

UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES

FACULTE DE TECHNOLOGIE



THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux

Présentée par :

CHAABANE Lynda Amel

Pour l'obtention du

GRADE DE DOCTEUR EN SCIENCES

Contribution à l'étude mécanique et thermique des bétons de sable

Soutenue le 21 mai 2017 devant le jury

Mr MEGHACHOU Mourad	Pr	U.D.L Sidi Bel Abbès	Président
Mr SEBAIBI Yahya	Pr	U.D.L Sidi Bel Abbès	Directeur de thèse
Mr KADRI El-Hadj	Pr	U. de Cergy-Pontoise	Co-Directeur de thèse
Mr GHOMARI Abdelhamid	Pr	U. de Mostaganem	Examineur
Mr EZZIANE Mohamed	MCA	ENP-Oran	Examineur
Mr TROUZINE Habib	MCA	U.D.L Sidi Bel Abbès	Invité

Année Universitaire 2016-2017

Remerciements

- *Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à **Mr SEBAIBI Yahya**, professeur au département d'hydraulique de Sidi Bel Abbés pour son encadrement, son aide sa confiance qui m'ont permis de mener à bien cette étude.*
- *Mes plus vifs remerciements à Monsieur **EL-HADJI Kadri** Professeur à l'Université de Cergy Pontoise qui m'a encadré, formé, encouragé et orienté au cours de mes recherches sans oublier l'équipe de laboratoire L2MGC en France.*
- *Je remercie Monsieur **MEGHACHOU Mourad** Professeur au Département hydraulique, vice recteur de la Post-Graduation de m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de thèse.*
- *Je remercie également les membres de jury : Monsieur **GHOMARI** Professeur à l'université de Mostaganem et Monsieur **EZZIANE Mohamed** Maître de conférences classe A d'avoir examiné ce travail.*
- *Sans oublier Monsieur **TROUZINE Habib** pour l'intérêt qu'il apporte à ce travail et d'avoir accepté d'être l'invité de cette thèse.*

Dédicace

Je dédie ce travail :

- *à mon mari, « Ahmed Raouf ».*
- *à ma mère.*
- *Mes frères « Noumene et Anes »*
- *Et surtout à mes enfants « Sirine, Wissem, et Aymen » qui ont été
la source de mon énergie au cours de ce travail.*

Nomenclature

q : flux de chaleur échangé à travers leur surface de contact S en fonction d'un

h : coefficient d'échange par convection $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$

T_S : température à la surface du solide

T_f : température dans le fluide.

q_r : flux thermique maximal q_r émis par un corps à sa température .

φ_r : la densité de flux thermique de rayonnement

σ : est la constante de Stefan qui vaut $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$.

c : le « facteur d'émission » ou « émissivité » qui varie entre 0 et 1.

a : diffusivité thermique de l'échantillon

α : coefficient de dilatation thermique

ϵ_h : déformation hydrique

ϵ_{th} : déformation thermique .

ϵ_m : déformation mécanique .

F_{ext} : efforts mécaniques extérieurs

F_{th} : efforts thermiques

F_{hy} : efforts hydriques

E_R : module mesure après refroidissement (à froid).

E_T : module à la température de traitement (à chaud).

E_0 : module du matériau à 20°C.

E_a : module apparent .

D_s : un endommagement sphérique .

D_d : un endommagement déviatorique .

ε : La déformation totale

B_t : écrouissage de l'endommagement ;

G_f : énergie de fissuration [J/m^2] ;

ε_{d0} : seuil de déformation en traction ;

l_c : taille caractéristique des éléments ;

E : module d'élasticité [Pa] ;

f_t : contrainte de traction au pic [Pa].

M_1 : masse humide du sable.

M_2 : masse après séchage du sable

M_3 : est la masse du pycnomètre, de l'entonnoir, de la prise d'essai et de l'eau, en grammes ;

V : est le volume du pycnomètre, en millilitres ;

ρ_w : est la masse volumique de l'eau à la température d'essai, en méga grammes par mètre cube

VB : Valeur de bleu de l'échantillon (en g de bleu / kg de fines).

V : Volume total de solution injectée en l.

Nomenclature

M : Masse de la prise d'essai en grammes.

10 : Valeur constante.

C : Dosage en ciment (Kg/m^3).

E : Dosage en eau (en litre).

σ_c : Classe vraie de résistance de ciment(Mpa).

RESUME

Les consommations de sable du Nord deviennent très rares et certains contiennent des éléments chimiques dont leurs utilisations deviennent néfastes pour le béton. Pour cela, la recherche d'une solution technique devient très nécessaire. Vu l'abondance du sable de dune dans notre pays, son intégration dans le squelette granulaire peut remédier à ce problème, en remplaçant le sable de mer, tout en répondant à l'exigence du développement durable. Cette recherche consiste à élaborer, caractériser un béton composite, obtenu par substitution d'une fraction appropriée, de granulats naturels par des granulats légers, tels que les agrégats naturels : la pierre ponce, matériau léger qu'on trouve dans les sédiments volcaniques.

Les buts de ce travail sont les performances du béton léger qui peuvent être améliorées par l'ajout de fines, pour un dosage constant en fine d'addition ainsi que la maniabilité améliorée quand le rapport eau /ciment est fixé. Sachant que la maniabilité dépend de la nature et du dosage des fines, la substitution du sable de dune dans la composition du béton léger pourra être bénéfique, exige de très fortes teneurs en ciment afin d'obtenir des résistances élevées et permettant ainsi la réduction de la consommation de ce produit.

La formulation suivie est une approche expérimentale subdivisée en deux parties : la confection de trois compositions différentes du béton en utilisant les sables locaux , étudier l'impact de l'absorption des granulats légers tout en déterminant , dans la première partie les paramètres optimaux en amont nécessaires à l'élaboration du béton reformulé dans la seconde partie de ce travail ,qui a été achevé par une modélisation numérique du transfert thermique représentant la propriété d'isolation thermique conféré au béton léger .Ainsi, en améliorant ses caractéristiques mécaniques et thermiques, ce béton pourra faire l'objet d'un matériau destiné aux ouvrages structuraux par l'intégration de la pierre ponce dans sa composition à des fins économiques, par la substitution du sable de construction par le sable de dune.

Cette étude nous a permis d'approfondir la connaissance des matériaux et leurs influences au sein du béton et l'impact du gradient de température sur ce matériau complexe.

Mots clés : Béton Léger ; Sable de dune ; Température ; Perte de masse ; Propriétés mécaniques.

ABSTRACT

Consumptions of sand from the North are becoming very scarce and some contain chemical elements whose uses are detrimental to concrete. To achieve this, the search for a technical solution becomes very necessary. Given the abundance of sand dune in our country, its integration into the granular skeleton can remedy this problem, replacing the sea sand, while meeting the requirement of sustainable development. This research involves developing, characterizing a composite concrete obtained by substituting an appropriate fraction of natural aggregates with light aggregates, such as natural aggregates: pumice, a light material found in volcanic sediments.

The aims of this work are the performance of lightweight concrete which can be improved by the addition of fines, for a constant dosage in addition fine as well as improved maneuverability when the water / cement ratio is fixed. Knowing that maneuverability depends on the nature and dosage of the fines, the substitution of dune sand in the lightweight concrete composition may be beneficial, requires very high cement contents in order to obtain high strength and thus reduce The consumption of this product.

The formulation followed is an experimental approach divided into two parts: the construction of three different concrete compositions using local sands, study the impact of the absorption of lightweight aggregates while determining, in the first part, the optimal parameters upstream Necessary for the production of reformulated concrete in the second part of this work, which was completed by a numerical modeling of heat transfer representing the thermal insulation property imparted to lightweight concrete. Thus, by improving its mechanical and thermal characteristics, Concrete may be the object of a material intended for the structural works by the integration of the pumice stone in its composition for economic purposes, by the substitution of the sand of construction by the sand of dune.

This study allowed us to deepen the knowledge of the materials and their influences within the concrete and the impact of the temperature gradient on this complex material.

Key words: *Light concrete; Sand of dune; Temperature ; A loss of mass ; Mechanical properties.*

ملخص

استهلاك الرمال الشمالي أصبحت نادرة جدا، وبعض تحتوي على مواد كيميائية الذي يصبح استخدامها يضر الخرسانة. لهذا، يصبح من الضروري جدا البحث عن حل تقني. ونظرا لكثرة الكثبان الرملية في بلادنا، اندماجها في الهيكل العظمي الحبيبية يمكن التغلب على هذه المشكلة عن طريق استبدال بحر من الرمال، في حين تلبية الحاجة إلى التنمية المستدامة. هذا البحث هو تطوير وتميز الخرسانة المركبة التي تم الحصول عليها عن طريق استبدال أي جزء مناسب من المجاميع الطبيعية مع المجاميع الخفيفة، مثل المجاميع الطبيعية: الخفاف، مواد خفيفة الوزن وجدت في الرواسب البركانية.

أهداف هذا العمل هي أداء الخرسانة خفيفة الوزن التي يمكن تحسينها بإضافة الغرامات، لجرعة ثابتة من إضافة غرامة، وتحسين القدرة على المناورة عندما يتم إصلاح نسبة الماء / الأسمنت. مع العلم أن قابلية يعتمد على طبيعة وجرعة من الغرامة، والاستعاضة عن الكثبان الرملية في تكوين الخرسانة خفيفة الوزن يمكن أن يكون مفيدا، ويتطلب محتويات الاسمنت عالية جدا من أجل الحصول على القوة العالية وبالتالي السماح بتخفيض استهلاك هذا المنتج.

وهذا النهج التجريبي المتبع تقسيم صياغة إلى قسمين: تصنيع ثلاث تركيبات مختلفة من الخرسانة باستخدام الرمال المحلية دراسة امتصاص تأثير الركام خفيف الوزن، مع تحديد، في الجزء الأول المعلومات المثلى المنبع اللازمة لتطوير الخرسانة صياغتها في الجزء الثاني من هذا العمل، الذي تم الانتهاء من النمذجة العددية لانتقال الحرارة تمثل خاصية العزل الحراري المخولة الخرسانة خفيفة الوزن. لذا تحسين خصائصها الميكانيكية والحرارية، الخرسانة قد تكون مادة عن الأعمال الإنشائية من خلال دمج الخفاف كما شكلت لأغراض اقتصادية، من خلال استبدال الرمل البناء من قبل الكثبان الرملية.

وقد سمحت هذه الدراسة لنا لتعميق المعرفة من المواد وتأثيراتها في الخرسانة وتأثير التدرج في درجة الحرارة على هذه المواد المعقدة.

