGPZ3				
BGPZ2				
BGPZ1				

Tableau VI.3 : Classification des différentes formulations du béton de pouzzolane de Béni-Saf

Des essais de mesure de la conductivité thermique apparente ont été effectués sur des échantillons de dimension 27*27*4 cm, fabriqués à partir de la formulation type BPZ1, en ajoutant un pourcentage en poids de 0,5% à 1% des matériaux comme le polystyrène, la paille et la suie. Les résultats de mesures obtenus sont représentés dans le tableau VI.4.

Désignation	Conductivité thermique apparente (W/m.K)		
	Polystyrène	Paille	Suie
BPZ1 (1%)	0,38	0,38	0,34
BPZ1 (0,5%)	0,38	0,42	0,38

Tableau VI.4 : Conductivité thermique apparente de la formulation BPZ1 avec ajouts

Nous constatons sur le tableau VI.4, que la conductivité thermique a diminué à hauteur de 50% par rapport à la valeur de la formulation de BPZ1 sans ajouts. En revenant à la figure VI.7 où une diminution de la conductivité thermique entraîne une diminution de la résistance à la compression. C'est une adéquation qu'il faut respecter lors de la confection des bétons légers.

VI.3 CONCLUSION

La confrontation des résultats expérimentaux et la prédiction de la conductivité thermique apparente par des calculs analytiques à l'aide des modèles théoriques a démontré que : Les valeurs mesurées et les valeurs des modèles de la conductivité thermique sont inversement proportionnelles à la porosité.

La conductivité de la phase solide influe sur la conductivité thermique apparente, Plus, on augmente la valeur introduite de la conductivité du solide, plus l'écart entre le modèle parallèle et le modèle série devient important surtout par rapport aux résultats de la figure VI.4

Le modèle de Hashin avec ces limites les plus restrictives, les valeurs mesurées de la conductivité thermique devraient être comprises entre les deux bornes supérieure et inférieure du modèle. Pour $\lambda_s = 1 \text{ w/mK}$ et $1,2 \text{ w/mK}$, ces valeurs sont au-dessous des valeurs mesurées et s'inversent pour $\lambda_s = 1,7$. L'explication de ces résultats est l'hypothèse de base de ce modèle ou la borne inférieure de la conductivité correspond au cas où l'inclusion possède des propriétés thermiques supérieures à celles de la matrice et inversement pour la borne supérieure. .

La figure VI.3, présente les résultats les plus logiques pour une prédiction de la conductivité thermique apparente et la déduction de la valeur de la conductivité de la phase solide.

Les valeurs mesurées se trouvent à l'intérieur de l'intervalle des limites parallèle et série. Les résultats du modèle mixte et du modèle de Hashin, sont en concordance, sachant que les bornes du modèle de Hashin sont confondues.

Les résultats présentés par les figures VI.5, VI.6 et VI.7, montrent qu'il faut impérativement bien mettre en place une adéquation entre le rapport G/S, la masse volumique et la contrainte à la compression avec la conductivité thermique apparente afin de définir le rôle et la destination d'un matériau léger dans la construction de l'habitat.

D'après les résultats que nous avons obtenus avec les différentes compositions de béton, on peut envisager diverses possibilités d'utilisation. Ces bétons donnent une isolation thermique remarquable pour les différents dosages en ciment choisis. Pour les dosages de 350 et 300 kg/m³ on pourra utiliser le béton en tant qu'élément de structure.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Jusqu'à présent en Algérie, L'utilisation de la pouzzolane naturelle qui est un matériau d'origine volcanique s'est réduite à sa transformation sous forme de poudre pour devenir un ajout cimentaire à cause de son aptitude à réagir avec la chaux pour former un bon liant qui donnera des bétons assez résistants.

A l'issue d'essais expérimentaux, l'objectif majeur dans cette étude est l'éventuelle substitution des matériaux granulaires usuels utilisés dans la confection du béton par un matériau à base de granulats légers de la pouzzolane naturelle. L'accent a été mis sur l'influence du dosage en granulats, les différents dosages en ciment de type CPJ CEM II / A 42,5 , l'ajout du sable de carrière et le mode de conservation qui est dans notre cas l'air ambiant. .

Au cours de nos travaux, nous avons cherché à mettre expérimentalement en évidence l'effet de ce matériau sur les différentes formulations de béton de pouzzolane et ce, du point de vue résistance mécanique et thermique.