كلمات البحث: خرسانة خفيفة الوزن؛ الكثبان الرملية؛ درجة الحرارة؛ فقدان الوزن؛ الخواص الميكانيكية

Liste des tableaux

N°	Désignation	Page
1.	Tableau I-1: Compositions chimiques des granulats légers	23
2.	Tableau I-2. Résistances conventionnelles (essai d'écrasement au pot) des granulats légers [ARN86]	25
3.	Tableau I-3. Résistances de granulats légers en fonction de leurs densités	26
4.	Tableau I-4: caractéristique du béton à différents rapports E/C	45
5.	Tableau I-5: Conductivité thermique de bétons de granulat léger à différents dosages en ciment [UYS04]	46
6.	Tableau I-7: Conductivité thermique de différents bétons de granulats légers [CHA02]	47
7.	Tableau I-8: Influence de la fumée de silice sur les propriétés thermiques de pâtes de ciment [XU00], [FU99]	50
8.	Tableau I-9: Résistance en compression du béton à différentes fractions de la pierre ponce	63
9.	Tableau I-10: Résistance en compression aux différentes fractions volumiques de pierre ponce et de perlite expansée	64
10.	Tableau II.1 : Les valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et qualité du sable.	101
11.	Tableau II.2 : Masse minimale des éprouvettes	103

12.	Tableau II.3 : Tamisage des différents sables du béton léger	110
13.	Tableau II.4 : Tamisage des différents graviers	110
14.	Tableau II.5 : Propriétés physiques des sables de dunes.	113
15.	Tableau II.6 : Analyses chimiques du sable de carrière et les sables de dunes	114
16.	Tableau II .7 : Composition chimique de pierre ponce [VAQ76]	115
17.	Tableau II.8 : Les Oxydes (%)	116
18.	Tableau II.9: Composition minéralogique de Bogue	117
19.	Tableau II.10 : Les caractéristiques du Super plastifiant	117
20.	Tableau II.11 : compositions du béton BLGST	120
21.	Tableau II.12 : Compositions du béton BLGSA	120
22.	Tableau II .13 : La nomenclature des mélanges au cours des phases expérimentales réalisées au laboratoire.	125

Liste des figures

N°	Désignation	Page
1.	Figure I-1 : Principe de la méthode de la plaque chaude gardée	16
2.	Figure I-2 : Principe de la méthode du fil chaud [FRA07]	17
3.	Figure I-3 : Granulats légers naturels	21
4.	Figure I-4 : Différents granulats légers artificiels	22
5.	Figure I-5. Zone de transition entre un granulats d'argile expansée et la pâte de ciment	29
6.	Figure I-6. Largeur de la zone de transition au jeune âge en fonction de l'absorption du granulats de cendres volantes [WAS96]	29
7.	Figure I-7. Évolution du pourcentage de porosité en fonction de la distance à la surface de granulats [ELS05]	31
8.	Figure I-8. Influence de l'absorption d'eau des granulats légers sur la porosité de la zone interfaciale [LO08]	34
9.	Figure I-9 : Trois mécanismes d'interaction dans la zone de transition [ZHA90-1]	36
10.	Figure I-10 : Types de courbe d'isotherme de sorption (a) et formes de l'hystérésis pour les isothermes de sorption de type IV (b) [SIN85]	41
11.	Figure I-11 : Conductivité thermique en fonction de la masse volumique et de la teneur en eau des bétons [MIN03]	42
12.	Figure I-12 : Conductivité thermique des bétons de quartz en fonction de la température [MAR70]	44

13. Figure I-13: Evolution de la conductivité thermique des bétons en fonction de la teneur en FS(a) et de la teneur en CV(b) [DEM03-2] 49
14. Figure I-14 : Conductivité thermique et masse volumique du béton ordinaire à différentes teneurs en pierre ponce [UYS04] 51
15. Figure I-15: Conductivité thermique d'un béton ordinaire en fonction de la fraction de la perlite expansée [DEM03-2] 52
16. Figure I-16 : Résistance en compression à 28 jours de bétons de granulats légers en fonction de la résistance des grains [ARN86] 53
17. Figure I-17 : Évolution de la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) en fonction du dosage en ciment de bétons ayant un affaissement de 50mm et confectionnés avec différents types de granulats légers. (A) cendres volantes frittées et granulat fin ordinaire ; (B) laitier de haut fourneau en boulettes et granulat fin ordinaire ; (C) cendres volantes frittées ; (D) schiste fritté; (E) ardoise expansée ; (F) argile expansée et sable; (G) laitier expansé [NEV00]. 59
18. Figure I-18 : Évolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de la teneur en fumée de silice (a) et de la teneur en cendres volantes pour les bétons de pierre ponce (PP) et de perlite expansée (PE) [DEM01] 61
19. Figure I-19 : Résistance en compression du béton en fonction de la fraction volumique de granulats légers [KE09] 65
20. Figure I-20 : Relation entre la résistance en compression du béton et le volume des gravillons [BOG13] 66
21. Figure I-21 : Relation entre la résistance en compression et le taux de remplacement de perlite (a) et relation entre la résistance en traction et le 67

taux de remplacement de perlite (b) [TOP08]	
22. Figure I-22 : Relation contrainte - déformation du béton de granulat léger (A) et du béton ordinaire (B) [NEV00]	70
23. Figure I-23 : Relation contrainte - déformation de différentes gammes du béton de granulats légers [ZHA91-2]	70
24. Figure I. 24 : Évolution opposée du coefficient de dilatation thermique des pâtes de ciment et des granulats [Moun 02].	74
25. Figure I.25 : Micro déformation	78
26. Figure I.26 : Evolution de l'endommagement en fonction de la température dans un VER de béton [Moun 02].	79
27. FigureI.27:Mesure de l'endommagement moyen (macroscopique) [Moun 02].	80
28. Figure I.28 : Evolution du module apparent moyen en fonction de la température [Moun 02].	81
29. Figure I.29 : Courbes d'évolution des contraintes et déformations moyennes en fonction de la température [Moun 02].	82
30. Figure I.30: Principe de l'approche par homogénéisation [Moun 02].	84
31. Figure I.31: Organigramme de l'approche d'endommagement thermique [Moun 02].	87
32. Figure I.32 : Courbes d'évolution expérimentale de l'énergie de fissuration en fonction de la température [Moun 02].	89
33. Figure I.33: Endommagement thermique d'origine physico-chimique [Moun 03].	89

34.	Figure I.34 : Baisse de rigidité du MHP reproduit par simulation [Sullivan 71].	91
35.	Figure I.35: Rapport du module d'un mortier ordinaire en fonction de la température (Essai flexion Sullivan et al 1971)	92
36.	Figure II.1 :Mesure de la masse volumique	105
37.	Figure II.2 : Analyse granulométrique des différents graviers utilisés dans la première partie.	111
38.	Figure II.3 : Analyse granulométrique des différents sables utilisés	112
39.	Figure II.4 : Évolution de la valeur de l'équivalent de sable selon l'augmentation de la proportion de dunes de sable.	114
40.	Figure II.5 : Pré-mouillage des agrégats légers (la pierre ponce)	122
41.	Figure II .6 : Evolution de l'absorption d'eau en (%) du poids sec	123
42.	Figure II. 7 : La variation de l'affaissement en fonction de la teneur de sable pour le béton léger des compositions SL1 et SL2.	124
43.	Figure III.1 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps	127
44.	Figure III.2 : Relation entre le module d'Young du béton léger et la masse volumique sèche des bétons légers	129
45.	Figure III.3 : Séchage des éprouvettes en béton léger	130
46.	Figure III.4 : Les effets de séchage sur le béton léger	130
47.	Figure III.5 : Effet de la température sur la résistance à la compression du béton léger à différentes substitutions de sable .	133

48. Figure III.6 : Modélisation du transfert thermique sur une éprouvette du béton léger 135
49. Figure III.7 : Propagation de la température dans le temps à travers l'éprouvette en béton léger 135

Table des matières

INTRODUCTION	2
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1 Preambule : Contexte General de l'étude.....	5
I.1.1 Introduction.....	5
I.1.2 Béton léger dans la construction.....	7
I.2 Phénomènes de transfert de chaleur.....	9
I.2.1 Modes de transfert de chaleur.....	10
Conduction.....	10
Convection.....	11
Rayonnement thermique.....	12
I.2.2 Transfert thermique dans un milieu poreux.....	13
I.2.3 Mesure des propriétés thermiques.....	15
Méthode de la plaque chaude gardée.....	16
Méthode du fil chaud.....	17
Méthode de Hot-disk.....	18
I.3 Propriétés Des Granulats Légers.....	20
I.3.1 Classification.....	20
I.3.2 Composition chimique des granulats légers.....	23
I.3.3 Résistance des granulats légers.....	24
I.3.4 Propriétés physiques des bétons de granulats légers.....	27
Interaction des granulats avec la matrice cimentaire.....	28
Structure poreuse des granulats légers et capacité d'absorption d'eau.....	32
I.3.5 Maniabilité et mûrissement des bétons légers.....	37
I.4 Généralité sur les propriétés hydro-thermiques des bétons.....	37

I.4.1 Sensibilité des matériaux à l’humidité.....	38
I.4.2 Influence de la porosité et de la teneur en eau.....	42
I.4.3 Influence de la température.....	44
I.5 Propriétés thermiques des bétons de granulats légers.....	45
I.5.1 Influence de la composition de la matrice cimentaire.....	45
I.5.2 Influence de la nature des granulats.....	46
I.5.3 Influence des additions minérales.....	48
I.5.4 Influence de la fraction volumique des granulats légers....	50
I.6 Propriétés mécaniques des bétons de granulats légers.....	52
I.6.1 Influence des caractéristiques des granulats.....	52
I.6.2 Influence du rapport E/C et l’absorption d’eau des granulats.....	55
I.6.3 Influence du dosage en ciment.....	58
I.6.4 Influence des additions minérales.....	60
I.6.5 Influence de la fraction volumique des granulats légers....	62
I.6.6 Paramètres affectant le module d’élasticité.....	68
I.7. Approche multi échelles pour l’étude de l’endommagement thermique des bétons.....	71
I.7.1 Introduction.....	71
I.7.2 Matériaux hétérogènes et limites de l’approche macroscopique.....	71
I.7.3. Phénomène de dilatation différentielle empêchée à l’échelle mésoscopique.....	73
I.7.4 Origine micromécanique de l’endommagement thermique.. Bases préliminaires.....	75
I.7.5 Hypothèse de l’existence de la déformation thermique microscopique	77
I.7.6 Calcul de l’endommagement moyen à l’échelle	

macroscopique	79
I.7.7 Approche multi échelles pour l'étude de l'endommagement thermique du béton.....	83
I.8 Le modèle d'endommagement thermo mécanique.....	84
I.8.1 Endommagement d'origine mécanique (macro et microscopique).....	84
I.8.2 Endommagement d'origine physicochimique.....	85
I.8.3 La quantification de l'endommagement.....	88
I.8.4 Identification expérimentale de l'endommagement physicochimique.....	89
I.8.5 Validation du modèle et comparaison avec l'expérience.....	90
Résultats sur mortier de haute performance (MHP).....	91
I.9 Conclusion.....	93
 <i>CHAPITRE II :ANALYSE DES MATERIAUX ET CONFECTION DU BETON LEGER</i> 	
II.1 Principe de base.....	97
II.2 Approche de Holm	98
II.3 La Formulation.....	98
II.3.1 Caractérisations des constituants	99
II.4 La pierre ponce.....	115
II.5 Le Ciment.....	116
II.5.1 Composition chimique du ciment	116
II.6 Superplastifiant	117
II.7 Protocole expérimentale.....	117
II.7.1 Présentation de la méthode	118
II.7.2 Etude de la composition de béton	119
II.7.3 Récapitulative des Bétons.....	120

II.7.4 Trace de la courbe granulaire de référence.....	121
II.7.5 Essai d'affaissement au cône d'Abrams (EN 12350-2).....	121
II.7.6 Evolution de l'absorption d'eau de la pierre ponce	121
II.7.7 La variation de l'affaissement en fonction de la teneur en sable.....	124
II.3 Choix des paramètres et confection du béton léger.....	125
<i>CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS</i>	
III.1 Résultats Expérimentaux	127
III.1.1 Effet de dunes de sable et de pierre ponce sur la résistance du béton.....	127
III.1.2 Module d'élasticité.....	128
III.1.3 Les effets du séchage sur le béton léger.....	130
III.1.4 Effets de la température sur le béton léger.....	131
III.2 Conclusion	136
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	141
<i>ANNEXES.....</i>	146
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</i>	150

Introduction Générale

Introduction Générale

Le problème actuel est de favoriser des produits composites capables de remplir plusieurs usages, nous ne cherchons plus actuellement que la performance mécanique mais nous tentons également d'améliorer les qualités thermiques et économiques. Le développement récent de béton allégé capables de jouer un rôle en tant qu'isolant, tout en conservant des niveaux de performances suffisantes. Ces matériaux sont alors étudiés simultanément sur deux thématiques : mécanique / thermique ou mécanique/ acoustique.

Le sud Algérien dispose des réserves naturelles importantes renouvelables en sable de dune , caractérisé par une granulométrie fine mais de composition chimique et minéralogique riche en silicium, cette recherche permet d'envisager l'exploitation des ressources locales à des fins économiques et environnementaux, néanmoins plusieurs problèmes ont été relevé pendant la cure de ces bétons que ce soit à l'état frais ou plutôt à l'état durci du retrait endogène, retrait exogène, fissuration précoce, perte de rigidité, perte de résistance ..etc.

La recherche a révélé que la substitution d'un matériau alternatif dans le béton pourrait améliorer à la fois les propriétés mécaniques et de durabilité, ce qui conduit à l'élaboration d'un béton durable. Certains chercheurs ont étudié l'effet du sable très fin dragué des estuaires des rivières sur les mélanges de béton, il a été constaté que lorsque la teneur en sable augmente les teneurs en eau nécessaires à la maniabilité normale ne sont pas plus élevés que dans le béton fait de sable grossier.

Les chercheurs ont comparé les propriétés de résistance de mélanges de mortiers à base de sables classiques et des dunes de sable ainsi que le

développement la résistance ,il a été également constaté que le développement de la résistance et l'élasticité ne sont pas différents de celle du béton classique.

La composition du béton doit faire l'objet d'un contrôle, dans certains cas peut être corrigée d'une gâchée à l'autre. Dans ce but ce travail a été subdivisé en deux parties succinctes afin d'améliorer les caractéristiques du béton léger et de réduire le facteur d'erreur.

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique regroupant des travaux sur le béton léger, le sable de dune ainsi que le transfert thermique dans le béton.

Le deuxième chapitre a eu pour objet le choix et des différents matériaux nécessaires pour la confection du béton léger qui ont été prédéfinis et corrigés à l'amont dans la première partie ,donc la substitution à de différents pourcentages de sable de dune , le pré-mouillage des granulats légers et les variations des rapports G/S et E/C.

Le troisième chapitre a été consacrée au choix des valeurs optimales visées à l'élaboration du béton léger, et regroupe les résultats expérimentaux et numériques qui sont présentés et comparés suivant le type de béton, ces études ont été réalisées à l'Université de Sid Bel abbés en collaboration avec l'université de Cergy Pontoise.

Enfin, une conclusion générale est faite quant a l'apport de cette étude et aux perspectives qu'elle ouvre.

Chapitre I

Etude bibliographique

I.1 Préambule : Contexte General de l'étude

I.1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse des travaux expérimentaux menés par différents auteurs de la littérature sur les propriétés des granulats légers et le comportement mécanique des bétons de granulats légers de structure. Cette synthèse met en avant les spécificités de ces bétons, en particulier leurs différences avec les bétons traditionnels au niveau de l'interface matrice/granulat, des différentes masses volumiques et des propriétés mécaniques des bétons. Les caractéristiques élastiques et de rupture sont reliées aux propriétés des granulats, à la composition du béton et aux conditions de conservation.

Sur le plan technique, les solutions et les produits technologiques sont favorisés, tant pour diminuer la consommation d'énergie que pour réduire la déperdition d'énergie dans les bâtiments. La déperdition d'énergie provient essentiellement de la chaleur traversant l'enveloppe du bâtiment (énergie consommée pour le chauffage). Notons que le chauffage occupe jusqu'à 70% de la consommation d'énergie des usages en résidentiel .La déperdition d'énergie se manifeste à plusieurs endroits du bâtiment : mur, toit, sol, fenêtre et plancher, l'origine est la mauvaise isolation avec l'extérieur.

Dans le bâtiment, les murs qui représentent de 16% à 25% des déperditions de chaleur sont souvent traités par l'isolation intérieure ou extérieure. Les déperditions thermiques sont limitées en recouvrant les éléments de maçonnerie du bâtiment d'une ou plusieurs couches d'isolant. L'isolation thermique par l'extérieur est beaucoup développée dans les pays du nord de l'Europe. Elle est considérée comme la plus efficace parce qu'elle permet d'éliminer presque tous les « ponts thermiques ». L'isolation par l'intérieur, très

répandue est souvent accompagnée d'une isolation des combles pour traiter les déperditions par la toiture.

Les ponts thermiques représentent de 10 à 40% de la perte totale de chaleur d'un bâtiment (www.cstb.fr). La majorité des immeubles ayant une isolation thermique par l'intérieur, le traitement des ponts thermiques devient nécessaire pour améliorer la performance thermique des bâtiments. Une des solutions est d'utiliser des rupteurs thermiques au niveau du raccordement entre le voile de façade et la dalle. La jonction classique est remplacée par un élément constitué de matières isolantes. Selon Lafarge (www.ductal-lafarge.fr), cette solution permet de réduire jusqu'à 70% la déperdition de l'énergie au niveau des ponts thermiques.

Une autre solution technique qui permet à la fois de traiter les déperditions au niveau des murs et des ponts thermiques est l'isolation répartie. Le principe de l'isolation répartie consiste à conserver le bénéfice des dispositifs de chauffage le plus longtemps possible grâce à la performance de l'inertie thermique de l'air. Elle repose principalement sur une maçonnerie en béton cellulaire ou en brique isolante de terre cuite dotée d'un réseau d'alvéoles. Les propriétés isolantes de ces matériaux reposent sur une forte présence d'air. Le matériau, ayant en même temps la fonction porteuse et la fonction isolante, permet de construire un mur extérieur à « isolation répartie ». La déperdition au niveau du pont thermique reste basse en raison de la capacité isolante du mur.

L'intérêt de l'isolation répartie conduit à imaginer des éléments structurels des bâtiments au niveau du mur et en même temps au niveau du plancher. Cela exige un matériau ayant une bonne performance mécanique avec des propriétés d'isolation thermique améliorées.

I.1.2 Béton léger dans la construction

La première utilisation du béton léger est connue avant J.C. dans les constructions de l'Empire Roman en méditerranée. Mais ce n'est qu'en 1928 que le béton léger fut commercialisé. Les Etats Unis sont le premier pays qui l'a fabriqué industriellement et utilisé pour l'usage structurel pendant les années 1940. Le béton de structure de granulat léger est mis en œuvre dans plusieurs types de construction comme les bâtiments résidentiels, les ossatures d'immeubles, les tabliers de ponts, les constructions offshores [ACI04].

Le béton léger est défini par sa masse volumique inférieure ou égale à 2000 kg/m^3 (Eurocode 2– 992). Comparé au béton ordinaire de densité normale, qui a une masse volumique entre 2200 et 2600 kg/m^3 , la masse volumique du béton léger est diminuée par la substitution d'une certaine partie solide du matériau par des poches d'air que nous appellerons vides. Nous distinguons 3 types de béton léger suivant la localisation de ces vides :

- *Béton de granulats légers* : les vides se trouvent au sein des granulats. Les bétons de granulats légers sont fabriqués comme les bétons courants, mais avec des granulats légers à la place du granulat ordinaire. Les granulats légers sont de différentes natures : schiste expansé, argile expansée, laitiers expansés, pierre ponce, perlite ou vermiculite. Parmi ces granulats, les quatre premiers peuvent être utilisés pour fabriquer le béton de structure.
- *Béton cellulaire* : les vides se trouvent dans la liant. Les bétons cellulaires ne contiennent que du ciment, de l'eau et du sable. Des bulles d'air sont créées à l'intérieur de la pâte, soit par gâchage avec de la poudre d'aluminium, soit par gâchage avec de l'eau savonneuse. En général, les bétons cellulaires ont une résistance en

compression faible (2 à 8 MPa), mais leurs avantages résident dans la masse volumique plus faible (500 à 1000 kg/m³) et des propriétés d'isolation thermique supérieures (conductivité thermique de 0,1 à 0,2 W/mK) à celles des autres bétons.

- *Béton caverneux* : les vides se situent entre les gros granulats par suppression des granulats fins. Les bétons caverneux sont fabriqués comme les bétons ordinaires mais sans le sable. Il existe donc de gros vides au sein de la matrice de mortier qui sont responsables de sa faible résistance. On l'utilise principalement dans la confection de murs porteurs de bâtiments domestiques et dans les panneaux de remplissage de cadres de structure.

L'utilisation du béton de granulats légers en structure peut être bénéfique au niveau du coût d'un projet et de la fonctionnalité de la structure ou de l'ouvrage [ACI03]. Même si le coût par mètre cube d'une structure de béton de granulats légers est souvent plus élevé que celui en béton ordinaire, le coût total d'un projet utilisant le béton léger est souvent réduit grâce aux avantages liés au béton de granulats légers par rapport du béton ordinaire :

- La réduction de la charge transmise à la fondation mène à la réduction des dimensions de la fondation et des têtes de pieux, ainsi qu'à la diminution du nombre de pieux et du renforcement.
- La réduction du chargement statique mène à la réduction des dimensions des structures portantes.
- La réduction du chargement statique réduit la force d'inertie sismique.

- Pour le béton précontraint préfabriqué, le béton de granulats légers permet de fabriquer des structures plus longues et plus larges sans augmenter la masse totale.
- L'épaisseur de la structure résistante au feu peut être diminuée grâce à l'isolation thermique du béton de granulats légers, ce qui mène à la réduction du volume de béton.
- La diminution du volume de béton conduit à une réduction du coût de transport.

L'utilisation du béton de granulats légers permet également de construire sur un sol de faible capacité portante, grâce à la réduction de la masse totale de l'ouvrage [CAR86] ainsi qu'à une augmentation de la productivité grâce à la réduction de la masse totale de matériaux à manipuler [NEV00].

I.2 Phénomènes de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur désigne les processus physiques par lesquels l'énergie thermique se déplace entre les deux milieux de différentes températures. La chaleur est définie comme l'énergie transférée du milieu à haute température vers le milieu à basse température. Dans le transfert de chaleur, on s'intéresse à la température et le flux de chaleur. La température représente la quantité de l'énergie thermique des molécules tandis que le flux de chaleur représente le mouvement de l'énergie thermique d'un endroit à l'autre. Les modes de transfert de chaleur, les phénomènes de transfert de chaleur dans un milieu poreux, les techniques de mesures des propriétés thermiques ainsi que les paramètres affectant le transfert thermique sont présentés dans les paragraphes suivants.

I.2.1 Modes de transfert de chaleur

Il existe trois modes de transfert de chaleur : conduction, convection et rayonnement.

Conduction

La conduction thermique est un phénomène de transfert de l'énergie interne. Dans les solides, la conduction thermique est assurée par le mouvement des électrons libres et les vibrations du réseau cristallin, appelés phonons [EYG97, SHI06, FRE08]. Le transfert thermique par les vibrations moléculaires est le mode de conduction principal dans un matériau non-métallique. Les molécules échangent leurs énergies cinétique et vibratoire par leurs mouvements et leurs collisions. Hormis le rayonnement à travers les corps transparents, la conduction est pratiquement le seul mode de transmission de la chaleur à travers les solides.