L'analyse chimique montre que notre pouzzolane présente un pourcentage en silice plus important que les autres composants chimiques élémentaires, sa teneur en verre est assez appréciable.

Du point de vue minéralogique, la pouzzolane de Béni-Saf présente un caractère amorphe de ces différents minéraux qui le constitue. Cette cristallisation permet de réagir avec la chaux en présence d'humidité donnera des produits de construction dotés de structure résistante.

L'étude granulométrique et l'aspect physique des granulats de la pouzzolane, montrent que Les classes granulaires 3/8 et 8/16 présentent des masses volumiques absolues égales à 1800 Kg/m^3 , donc ce sont des granulats légers. Leur forme ronde et ramassée facilitera la mise en œuvre du béton de pouzzolane qui donneront certainement des matériaux de construction plus légers vu leur masses volumiques. La structure est poreuse, constituée de pores assez rapprochés les uns des autres qui pourront favoriser l'isolation thermique.

Théoriquement, les différentes proportions des quatre principaux composants du béton de pouzzolane (gravillons, sable, ciment et eau), ont été déterminées par la méthode de formulation Dreux et Goriss et expérimentalement après plusieurs essais et corrections. Une des qualités recherchée est la légèreté des bétons confectionnés. Pour les différents dosages en ciment choisis, les masses volumiques apparentes des bétons formulés sont inférieures à 1800 kg/m^3 , dans l'ensemble, notre matériau répond à la définition de béton léger.

Durant l'étude mécanique nous avons constaté que le dosage en ciment de 250 kg/m^3 présente un impact très important sur la masse volumique apparente. Les bétons BPZ3, BGPZ3 et BGPZ3/3, ont des masses volumiques inférieures à 1600 kg/m^3 . Ce résultat est peut-être dû au mélange des différents matériaux (ciment+sable+granulats), l'ensemble forme une matrice solide présentant des vides intra granulaires plus importants que les autres formulations.

La résistance à la compression augmente pour toutes les compositions des bétons à différents âges, et croit aussi en fonction du dosage en ciment.

Les bétons qui sont composés seulement du sable de pouzzolane donnent des résistances assez faibles par rapport aux compositions avec sable de carrière.

La résistance à la compression diminue quand la porosité augmente. La composition BGPZ1 a donné les plus grandes valeurs de la résistance à la compression et qui correspond à un rapport G/S optimum égale à 1.19. Ce résultat peut être traduit par l'influence du dosage en ciment qui est de 350 kg/m^3 , une faible porosité apparente et l'utilisation de sable de carrière.

Avant d'entamer les mesures de la conductivité thermique apparente, nous avons jugés opportun d'exposer le phénomène de transfert de chaleur par conduction dans les milieux poreux puisque nous considérons notre matériau comme un milieu poreux sur lequel on applique quelques modèles de prédictions de la conductivité thermique issus de la démarche de la macroscopisation qui passe par la méthode de prise de moyenne volumique qui permet le passage de la petite échelle des équations de transfert définies localement vers des équations macroscopiques par lesquelles apparait le gradient des grandeurs moyennes et les intégrales inter-faciales :

Première étape : Écriture des lois de transfert dans un milieu diphasique et conditions aux limites aux interfaces des phases en présence

Deuxième étape : Obtention des champs des variables et densités de flux macroscopiques par prise de moyenne spatiale.

Troisième étape : représente la fermeture qui cherche une relation de fermeture qui donnera une reformulation des équations, en fonction de variables macroscopiques.

Nous avons constaté que l'utilisation de cette méthode pour établir des relations qui expriment la conductivité thermique apparente en fonction de paramètres macroscopiques est très complexe, et exige des connaissances sur la description morphologique d'un échantillon (VER) par imagerie haute résolution du milieu poreux au niveau microscopique donnant une connaissance réelle de l'espace géométrique poral. A cause de la complexité du phénomène,

la conductivité thermique apparente est généralement déterminée par voie expérimentale ou à l'aide de modèles analytiques de prédiction établi à partir de différentes approches comme la prise de moyenne, la statistique et l'analogie électrique.

Les mesures thermiques expérimentales se rapportent seulement sur la conductivité. La nature du milieu solide ou liquide à caractériser et les moyens disponibles sont souvent les facteurs importants à prendre en considération pour le choix d'une technique de mesure. Dans notre cas, nous avons mis au point un dispositif de mesures qui a été adapté sur la technique de la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode des boites. Les résultats obtenus présentent des incertitudes relatives de 4%.