Selon l'équilibre thermique du système, le transfert par conduction peut être examiné en régime permanent ou transitoire. Dans le régime permanent, la température est indépendante du temps (constante en chaque point). Dans le cas d'un milieu isotrope, seule la loi de Fourier est suffisante pour décrire la conduction :

$$\vec{\varphi} = \lambda \overrightarrow{gradT} \quad (I-1)$$

dont φ est le vecteur de densité de flux thermique. La grandeur λ [W/m.K] désigne la conductivité thermique du matériau. Elle caractérise la chaleur transférée par unité de surface isotherme, dans une unité de temps sous un gradient de température unitaire.

Dans le transfert en régime transitoire, les températures du domaine évoluent au fur et à mesure des évolutions du flux thermique externe et de la

puissance interne P_i , sans atteindre l'équilibre thermique. La conduction en régime transitoire est gérée par l'équation de chaleur :

$$\lambda \nabla^2 T + P_i = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{I-2})$$

où la chaleur massique C_p , appelée également la capacité thermique massique, représente la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un degré la température de l'unité de masse d'un solide. Le régime transitoire est caractérisé par la diffusivité thermique qui représente la vitesse de réponse du matériau pour transmettre un signal de température. Elle est reliée à la conductivité thermique λ et à la chaleur massique C_p par la formule :

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (\text{I-3})$$

Convection

Ce mode de transfert caractérise l'échange thermique au travers d'écoulements laminaires à l'intérieur d'un fluide ou entre une surface solide et la couche limite d'un fluide en mouvement. La convection est dite forcée lorsque la circulation est provoquée par l'action d'une force extérieure au fluide (pompe, ventilateur, circulateur, etc.). Elle est dite libre ou naturelle lorsque la circulation résulte d'une différence de température. Le gradient de température implique une différence de masse volumique (le fluide froid est plus dense que le fluide chaud) au sein du fluide qui provoque son mouvement.

A l'intérieur du fluide, dans laquelle les effets de compressibilité, de dilatabilité et de dissipation visqueuse et les sources internes sont négligés, l'équation microscopique de l'énergie s'écrit [BOR08-1] :

$$\lambda \nabla^2 T = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{I-4})$$

Dans cette équation, le terme $\rho C_p \vec{u} \nabla T$ rend compte du transport d'enthalpie par l'écoulement dont \vec{u} est le champ de vitesse microscopique.

Lors d'un échange de chaleur entre un solide et un fluide, la loi de Newton exprime le flux de chaleur q échangé à travers leur surface de contact S en fonction d'un coefficient d'échange par convection h [W/m².K] :

$$q = hS(T_s - T_f) \quad (\text{I-5})$$

où T_s et T_f désignent respectivement la température à la surface du solide et dans le fluide.

Rayonnement thermique

Il s'agit d'un rayonnement de nature électromagnétique effectué au détriment de l'énergie interne d'un corps. Il est composé de radiations de longueurs d'onde différentes (0,1 à 100 μm). Tous les corps chauffés (solides, liquides ou gazeux) émettent des radiations thermiques. Leur densité dépend de la température du corps. Le flux de chaleur émis par un solide est basé sur la loi de Stefan-Boltzmann qui relie le flux thermique maximal q_r émis par un corps à sa température :

$$q_r = \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{I-6})$$

σ est la constante de Stefan qui vaut $5,67.10^{-8}$ (W/m².K⁴) et ε le « facteur d'émission » ou « émissivité » qui varie entre 0 et 1. Si un volume élémentaire, soumis à un transfert de conduction, est de surcroît traversé par un rayonnement thermique, l'équation microscopique de l'énergie devient [BOR08-1] :

$$\lambda \nabla^2 T = \nabla \cdot (\overrightarrow{\varphi_r}) \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (I-7)$$

Avec φ_r la densité de flux thermique de rayonnement.

I.2.2 Transfert thermique dans un milieu poreux

Le matériau de construction est souvent un milieu poreux constitué de trois phases : une phase solide (liée à la structure du matériau), une phase liquide (eau libre et eau adsorbée contenue dans le matériau) et une phase gazeuse (air humide). Le transfert dans un milieu poreux s'effectue dans toutes les phases. Elle englobe la conduction dans le squelette solide, dans la phase liquide et dans le gaz, la convection naturelle dans les pores, le rayonnement et le changement de phase liquide - vapeur.

La conduction se produit à la fois dans les pores et dans le squelette solide, avec la conduction de gaz et la conduction du solide du matériau poreux étant les principaux facteurs. La conduction est exprimée par la loi de Fourier (I-1) et l'équation d'équilibre (I-2). Dans les milieux poreux secs la conductivité de la phase gazeuse est souvent négligeable [BRA75]. La convection se produit dans les pores occupés par le gaz ou le liquide. Dans le milieu poreux, la convection est supposée négligeable en raison de la petite taille des pores [BRA75, CLY06, NAI05, BON03]. A température ambiante et pression atmosphérique, le diamètre des pores auquel la convection doit être prise en compte est d'environ 10 mm [CLY06, NAI05]. Le rayonnement se produit lorsque la chaleur des particules est convertie en une forme d'onde qui se déplace à travers des pores. Les rayons peuvent être réfléchis ou absorbés sur la surface du pore. Dans les milieux poreux, le rayonnement devient important à des températures élevées [BRA75]. Le transfert de chaleur par rayonnement est jugée significative à des températures supérieures à 403°K (~130°C) [HIL59]. En revanche, selon Helte [HEL93], la radiation est non-

négligeable pour des matériaux présentant un taux élevé de porosité et des tailles de pores supérieures à 100 microns.

Le changement de phase liquide – vapeur désigne les phénomènes d'évaporation et de condensation de la vapeur d'eau dans les pores. Le changement de phase liquide – vapeur en milieux poreux a notamment été étudié en relation avec les problèmes de séchage, de géothermie, d'évaporateurs, d'environnement (câbles électriques de forte puissance enterrés, stockage des déchets radioactifs...), d'améliorations des échanges par revêtement poreux ou encore de sûreté nucléaire [BOR08-2]. Ce phénomène intervient dans l'évolution des conditions thermodynamiques des fluides saturant l'espace des pores avec la prise en compte de la dépendance de la conductivité thermique du matériau en fonction de la saturation, de l'énergie associée au changement de phase et de la diffusion massique de la vapeur d'eau au sein du milieu poreux. Nous renvoyons à [BOR08-2] pour plus de détails sur l'influence du phénomène de changement de phase dans le transfert thermique.

Plusieurs études existantes [CLY06, OCH08, GHO08, DAR10, NAI05, BON03] considèrent que le transfert thermique dans un matériau poreux ne se compose que de la conduction dans la phase solide et le rayonnement dans les pores. Une approche simplificatrice décrivant ce problème de transfert couplé dans les milieux poreux consiste à remplacer le couple conduction rayonnement par un transfert par conduction seule ayant une conductivité thermique équivalente. La conductivité thermique effective définit la quantité de flux de chaleur produit en tant que l'ensemble de la conduction et du rayonnement sous le gradient unitaire de température. Le flux thermique de rayonnement est donné par :

$$\vec{\varphi}_r = \lambda_r \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (\text{I-8})$$

où la conductivité thermique de rayonnement β_r est fonction de T^3 . L'équation de l'énergie se transforme à :

$$\lambda^{eq} \nabla^2 T = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{I-9})$$

$$\text{avec } \lambda^{eq} = \lambda + \lambda_r$$

I.2.3 Mesure des propriétés thermiques

Ce paragraphe présente les méthodes de mesure des principales propriétés thermiques d'un solide: conductivité thermique, chaleur massique et diffusivité thermique. Ces propriétés permettent, avec les propriétés physiques du matériau ou la géométrie de la structure, de connaître les autres propriétés thermiques comme la résistance thermique, le coefficient de transmission surfacique ou l'effusivité thermique. L'ensemble de ces propriétés caractérise la performance thermique du matériau.

Il existe plusieurs méthodes de mesure des propriétés thermiques des matériaux. D'après Degiovanni [DEG94], la classification la plus naturelle se fait en deux grands groupes : les méthodes de mesure en régime permanent et les méthodes de mesure en régime variable (ou transitoire). Dans les premières, le temps n'intervient pas. Ces méthodes permettent uniquement de mesurer la conductivité thermique. Dans les secondes, les mesures sont effectuées en fonction du temps et permettent l'identification des trois paramètres : conductivité, chaleur spécifique et diffusivité.

Les méthodes en régime permanent sont complexes en raison des appareillages compliqués, des conditions de mesure strictes et du long temps nécessaire pour établir un gradient de température permanent traversant

l'échantillon [FRA07]. Les méthodes en régime variable sont actuellement les plus utilisées. Elles consistent à appliquer sur un échantillon à l'équilibre une perturbation thermique, et à mesurer une ou plusieurs températures (ou flux) en fonction du temps. Nous présentons dans la suite les techniques de mesure les plus fréquentes dont une en régime permanent, la technique de plaque chaude gardée, et deux en régime transitoire, les techniques du fil-chaud et du Hot-disk.

Méthode de la plaque chaude gardée

Parmi les méthodes en régime permanent, la plaque chaude gardée (ISO 8302) est la plus précise techniquement pour mesurer la conductivité thermique des isolants et des matériaux de faible conductivité thermique [SAL01]. Le système est symétrique avec 2 échantillons et 2 plaques froides (Figure I-1). Dans cette méthode, on utilise un anneau de garde pour empêcher la fuite de chaleur latérale aux bords des échantillons. Le flux de chaleur est alors obtenu directement par la mesure de la puissance dégagée dans l'enroulement principal de la plaque chauffante [DEG94].

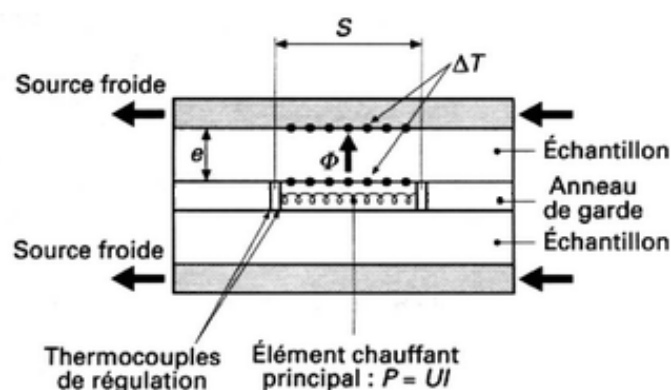


Figure I-1 : Principe de la méthode de la plaque chaude gardée

Méthode du fil chaud

À l'origine, cette méthode a été proposée par Carslaw et Jaeger [CAR59] pour la mesure des conductivités des liquides, puis elle a été étendue aux solides isolants à hautes températures [DEG94].

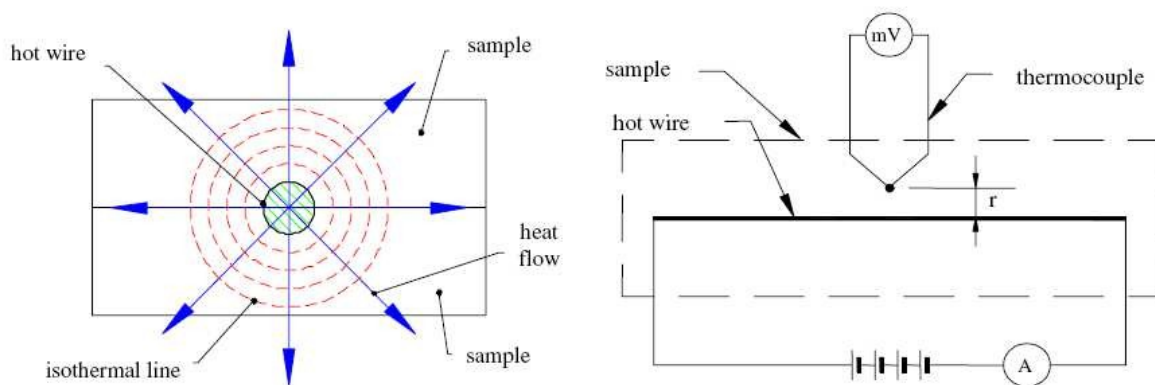


Figure I-2 : Principe de la méthode du fil chaud [FRA07]

C'est une méthode de mesure en régime transitoire qui est basée sur une source linéaire de chaleur de longueur infinie et de diamètre infinitésimal, le fil chaud [FRA07]. Il est installé entre deux éprouvettes qui sont rainurées pour assurer un bon contact entre les éprouvettes. Au moment de la mesure, un courant de puissance constante est produit dans la source de chaleur. Simultanément, on relève la variation de température du fil, soit par un couple thermoélectrique soit directement par la mesure de la résistance du fil [FRA07], [DEG94]. L'élévation de la température du fil chaud est fonction de la conductivité thermique du matériau entouré. La connaissance de cette valeur fournit la conductivité thermique.

Franco [FRA07] a proposé une variation de la méthode du fil chaud en remplaçant une des deux éprouvettes par un isolant. Le fil chaud est utilisé comme une sonde thermique pour éliminer la non-homogénéité locale du

matériau. De plus, un autre thermocouple est ajouté pour assurer une bonne précision.

Méthode de Hot-disk

La méthode du Hot-disk est, comme les autres techniques de sondes thermiques, une extension de la méthode fil chaud. C'est une technique de source plane transitoire (TPS) développée pour effectuer des mesures sur des matériaux de propriétés thermiques très variées. L'élément Hot-disk (appelé élément TPS) est souvent utilisé à la fois comme la source de chaleur et la sonde thermique. Il est placé entre deux échantillons du matériau à étudier. Gustavsson [GUS91] a évalué que la distance entre la sonde et le bord le plus proche de l'échantillon doit être inférieur à la profondeur de propagation Δ_p définie par :

$$\Delta_p = \beta \sqrt{a t_{max}} \quad (I-10)$$

où β est une constante choisie selon l'exactitude souhaitée, a désigne la diffusivité thermique et t_{max} la durée totale de l'expérience. Δ_p représente la distance sur laquelle l'impulsion de chaleur s'est propagée dans l'échantillon pendant la durée t_{max} [GUS94].

Dans le cas où l'on utilise l'élément TPS, on mesure la résistance de la sonde à partir du changement du voltage à travers celui-ci pendant l'impulsion de chaleur. L'élément TPS qui a une résistance plus grande qu'un thermocouple indépendant rend la mesure plus simple à mettre en œuvre [DEG94]. L'augmentation de température est déterminée selon la relation entre la résistance courante $R(t)$ et la résistance initiale R_0 de la sonde [GUS91] :

$$R(t) = R_0(1 + \alpha \overline{\Delta T(\tau)}) \quad (\text{I-11})$$

où β est le coefficient de température de la résistance et $\overline{\Delta T(\tau)}$ la moyenne de l'augmentation de température de l'élément TPS. Pendant l'impulsion, on considère que $\overline{\Delta T(\tau)}$ ne dépend que du temps. Ce changement de température est donné par :

$$\overline{\Delta T(\tau)} = \frac{P_0}{\pi^3 2r\lambda} D(\tau) \quad (\text{I-12})$$

où P_0 est la puissance constante délivrée, β est la conductivité thermique de l'échantillon, r est le rayon de l'élément TPS et $D(r)$ est l'expression théorique d'une variable dépendante du temps, qui décrit le modèle de conduction de l'élément Hot-disk.

$$D(t) = [m(m+1)]^2 \int_0^\tau S^{-2} \left[\sum_{l=1}^m l \sum_{k=1}^m k \exp\left(\frac{-l^2+k^2}{4m^2s^2}\right) J_0\left(\frac{lk}{2m^2s^2}\right) \right] ds \quad (\text{I-13})$$

où J_0 est une fonction de Bessel modifiée et m est le nombre de cercles concentriques de la sonde. τ est un paramètre fonction du temps t , du rayon r de l'élément TPS et de la diffusivité thermique a de l'échantillon. Il est calculé par :

$$\tau = \left(\frac{t}{\theta}\right)^{1/2} \quad \text{avec } \theta = \frac{r^2}{a} \quad (\text{I-14})$$

où θ désigne la durée caractéristique de l'expérience.

Lorsque la durée de l'expérience t_{\max} est approximativement égale à la durée caractéristique θ , la profondeur de propagation est égale au rayon de la sonde $\Delta p = \tau$ et le paramètre τ tend vers 1. La fonction $D(\tau)$ peut être approximativement déterminée. La connaissance de la valeur de l'augmentation de température permet donc d'estimer la conductivité thermique du matériau mesurée à partir de l'équation (I-12) [GUS91].

A partir du moment où la durée de l'expérience t_{\max} dépasse la durée caractéristique τ , le gradient thermique dans l'échantillon devient constant. La chaleur spécifique dépend alors linéairement du temps [GUS94]:

$$\Delta T \overline{(\tau)} = \frac{P_t}{c_p} \quad (\text{I-15})$$

où P est la puissance de sortie. Cette relation permet d'estimer la chaleur spécifique du matériau. La diffusivité thermique est ensuite calculée à partir de l'équation (I-3).

I.3 Propriétés Des Granulats Légers

Le granulats légers est défini par sa masse volumique inférieure ou égale à 2000 kg/m^3 (Eurocode 2 – 1992). Selon l'origine des granulats, ils sont classifiés en granulats naturels et granulats artificiels. Les caractéristiques de ces granulats sont décrites dans les ouvrages d'Arnould et Virlogeux [ARN86], de Neville [NEV00] ou Chandra [CHA02]. Les descriptions et les caractéristiques des granulats sont également fournies par les fabricants.

I.3.1 Classification

Les granulats légers naturels sont presque tous d'origine volcanique, à l'exception des diatomées. On trouve dans cette catégorie la pierre ponce, les diatomites, les cendres volcaniques et le tuf (Figure I-3). Les granulats naturels ne sont pas très utilisés car ils ne se trouvent que dans certaines régions du monde.



Pierre ponce



Diatomite

Figure I-3 : Granulats légers naturels[Ke08]

Les granulats artificiels ont subi un procédé industriel qui comprend des modifications thermiques conduisant à l'expansion. Nous pouvons subdiviser ces granulats en deux catégories : les produits artificiels issus de matières premières naturelles et les sous-produits industriels. Les principaux granulats légers qui sont fabriqués à partir des matières premières naturelles sont l'argile expansée, le schiste expansé, la perlite expansée, le laitier expansé (Figure I-4). Ils sont obtenus par l'expansion des matières premières dans un four après chauffage jusqu'au point de fusion (1000 - 1200°C). Pour l'argile expansée et le schiste expansé, la mise en forme des granules est souvent réalisée par moulage ou concassage avant calcination, mais il est également possible d'obtenir les granulats par concassage après expansion des matières premières. Les granules sont chauffés dans un four rotatif afin d'initier la fusion (1000° à 1200°C). Les gaz dégagés au cours de l'élévation de température produisent l'apparition de pores millimétriques puis l'expansion du matériau.



Argile expansée



Schiste expansé



Perlite expansée



Laitier expansé

Figure I-4 : Différents granulats légers artificiels[Ke08]

Neville [NEV00] a indiqué dans son ouvrage que l'expansion peut également être obtenue par frittage. Dans ce cas, le matériau humidifié est transporté sur une grille mobile sous des brûleurs, de sorte que la cuisson pénètre dans toute l'épaisseur. Le produit fini obtenu après refroidissement a une masse volumique beaucoup plus faible que les matières premières naturelles grâce à sa structure poreuse.

Les granulats légers issus des sous-produits industriels utilisés pour le béton de structure sont les cendres volantes, le laitier expansé et le laitier de haut fourneau. Pour fabriquer des granulats à base de cendres volantes, des agglomérats de cendres volantes sont humidifiés pour avoir une bonne adhérence. La teneur en eau optimale est comprise entre 20 et 25% [CHA02]. Par la suite, ils sont transformés en boulettes dans un moulin à boulettes ou par

extrusion. Ils sont calcinés par frittage dans un four à grille mobile, à une température d'environ 1150 à 1200°C. Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. En refroidissant lentement à l'air, il devient un matériau cristallin et compact, connu sous le nom « laitier refroidi à l'air ». En le refroidissant et le traitant au moyen de jets d'eau, on obtient un matériau plus léger, appelé « laitier expansé ». Le laitier expansé doit être concassé pour former les grains. Une autre forme du laitier de haut fourneau est le « laitier expansé bouleté ». Pour le fabriquer, le laitier fondu contenant des bulles de gaz est projeté à travers un jet d'eau pour former des boulettes.

Les bétons de granulats légers étudiés dans le cadre de ces travaux sont les bétons de schiste expansé, d'argile expansée, de pierre ponce.

I.3.2 Composition chimique des granulats légers

Le Tableau I-2 présente les compositions chimiques de l'argile expansée, du schiste expansé et de la pierre ponce indiquées par différents fournisseurs de granulats et auteurs.

Granulats	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O - Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	S
Argile expansée [ARN86]	50-65	16-20	5-9	1-4	1,5-3,5	1,5-4,5	0-1,5	-	0-1,5
Argile expansée (Argex)	59,5	17	14,3	2	1,5	3,5	-	0,9	1
Schiste expansé (GEM)	63	21	8,5	0,5	1	5,1	0,02	-	0,02
Ponce (Soylu)	60-75	13-17	1-3	1-2	-	7-8	trace	trace	
Ponce (Grec)	71,91	12,66	1,13	1,46	0,32	7,75	0,03	-	-

Tableau I-1: Compositions chimiques des granulats légers

Les produits expansés à base d'argile et de schiste présentent des caractéristiques très similaires. Bien que les matières premières soient différentes, les compositions chimiques de ces granulats sont voisines [ARN86]. La composition chimique de ces deux granulats est dominée par la silice, l'alumine et l'oxyde ferrique ; s'ajoutent des petites quantités de chaux, de magnésie et autres minéraux. La pierre ponce est une sorte de mousse de verre volcanique qui n'a pas de structure cristallisée. Par rapport à l'argile expansée et au schiste expansé, la pierre ponce contient plus de silice et moins d'alumine. La teneur de l'oxyde ferrique est négligeable mais celles de l'oxyde de sodium et de potassium sont assez élevées.

I.3.3 Résistance des granulats légers

Il existe plusieurs essais permettant de caractériser la résistance des granulats légers.

- L'essai d'écrasement au pot mis au point par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) caractérise la résistance conventionnelle des grains [ARN86]. Le principe de l'essai a été repris par la norme européenne EN 13055-1 pour mesurer la résistance à l'écrasement en vrac.