La confrontation des résultats expérimentaux et la prédiction de la conductivité thermique apparente par des calculs analytiques à l'aide des modèles théoriques a montré que :

Les valeurs mesurées et les valeurs des modèles de la conductivité thermique sont inversement proportionnelles à la porosité.

La conductivité de la phase solide influe sur la conductivité thermique apparente, Plus on augmente la valeur introduite de la conductivité du solide plus l'écart entre le modèle parallèle et le modèle série devient important.

Le modèle de Hashin avec ces limites les plus restrictives, les valeurs mesurées de la conductivité thermique devraient être comprises entre les deux bornes supérieure et inférieure du modèle. Pour $\lambda_s = 1 \text{ w/mK}$ et $1,2 \text{ w/mK}$, ces valeurs sont au-dessous des valeurs mesurées et s'inversent pour $\lambda_s = 1,7$. L'explication de ces résultats est l'hypothèse de base de ce modèle ou la borne inférieure de la conductivité correspond au cas où l'inclusion possède des propriétés thermiques supérieures à celles de la matrice et inversement pour la borne supérieure. .

Nous avons pu mettre en évidence que lorsque les valeurs mesurées se trouvent à l'intérieur de l'intervalle des limites parallèle et série, et que les valeurs du modèle mixte et le modèle de Hashin sont en concordance avec les valeurs expérimentales ; on peut déduire la valeur de la conductivité de la phase solide.

Les résultats montrent qu'il faut impérativement bien mettre en place une adéquation entre le rapport G/S, la masse volumique et la contrainte à la compression avec la conductivité thermique apparente afin de définir le rôle et la destination d'un matériau léger dans la construction de l'habitat.

D'après les résultats que nous avons obtenus avec les différentes compositions de béton, on peut envisager diverses possibilités d'utilisation. Ces bétons donnent une isolation

thermique remarquable pour les différents dosages en ciment choisis. Pour les dosages de 350 et 300 kg/m³, on pourra utiliser le béton en tant qu'élément de structure.

Cette étude a été menée dans le but de la valorisation du gisement de la pouzzolane de Bou Hamidi de la région de Béni-Saf. Son utilisation sous forme de poudre comme ajouts cimentaire qui est déjà réalisée pour la fabrication du ciment en Algérie. Aussi, les granulats de cette pouzzolane peuvent éventuellement être utilisés pour la confection des matériaux de construction légers pour le bâtiment, qui rempliront facilement la fonction d'isolation thermique dans le cadre d'une climatisation passive.

REFERENCES BIBLIOGRPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Damfeu, J. C., P. Meukam, and Y. Jannot, "Modeling and estimation of the thermal properties of clusters aggregates for construction materials: The case of clusters aggregates of lateritic soil, sand and pouzzolan." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 102, 407.
- [2] Baron J. et Olivier J. P., *Les bétons: bases et données pour leur formulation*, EYROLLES Ed. Paris, 1999,
- [3] Dron, R., et Brivot . F. Bases minéralogiques de sélection des pouzzolanes. *Bulletin du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, n° 92: novembre-décembre. p. 105-112, 1977
- [4] N Belas Belarbi, M Semcha, L Laoufi « Influence de la pouzzolane de Beni-saf sur les caractéristiques mécaniques des bétons » *Canadian Journal of Civil Engineering* 30 no3 580-584 2003 canada.
- [5] J.Millet, R.Homme, F.Brivot, dosage de la phase vitreuse dans les matériaux pouzzolaniques, *bulletin liaison labo. P. et ch*, 92, p101-104], nov-déc 1977
- [6] N. Kaid, M. Cyr, H. Khelafi, N. Goufi, caractéristiques mécaniques de bétons contenant une pouzzolane naturelle face aux attaques à l'eau de mer et aux sulfate, 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009
- [7] M Popov, L Zakrevskaya, V Vaganov, S Hempel and V Mechtcherine Performance of Lightweight Concrete based on Granulated Foamglass, 2nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2015, **96**, 1.
- [8] P. Cormon, *béton légers d'aujourd'hui*, collection U.T.I, Edition Eyrolles, Paris 1975.
- [9] Normes algériennes Ciment – conditions générales des essais chimiques, NA-237 2005 5 p et NA-5042 (norme enregistrée) 2 ème Edition 2000 24 p (Edition et diffusion IANOR)
- [10] Massaza F, *chimie des additions pouzzolaniques et ciments mélangés*, II cemento, 73, vol 1, p 3-38, 1976
- [11] Barret, P., D. Menetrier, and B. Cottin. "Study of silica-lime solution reactions." *Cement and Concrete Research* 7.1 1977: 61-67., 1977
- [12] Leveau J.; Ranaivo Rabehaja. B. ; Menguy G. ; Ezbakhe H. ; Caractérisation thermique de bétons de pouzzolane utilisés dans le bâtiment, journées internationales de thermique. 1987, pp. 534-542
- [13] Afnor P18-451 «Béton –Essai de compression », Paris 1988.
- [14] Massaza F, *chimie des additions pouzzolaniques et ciments mélangés*, II cemento, 1976, 73, vol 1, p 3-38
- [15] Barret P, Menetrier D, Cottin B, study of silicate lime solution reaction. *Cement and concrete research*, n° 07, p 61-67
- [16] Nguyen L.H, Béton de Structure à Propriétés d'Isolation Thermique améliorées: Approche Expérimentale et Modélisation numérique. PhD Dissertation, 2013, Université de Cergy-Pontoise France