Les différentes résistances sont définies de la façon suivante. Pour la résistance à l'écrasement en vrac qui découle de l'essai au pot, un échantillon de granulats compactés par vibration est comprimé, à l'aide d'un piston, dans un cylindre de 100 mm de hauteur et de 175 à 200 cm² de section. La vitesse d'enfoncement du piston est de 0,2 mm par seconde et l'essai est terminé lorsque l'enfoncement du piston atteint 20 mm. La résistance conventionnelle des grains en N/cm² est définie par le quotient de la force f nécessaire pour obtenir l'enfoncement de 20 mm du piston par section du cylindre. Les valeurs

des résistances de certains granulats légers caractérisées selon ce principe sont présentées dans le Tableau I-2.

Granulat	Nature	Résistance conventionnelle (MPa)	Granulat	Nature	Résistance conventionnelle (MPa)
Leca 3/8	Argile	9,0	Argi 16 (4/10)	Argile	7,8
Argi 16 (4/12)	Argile	8,3	Argi 16 (4/20)	Argile	5,3
Isol « s »	Argile	5,9	Argi 16 (10/25)	Argile	3,3
Surex 675	Schiste	10,6	Leca 3/16	Argile	3,1
Galex 3/8	Laitier	3,9	Leca 10/25	Argile	2,5

Tableau I-2. Résistances conventionnelles (essai d'écrasement au pot) des granulats légers [ARN86]

Pour la résistance à la pression hydrostatique obtenue par l'essai de compression hydrostatique, un granulat léger est mis en place dans une enceinte plastique très déformable, qui est placée à l'intérieur du bain d'huile de la presse. Cette huile est mise en pression, par étapes, jusqu'à l'écrasement du granulat léger en triple étreinte, qui se manifeste par une brusque chute de pression. La résistance du grain est alors caractérisée par la pression de rupture.

L'essai de résistance à la traction consiste à placer un mince fil d'acier autour d'un granulat léger et à exercer une traction croissante, jusqu'à ce que le grain soit coupé en deux. La résistance du grain est caractérisée par le rapport de la force de traction à rupture à la surface de la boucle que forme le fil d'acier autour du grain.

Morin [MOR76] a effectué des essais directs de traction et compression sur des grains d'argile expansée de « grande » dimension 20 mm. Les extrémités d'un grain de forme ellipsoïdale sont enrobées dans des pré-embases de mortier, ces dernières transmettent aux granulats les efforts qui leur sont

directement appliqués. Des résistance de traction et compression respectivement égales à 2 et 10 MPa ont été mesurées.

Pour chaque méthode de mesure, des formules empiriques entre la résistance et la masse volumique ont été définies [ARN86]. Le Tableau I-6 compare les résistances des granulats légers obtenues par ces différentes formules. On observe des écarts de valeurs significatifs entre ces différentes prédictions.

Résistances des granulats légers (MPa)					
d_v	f_{gpot 1}	f_{gpot 2}	f_{eg 1}	f_{eg 2}	f_{tg}
0,4	--	2,87	33,12	20,20	1,28
0,5	3,35	6,97	52,72	40,40	1,99
0,6	10,05	11,07	72,32	60,60	2,69
0,7	16,75	15,17	91,92	80,80	3,40
0,8	23,45	--	111,52	101,00	4,11

d_v : densité en vrac ;

f_{gpot 1} : résistance en compression au pot déterminée par la relation empirique suivante $f_{gpot 1} = 67 (d_v - 0,45)$ avec $0,45 < d_v < 0,82$

f_{gpot 2} : résistance en compression au pot déterminée par la relation empirique suivante $f_{gpot 2} = 41 (d_v - 0,33)$ avec $0,38 < d_v < 0,73$

f_{eg 1} : résistance à la compression hydrostatique grains pris individuellement $f_{eg 1} = 107,8 (1,82 d_v - 0,42)$

f_{eg 2} : résistance à la compression hydrostatique grains par lots $f_{eg 2} = 202 (d_v - 0,30)$

f_{tg} : résistance à la traction au fil : $f_{tg} = 3,9 (1,82 d_v - 0,40)$

Tableau I-3. Résistances de granulats légers en fonction de leurs densités

[Ke08]

Outre ces essais, Nilsen et al. [NIL94] ont proposé une nouvelle façon d'évaluer la résistance à la compression et le module d'Young à partir de la dissipation d'énergie spécifique de béton de granulats léger mesurée au cours d'un cycle de charge/décharge en compression. Avec cet essai cyclique, on mesure la dissipation d'énergie spécifique ($\Delta W/W$) du béton de granulat léger où ΔW est l'énergie dissipée par l'échantillon pendant un cycle d'effort et W est l'énergie élastique stockée dans l'échantillon obtenue pour la déformation maximale. La forte corrélation observée entre la dissipation d'énergie spécifique ($\Delta W/W$) et les propriétés mécaniques des granulats légers peut permettre une évaluation des propriétés mécaniques des granulats légers.

L'essai d'écrasement au pot du LCPC reste le seul utilisé de façon courante. Il est malgré tout assez contestable du fait de sa sensibilité à la structure des grains et à la manière dont les gains se mettent en place lors du compactage. L'essai de compression hydrostatique des grains ou l'essai de rupture par étreinte à l'aide d'une boucle de fil d'acier donnent des résultats corrélables entre eux et un classement des granulats nettement plus satisfaisant. Malheureusement, ces essais ne peuvent être exécutés que dans des laboratoires très spécialisés. L'essai de charge/décharge montre seulement une corrélation entre la dissipation d'énergie spécifique ($\Delta W/W$) et les propriétés mécaniques des granulats légers, mais ne permet pas de quantifier la résistance du granulat. Par ailleurs, cette méthode ne tient pas compte des différentes qualités d'interfaces pâte/granulats qui influencent aussi la dissipation d'énergie.

I.3.4 Propriétés physiques des bétons de granulats légers

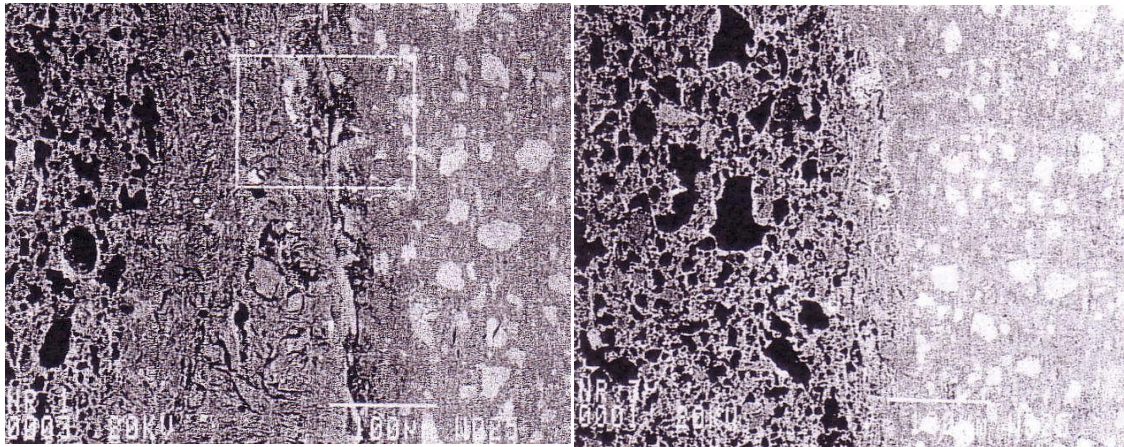
Nous nous intéressons maintenant aux propriétés physiques des bétons de granulats légers et plus spécifiquement aux propriétés de la liaison

pâte/granulat léger, à la masse volumique, à la maniabilité et au mûrissement des bétons.

Interaction des granulats avec la matrice cimentaire

Dans le cas de granulats classiques, des études physico-chimiques ont permis de mettre en évidence l'existence d'une auréole de transition au niveau de la liaison de la pâte de ciment et des granulats. Cette zone de transition, qui influence le comportement des bétons, se caractérise par une première couche très compacte et de texture très fine fixée au granulat et une deuxième couche très poreuse, de cohésion faible avec une orientation préférentielle des cristaux bien formés sur des distances importantes. La seconde couche, en raison de sa faible résistance mécanique due à la présence de cristaux de grandes dimensions facilement clivables et par suite de sa forte porosité, constitue le point faible des bétons soumis à des actions mécaniques [BAR82]. En effet, dans le cas des granulats classiques, à cause des effets de parois localisés, une certaine quantité d'eau de ressuage s'accumule à la surface des gros granulats. Par conséquent, le rapport eau sur ciment plus élevé à l'interface explique la plus grande porosité de cette zone dont la taille varie, d'après les auteurs, entre 50 et 100 μm pour les graviers [LO04-1].

L'épaisseur et la porosité de la zone de transition dépendent des échanges d'eau à l'interface pâte-granulat, c'est-à-dire des capacités d'absorption des granulats. Les granulats possédant une enveloppe extérieure de coque épaisse et dense présentent une zone de transition se rapprochant de celle des granulats normaux avec de large cristaux de porlandite et des aiguilles d'ettringite [ZHA90-1], (Figure I-6). Les études de Sarkar et al. confirment ces résultats [SAR92].



(a)

(b)

Figure I-5. Zone de transition entre un granulat d'argile expansée et la pâte de ciment.

(a) Granulat à coque épaisse et dense ; (b) Granulat à coque de faible épaisseur [ZHA90-1].

En mesurant un rapport calcium/silice par analyse chimique (EDX), plus élevé que celui de la matrice (au jeune âge), caractérisant une zone riche en portlandite, Wasserman et Bentur ont montré que la largeur de la zone de transition diminue linéairement lorsque l'absorption augmente [WAS96].

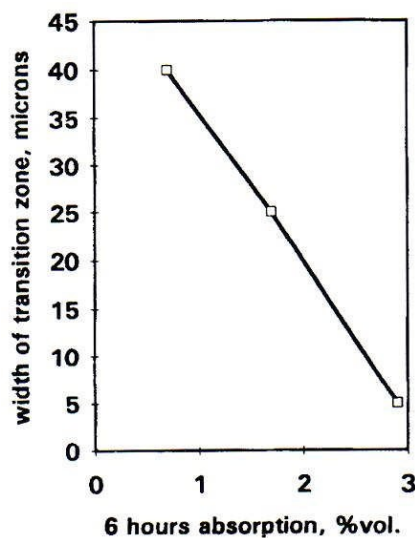


Figure I-6. Largeur de la zone de transition au jeune âge en fonction de l'absorption du granulat de cendres volantes [WAS96]

Des mécanismes d'interaction physique, chimique et mécanique, que nous nous proposons d'examiner maintenant, expliquent cette meilleure qualité d'interface.

Plus les granulats absorbent de l'eau, moins l'eau s'accumule dans la matrice fraîche à proximité du granulat. En conséquence, la zone de transition devient moins poreuse et plus dense. Ainsi, pour des granulats légers d'égale résistance, le béton le plus résistant est obtenu avec les granulats possédant la plus forte absorption. L'absorption d'eau dépend toutefois du degré de saturation initiale des granulats. Ainsi ce processus physique d'absorption d'eau est responsable au jeune âge (1 jour) d'une amélioration de 25% de la résistance des bétons pour une augmentation de la capacité d'absorption des granulats de 200% [WAS96].

Fagerland et Khokhrin affirment que la zone de transition peut être plus dense que la matrice, et donc plus résistante (cités par [ZHA90-1]). Le rôle de filtre joué par les granulats légers diminue le rapport E/C au voisinage des granulats par rapport au reste de la matrice. Fagerland et Khokhrin relève une valeur de micro-dureté de 9 à 15 MPa sur une distance de 60 μm autour du granulat et de 6 à 8 MPa au-delà. Elsharief et al. complètent ces études en quantifiant la porosité autour des granulats à l'aide d'analyse d'images obtenues par BSE (électrons rétrodiffusés) [ELS05].

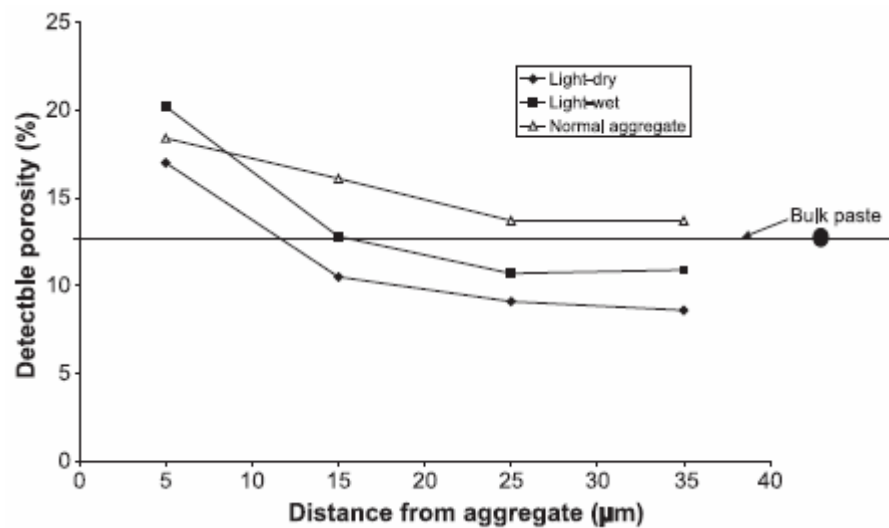


Figure I-7. Évolution du pourcentage de porosité en fonction de la distance à la surface de granulat [ELS05]

Deux zones se distinguent sur cette figure : la zone la plus proche du granulat présente une porosité plus importante que celle du reste de la matrice sur environ 10 µm ; au-delà et jusqu'à environ 50 µm la porosité est à l'inverse plus faible. La quantité d'eau de ressuage est plus élevée à la surface du granulat et diminue lorsque la distance au granulat augmente. L'absorption d'eau par les granulats va créer un déplacement d'eau de la pâte vers ces derniers. La quantité d'eau par rapport à celle de la pâte reste en excès sur les 10 premiers microns de l'interface mais, au-delà sur une distance d'au moins 40 µm le rapport E/C devient plus faible que le rapport E/C de gâchage. La pâte située entre 10 et 50 µm du granulat est donc plus dense que le reste de pâte. La diminution de porosité dépend des capacités d'absorption des granulats. Les granulats immergés 24h avant gâchage absorbent encore de l'eau et présentent le même processus physique que les granulats secs avec toutefois une plus faible intensité.

Structure poreuse des granulats légers et capacité d'absorption d'eau

Les granulats légers peuvent être considérés constitués d'un squelette solide et de l'espace poreux. Cet espace poreux existe sous deux formes dans le granulat léger : les pores ouverts et les pores fermés. Certains pores sont à l'intérieur du granulat, d'autres s'ouvrent à la surface libre. Comme les granulats légers contiennent des pores ouverts et interconnectés, l'eau peut rentrer à l'intérieur de ces pores. Par contre, les pores fermés sont isolés et ne participent évidemment pas à la pénétration de l'eau. Le volume et la vitesse de pénétration de l'eau dépendent principalement de la taille, la distribution, la connectivité et le volume des pores [NEV00], [CLA93]. Parallèlement, l'eau peut être conservée sur la surface libre du granulat. Un granulat humide peut donc avoir différentes teneurs en eau. La connaissance de l'état hydrique et des capacités d'absorption des granulats est indispensable pour maîtriser la formulation des bétons [NGU13]. Les échanges d'eau entre la pâte de ciment et les granulats légers sont plus importants que pour les granulats naturels.

La porosité d'un granulat, sa perméabilité, son absorption influencent la maniabilité et la masse volumique du béton frais ; elles affectent également des propriétés du béton durci comme la masse volumique, la résistance thermique, la résistance au feu, le lien entre les granulats et la pâte de ciment, la résistance du béton au gel et au dégel. Pour tous les granulats, l'absorption d'eau décroît en fonction du temps [NEV00], [CLA93].

Neville [NEV00] a souligné que l'utilisation d'un matériau en boulette (mise en forme avant expansion) conduit à obtenir des granulats avec une structure poreuse entourée d'une coquille lisse ou d'un revêtement de 50 à 100 μ m d'épaisseur. Ces granulats présentent une absorption d'eau beaucoup plus faible et ils sont plus faciles à manipuler et à mélanger. Cette structure poreuse

de granulats a été observée au microscope binoculaire par Ke [KE08] sur des granulats d'argile expansée et de schiste expansé.

L'absorption d'eau est souvent déterminée par la proportion de masse d'eau absorbée sur la masse des grains secs après 30 minutes d'immersion et après 24 heures d'immersion. Zhang et Gjorv [ZHA91-1] ont examiné l'absorption de certains granulats légers à base d'argile. Après les 30 premières minutes d'immersion, l'absorption d'eau varie entre 8 et 13%, la majorité étant absorbée dans les 2 premières minutes. A la fin des 30 premières minutes, plus de la moitié de l'absorption à 24 heures a été observée. L'absorption des granulats légers après 24 heures d'immersion mesurée par ACI [ACI03] se situe entre 5 et 20% tandis que Clarke [CLA93] a donné un intervalle de 5 à 15% pour cette capacité. Ces valeurs sont largement supérieures à l'absorption des granulats ordinaires (entre 0,5 et 2%). Cependant, l'absorption varie selon la nature des granulats. Certains granulats atteignent une valeur d'absorption d'eau élevée, comme par exemple la pierre ponce, dont l'absorption d'eau varie entre 30 et 40%. Cela peut être expliqué par la porosité élevée de la pierre ponce, de 75 à 88% qui comprend à la fois des pores de taille microscopique (10-20 μ m) qui sont presque sphériques et des grandes cavités, dont plus de 90% sont interconnectées [KLU02].

Considérons l'absorption d'eau des granulats légers testés par Ke [KE08]. A l'exception des granulats d'argile expansée 0/4 650A, l'absorption d'eau des autres granulats légers ne dépasse pas l'intervalle estimé ci-dessus. La valeur élevée d'absorption d'eau des 0/4 650A (23,5% à 30 mn et 26,5% à 24h) est expliquée par leurs petites tailles qui augmentent la surface spécifique et ainsi le nombre des capillaires ouverts vers l'extérieur. L'absorption d'eau des granulats à base d'argile est de 11,6% et 13,4% à 30 minutes (respectivement pour les granulats 4/10 430A et 4/10 550A), et de 15,8% et 21% à 24h. Les

granulats de schiste absorbent 2 à 4 fois moins d'eau que les granulats d'argile. L'absorption de ces granulats de schiste (4/10 520S, 4/10 675S et 4/8 750S) varie entre 4,9% et 6,3% à 30 minutes, et entre 6,9% et 9,2% à 24 heures.

Les travaux de Lo et al [LO08] n'ont à l'inverse pas mis en évidence de zone plus dense que la matrice à proximité du granulat. A partir d'analyse d'images prises au microscope optique, ils quantifient la porosité à l'interface sur une largeur de 30 et 50 μm pour 3 granulats d'argile expansée, possédant des coefficients d'absorption à 1h de 8,9% (type I) ; 9,6% (type II) et 11% (type III). Pour trois bétons testés de E/C différents 0,4 ; 0,44 et 0,48, la porosité à l'interface (30 et 50 μm) est le double de celle de la pâte de ciment, (Figure I-9).

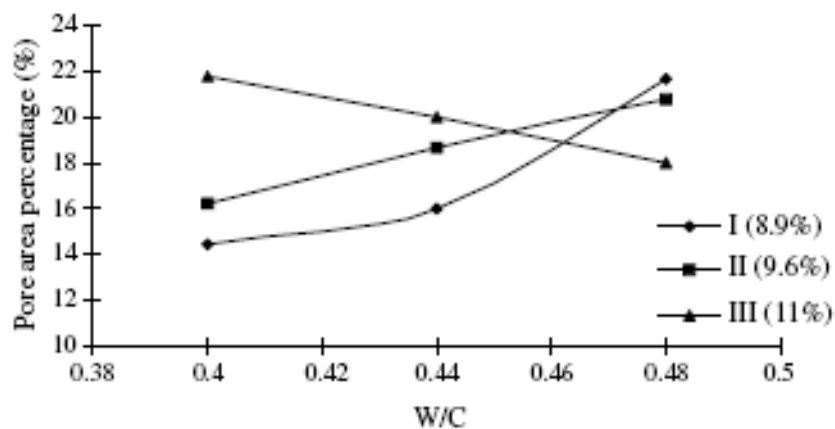


Figure I-8. Influence de l'absorption d'eau des granulats légers sur la porosité de la zone interfaciale [LO08]

La Figure I-9 montre que pour de faible rapport E/C (0,4), la porosité dans la zone de transition est plus élevée pour le granulat le plus absorbant, la tendance s'inversant lorsque E/C augmente. Les auteurs supposent qu'un déficit d'hydratation des grains de ciment explique la plus forte porosité observée pour le granulat le plus absorbant.

Tous les auteurs soulignent la difficulté d'obtenir des résultats

globalement représentatifs d'un type de granulat du fait des variations locales d'épaisseur et de densité que présente l'enveloppe extérieure d'un grain. La variabilité des résultats dans la littérature peut aussi s'expliquer par les âges différents auxquels sont réalisées les mesures ou les observations de la porosité. En effet, la densité de la pâte augmente avec l'âge aussi longtemps que les grains non hydratés continuent à former des produits d'hydratation. Cette hydratation tend à réduire la dimension et le volume des vides, spécialement dans la zone de transition. Ainsi, l'eau absorbée par les granulats au moment du malaxage devient disponible avec le temps pour hydrater les grains de ciment qui ne l'étaient pas encore complètement, diminuant ainsi la porosité à l'interface matrice / granulat [NEV00].

Outre le processus physique d'absorption d'eau, un processus chimique apparaît à long terme au delà de 28 jours. Wasserman et Bentur [WAS96] ont observé deux types de phénomènes : la réaction pouzzolanique entre le granulat et la solution alcaline qui pénètre dans les pores du granulat (formation de C-S-H) et le phénomène « d'imprégnation » entraînant un dépôt de portlandite (CH) dans les pores de surface des granulats. Plus les granulats ont une capacité d'absorption élevée et une porosité de surface importante plus ce dernier phénomène est important. Ces phénomènes chimiques contribuent à augmenter la densité de la zone de transition et par conséquent à améliorer la résistance en compression à long terme des bétons de granulats légers (à base de cendres volantes frittées par exemple) [WAS97]. Sarkar et al. [SAR92] et Zhang et Gjorv [ZHA90-2] indiquent quant à eux que l'influence de la réaction pouzzolanique des granulats légers (argile expansée, cendre volantes) n'est que très limitée et peut être négligée. Cette faible réactivité des granulats s'explique par les températures très élevées (>1200°) auxquelles ils ont été soumis durant leur fabrication provoquant la recristallisation de la silice et de l'alumine et la

disparition des phases amorphes.