- [17] J.P. Laurent, la conductivité thermique à sec des bétons cellulaires autoclavés :un modèle conceptuel, materials and structures, 1991, pp 221-226 24
- [18] Ahmad Hadi, Saeid Baghshahi, Rahmatolah Emadi and Shirin Naghavi, Different Pore Size Alumina Foams and Study of their Physical and Mechanical Properties, Proceedings of The 2011 IAJC-ISAM International Conference ISBN 978-1-60643-379-9
- [19] Chen, H. J., Huang, C. H., & Kao, Z. Y. Experimental Investigation on Steel-Concrete Bond in Lightweight and Normal Weight Concrete. Structural Engineering and Mechanics, 2004, **17**(2), 141.
- [20] AFNOR, Rrecueil de normes françaises, bâtiment et génie civil, granulats, 1992 -.France
- [21] R. Olives, Transfert thermique dans une matrice de graphite poreuse, consolidée et anisotrope, support d'un solide actif pour procédés énergétiques, thèse de doctorat, perpignan 1999
- [22] Russell H.W., "Principles of heat flow in porous insulation." J. Am. Ceram.Soc. (USA), 18 1-5 (1935)
- [23] P. Meukam, A. Noumowe , Y. Jannot et R. Duval « Caractérisation thermophysique et mécanique de briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiment » materials and Structures, vol. 36, August-September 2003, pp 453-460
- [24] Siegel, Robert, and John R. Howell, "Thermal Radiation Heat Transfer, McGraw 1972, Hill." New York.
- [25] Biot 1972 M.A. Biot. Theory of finite deformations of porous solids. Indiana Univ.Math., vol. 21, pages 597–620, 1972
- [26] Whitaker. S. (1967). Diffusion and dispersion in porous media. AICHE J. 13, 420–427.
- [27] Marle, C. M. (1967). Ecoulements monophasiques en milieu poreux. pp. 1471–1509.
- [28] Slattery, Flow of viscoelastic fluid through porous media, A.I.Ch.E. J113, 106-1071 1967.
- [29] Whitaker S. Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: a theory of drying.] Advances in Heat Transfer, 13, 119-203. J. C., 1977
- [30] W. G. Gray, A derivation of the equations for multiphase transport, Chem. Engng Sci. 30,229-233 ,1975.
- [31] Jean-François Daian. Equilibre et transferts en milieux poreux,. 646 pages, 2013. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00452876v5>
- [32] Kaviany M., .Principles of heat transfer in porous media. Springer Verlag (1995).
- [33] Moyne, Christian, Batsale, Jean-Christophe, et Degiovanni, Alain. : Approche expérimentale et théorique de la conductivité thermique des milieux poreux humides II Théorie. *International journal of heat and mass transfer*, 1988, vol. 31, no 11, p. 2319-2330.
- [34] Guy B, A Mojtabi, M Prat,, M Quintard, transfert de chaleur dans les milieu poreux,, technique d'ingénieur,be8250,oct 2008

- [35] Salif Caye, caractérisation des propriétés mécaniques, acoustiques et thermiques de matériaux locaux de construction au Sénégal these de doctorat d'état en sciences mars 2001 Université Cheikh Anta Diop de Dakar,
- [36] B. Agoudjil, "Etude des propriétés thermophysiques et électriques de matériaux hétérogènes," Paris XII-val de Marne, 2006.
- [37] D.L.Balageas, Thermal diffusivity measurement by pulsed method, high temperatures-high pressures, Vol 21, 1984, pp 84-85
- [38] J.R Mumaw, Heat transmission measurements in thermal insulations, ASTM STP [544, American society for Testing and Materials, 1973, pp 193-211
- [39] M Filalli, Conductivité thermique apparente des milieux granulaires soumis à des contraintes mécaniques : modélisation et mesures, thèse de doctorat, institut national polytechnique de toulouse, 2006
- [40] Sébastien Gauthier Caractérisation thermique de la matière par la méthode 3w , thèse de doctorat Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2012. France
- [41] M. Siu and C. Bulik. National bureau of standards line-heat-source guarded-hotplate apparatus. Review of scientific instrument, 52(11) :1709_1716, 1981
- [42] ASTM C177 04. Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus. Annual book of ASTM Standards, 4 :21_42, 2008.
- [43] Ngohe-Ekam, P.S., Meukam, P., Menguy, G., Girard, P. Thermophysical characterisation of tropical wood used as building materials: With respect to the basal density ; Construction and Building Materials, Vol. 20, (2006)
- [44] Rapport d'essais, mesures de propriétés thermophysiques de liquides, THERMOCOONCEPT, TREFLE - ENSAM - 33405 Talence Cedex, 12/01/2007
- [45] X.Zhang, Métrologie par méthode quasi-instationnaire: modélisation, identification, et application à la caractérisation des solides, thèse de doctorat de l'INPL, 1993
- [46] H. M. Roder. A transient hot wire thermal conductivity apparatus for fluids. Journal of research of the National Bureau of Standards, 86(5) :458_480, 1981. 18, 20, 22
- [47] D.A. DE. Vries, A.J.Peck, on cylindrical probe method of measuring thermal conductivity with special reference to soils, Aust.j.phys, n°11,pp 225,271, 1958
- [48] B. Hay, J-R. Filtz, and J-C. Batsale. Mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash. Techniques de l'ingénieur, (R 2955).]
- [49] Yves Jannot, séminaire de formation à la Métrologie Thermique, Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMETA), Laboratoire d'Energie Appliquée (LEA), Dakar, 12-18 novembre 2008
- [50] Laurent Libessart, Sébastien Gavory, Evaluation des conductivités thermiques matériaux consistants des murs végétalisés, rapport bâti et biodiversité positive, mesures thermiques et essai sur place, 2014, 1-58 HEI, Groupe ISA-ITIAPE France.

- [51] Hashin, Z. & Shtrikman, S., A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials. J. Appl. Phys. 1962, 33,
- [52] D.Krischer, K.Kroll, technique de séchage, centre technique des industries aéronautiques et thermiques, traduction du springer-verlag, Berlin 1963.
- [53] M.R.J.Willey, A.R.Soutwick, J.Petrol.technol, vol 6, pp 44-, 1954
- [54] D.C.Maxwell,A treatise on electricity and magnetism, 3rd edh,vol1, et 2, chap, 9, vol 1, article 314, Dover,New York,1954
- [55] Flynn, D.R. Response of high performance concrete to fire conditions: Review of thermal property data and measurement techniques. Final report, NIST GCR 99- 767, 1999, 108 p.
- [56] Real, Sofia, and al, "Thermal Conductivity of Structural Lightweight Aggregate Concrete." Magazine of Concrete Research, 2016, 1
- [57] Chi JM, Huang R, Yang CC and Chang JJ (2003) Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete. Cement and Concrete Composites 25(2): 197–205.
- [58] S Gaye, F Niang, G Menguuy, G Sissoko, Thermal and mechanical characterisation of recycled polymer concrete ; journal des sciences, 1,1(2001) 53 – 66
- [59] Nguyen, L. H., et al, "Béton de Structure à Propriétés d'Isolation Thermique Améliorées: Approche Expérimentale.". XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011
- [60] RAHELIARILALAO-RANAIVO RABEHAJA, B. I. E. N. V. E. N. U. E. Etude des caractéristiques thermiques et mécaniques de bétons de pouzzolane. Diss. Paris 7, 1986.
- [61] ACI 213R-87, Guide for structural lightweight aggregate concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part I: Materials and General Properties of Concrete, Detroit,Michigan, 1994.

Résumé

La pouzzolane est une roche volcanique siliceuse à structure alvéolaire, dont les gisements existent un peu partout dans le monde. Actuellement, la poudre de pouzzolane est utilisée à concurrence de 15% à 21% dans la production du ciment.

Nos travaux ont porté essentiellement sur l'étude et l'analyse thermomécanique de ce matériau, suivi par l'expérimentation de différents échantillons de béton léger à différentes compositions et dosages en ciment.

La modélisation physico-mécanique et thermo-énergétique des milieux poreux est adoptée pour la prédiction de la conductivité thermique apparente. L'expérimentation des échantillons du béton léger à base de pouzzolane, soumis par la suite aux essais et sollicitations mécaniques de résistance, nous ont permis d'évaluer et d'apprécier les performances de ce matériau.

Les mesures expérimentales de la conductivité thermique apparente ont été réalisées sur l'ensemble des échantillons pour être confrontées aux valeurs théoriques.

L'utilisation de la pouzzolane dans les compositions du béton léger sous forme de granulats constitue l'essence du squelette granulaire de ce béton, qui lui offre une résistance mécanique conforme aux normes en vigueur.

Les résultats expérimentaux obtenus, montrent l'intérêt et les performances du béton léger à base pouzzolanique.

Désormais, ce matériau de construction jouit de qualités thermique et mécanique intéressantes. Son utilisation dans l'habitat et les ouvrages d'art offre des avantages appréciables à la fois économique, écologique, thermique, et énergétique.

Abstract

Pozzolan is a siliceous volcanic rock structure, alveolar, whose deposits exist almost everywhere in the world. Currently pozzolan powder is used to concurrence 15% to 21% in cement production.

Our work has focused mainly on the study and thermomechanical analysis of this material, followed by testing different samples of lightweight concrete with different compositions and cement dosages.

The physico-mechanical modeling and thermal energy of porous media is adopted for predicting the apparent thermal conductivity. The experiment samples of lightweight concrete based pozzolan, subsequently subjected to tests and mechanical stress resistance, has allowed us to evaluate and assess the performance of this material.

Experimental measurements of the apparent thermal conductivity were performed on all samples to be compared with the theoretical values.

The use of pozzolan in the compositions of lightweight concrete in the form of aggregates constitutes the essence of granular skeleton of the concrete, which gives it a mechanical strength conforms to standards

Experimental results show the value as well as the benefit and performance of lightweight concrete based pozzolan.

Now this building material has interesting thermal and mechanical properties. Its use in the habitat and engineering structures offer significant benefits to economic, ecological, thermal and energetic.

ملخص

البوزلان هو بنية صوانية البركاني الصخور، السنخية، التي توجد في كل مكان في العالم تقريبا الودائع. حاليا يستخدم مسحوق البوزلان لـ 15% إلى 21% في إنتاج الأسمنت.

عملنا ركزت أساسا على دراسة وتحليل الميكانيكية الحرارية من هذه المواد، تليها اختبارات على عينات مختلفة من الخرسانة خفيفة الوزن مع تركيبات مختلفة وجرعات الاسمنت.

واعتمد النمذجة الفيزيائية الميكانيكية والطاقة الحرارية من وسائل الإعلام التي يسهل اختراقها للتنبؤ التوصيل الحراري واضح. عينات التجربة من البوزلان خفيفة الوزن تستند الخرسانة، تعرض لاحقا لاختبارات ومقاومة الإجهاد الميكانيكية، وقد سمح لنا لتقييم وتقييم أداء هذه المواد. أجريت القياسات التجريبية من التوصيل الحراري واضح على جميع العينات يمكن مقارنتها مع القيم النظرية.

استخدام البوزلان في تركيبة الخرسانة خفيفة الوزن في شكل من المجاميع بشكل جوهر الهيكل العظمي حبيبات الخرسانة، وهو ما يعطيها القوة الميكانيكية يتفق مع معايير

وقد اظهرت النتائج أن قيمة فضلا عن الاستفادة وأداء البوزلان خفيفة الوزن تستند الخرسانة.

الآن هذه المواد بناء عليها الخصائص الحرارية والميكانيكية مثيرة للاهتمام. استخدامه في هياكل الموائل والهندسة تقدم فوائد كبيرة في التنمية الاقتصادية والإيكولوجية والحرارية وحيوية.