Enfin, un troisième mécanisme peut être avancé pour expliquer la qualité de l'interface dans les bétons de granulats légers. La pâte de ciment peut en effet venir se loger entre les rugosités et les pores à la surface des granulats légers. Il se produit alors un ancrage mécanique qui améliore l'adhérence des granulats à la pâte de ciment [ZHA90-1], [SAR92], [LO04-1], [HUS03]. L'imbrication mécanique des deux matériaux dépend de la rugosité des granulats, de la structure de l'enveloppe externe des granulats. Selon Wasserman et Bentur [WAS96], cet ancrage mécanique ressemble au phénomène d'imprégnation entraînant le dépôt de portlandite (CH) précédemment décrit. La Figure I-10 schématise ces 3 mécanismes d'interaction dans la zone de transition.

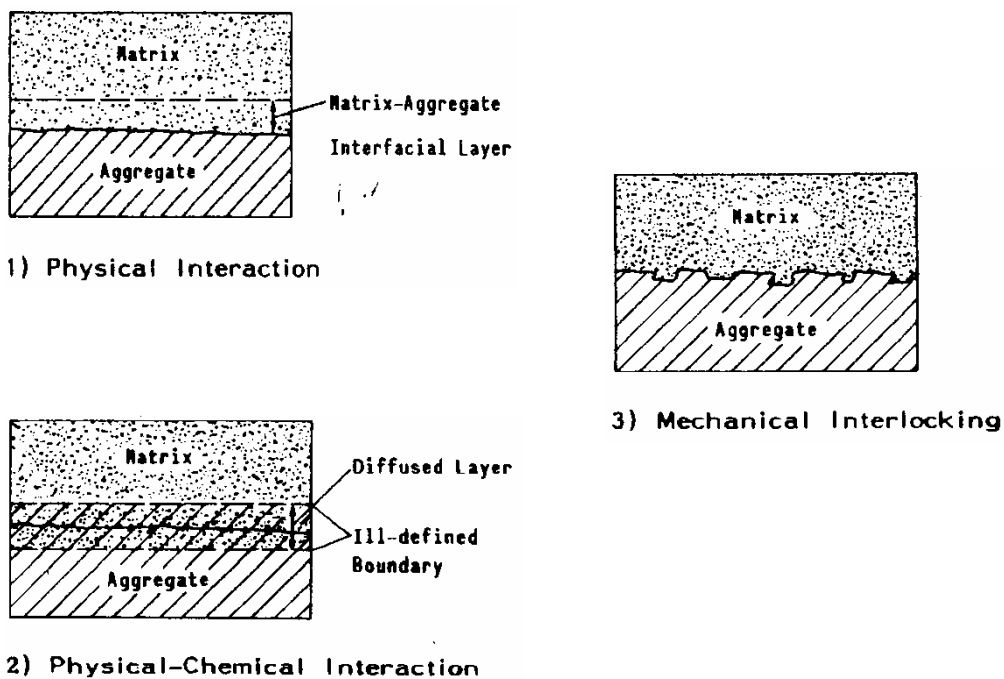


Figure I-9 : Trois mécanismes d'interaction dans la zone de transition

[ZHA90-1]

I.3.5 Maniabilité et mûrissement des bétons légers

La grande capacité d'absorption des granulats légers a une influence importante sur la maniabilité, la résistance et le mûrissement du béton. Cette influence dépend de l'état du granulat utilisé saturé et séché en surface ou bien sec.

Pour les granulats légers saturés séchés en surface, on n'observe pratiquement aucune influence sur la maniabilité. L'eau absorbée n'est par conséquent pas à prendre en compte dans le rapport eau/ciment du béton. Par ailleurs, lorsque l'hydratation du ciment fait chuter l'humidité relative dans les pores capillaires de la pâte de ciment durci, l'eau présente dans les granulats migre vers ces capillaires, rendant possible une hydratation supplémentaire. Cette situation pourrait être désignée par l'expression « mûrissement humide interne » [ZHU04], [BEN99], ce qui fait que les bétons de granulats légers sont moins sensibles à un mûrissement humide incorrect qu'un béton ordinaire [AL98], [WEB97].

En revanche dans le cas de granulats utilisés secs, l'absorption d'eau des granulats diminue la maniabilité. De plus, si le béton est vibré avant que l'absorption par les granulats légers secs ne soit terminée, des vides dus à la dessiccation se développent et, à moins que le béton ne soit revibré, sa résistance sera moins élevée [NEV00].

I.4 Généralité sur les propriétés hydro-thermiques des bétons

Le transfert thermique dans un béton est plus complexe que dans les autres matériaux parce que non seulement le béton est un matériau composite, mais de surcroît les matériaux composants le béton sont des milieux poreux. La structure du béton correspond à la topologie particulière où une phase (la matrice) en contient d'autres (pores ou inclusions). Chaque phase poreuse du

matériau est considérée comme un système d'hétérogénéités composant une matrice solide et des pores interconnectés remplis d'un fluide (liquide ou gaz). La présence des pores perméables influence fortement le transfert de chaleur. Le phénomène peut être traité à l'échelle mésoscopique correspondant à une taille d'échantillon supérieure à celle des pores ou des inclusions. Nous renvoyons à l'ouvrage de Kaviany [KAV95] pour plus de détails sur la description du phénomène de transfert de chaleur.

Les propriétés thermiques du béton sont influencées par la porosité et la structure amorphe ou cristallisée de chaque composant. Elles sont également fonction de la température et de la teneur en eau du matériau. La connaissance des propriétés thermiques est très importante pour l'utilisation des bétons d'isolation ou des bétons exposés à des chargements thermiques sévères.

I.4.1 Sensibilité des matériaux à l'humidité

Dans le béton, l'eau intervient dès la fabrication pour d'une part contribuer à la réaction chimique, et d'autre part apporter une consistance adéquate au béton frais. Après le durcissement, l'eau devient un constituant du béton. Elle continue à contribuer à la réaction pouzzolanique et joue un rôle important dans le comportement mécanique et thermique du béton. Dans le béton durci, l'eau se présente sous trois états différents :

- *L'eau chimiquement liée* contribue à l'hydratation du liant et fait partie de la structure des hydrates sous forme d'eau hydroxylique.
- *L'eau adsorbée* est physiquement liée à la surface des pores solides sous l'action de forces intermoléculaires et de forces électrostatiques. Il en existe deux formes : l'eau adsorbée à la surface des particules CSH (inter-lamellaire) et l'eau fixée entre les feuillets des particules CSH (inter-feuillet) [BAR 94] [BIL04].

- *L'eau libre* de forme l'eau capillaire est liée au solide par des forces de tension superficielles. L'eau libre existe aussi sous forme condensée dans les espaces intergranulaires et dans le volume poreux au-delà de la couche adsorbée des molécules.

Le béton durci à température et à humidité ambiantes est soumis à l'adsorption ou à la désorption en fonction de l'humidité relative de l'air. A température fixée, le nombre de molécules de vapeur d'eau adsorbées sur la surface d'un solide dans l'air humide est une fonction croissante de la pression partielle, donc de l'hygrométrie. Les énergies de liaison (d'adsorption) de ces diverses couches d'eau diminuent avec la distance au solide. L'eau est dans un état intermédiaire entre solide et liquide. Au-delà d'une certaine humidité, l'accroissement d'épaisseur de la couche adsorbée conduit à une condensation de l'eau dans les pores. C'est dans les pores les plus fins que ce phénomène est le plus important puisque ce sont eux qui présentent le rapport surface/volume le plus élevé.

Ce phénomène est étudié par le tracé des courbes de sorption. La courbe d'isotherme d'adsorption est obtenue par des mesures sur des échantillons secs et la courbe d'isotherme de désorption sur des échantillons saturés. Le principe de la mesure consiste à déterminer la teneur en eau des échantillons, en les disposant dans des ambiances de différentes humidités relatives (HR) et de température fixée. Pour chaque valeur de HR, l'équilibre thermodynamique du matériau doit être atteint pour la mesure de la teneur en eau. L'obtention de ces différentes HR peut reposer sur le principe des solutions salines saturées (cf. NF X 15-014 et 15-119) ou sur l'utilisation d'une enceinte climatique.

L'adsorption/désorption se manifeste par la formation/détachement de couches d'eau sur la surface des pores du matériau. Cela est dû à l'action des

molécules d'eau en phase gazeuse mises en contact avec la surface développée du matériau.

Selon [SIN85], les isothermes de sorption peuvent être divisées en six types illustrés par la Figure I-5a. Les courbes d'isotherme correspondant le plus aux bétons sont celles du type II et IV [HAN11], [BIL 04] [BAR 94]. Le type II correspond à un matériau non-poreux ou macroporeux. Cette isotherme est caractéristique d'une adsorption monocouche puis multicouche. Le point B indique la fin de l'adsorption monocouche et le début de l'adsorption des molécules sur la monocouche initiale (épaississement progressif de la couche adsorbée). Le type IV d'isotherme est rencontré dans plusieurs matériaux mésoporeux. Il présente une boucle d'hystérésis entre l'adsorption et la désorption qui est associée à une condensation capillaire dans les mésopores. La partie initiale est attribuée à l'adsorption monocouche- multicouche (comme dans le type II). La partie d'hystérésis apparaît lorsque l'espace poreux résiduel restant après l'adsorption multicouche se remplit par condensation. Cette phase condensée est alors séparée de la phase gazeuse par des ménisques. Quatre formes d'hystérésis peuvent se rencontrer dans les isothermes de sorption de type IV comme montré par la Figure I-5[SIN85].

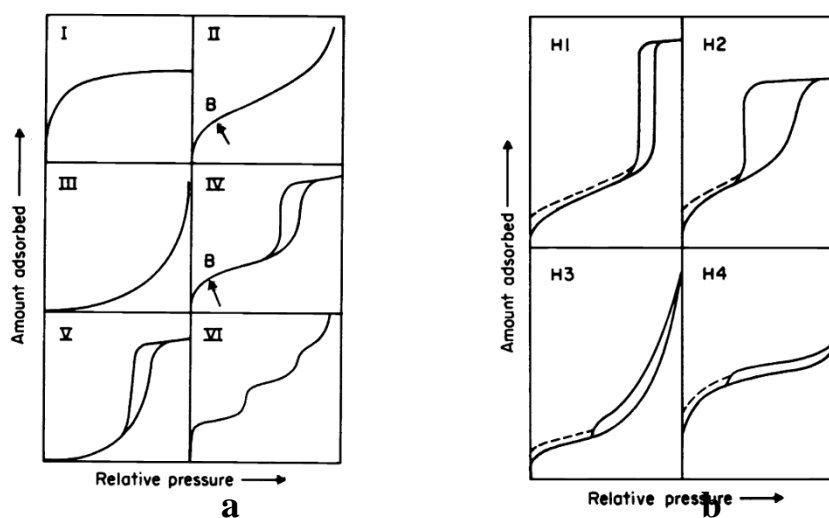


Figure I-10 : Types de courbe d'isotherme de sorption (a) et formes de l'hystérésis pour les isothermes de sorption de type IV (b) [SIN85]

Bien que les effets des divers paramètres affectant le phénomène d'hystérésis de sorption ne soient pas entièrement compris, l'hystérésis est souvent expliquée par la structure des pores et par le phénomène de condensation capillaire non-réversible, précédé d'une adsorption multicouche [GRU01]. De nombreux adsorbants poreux ont tendance à donner des boucles de type H2, mais dans de tels systèmes la distribution de la taille des pores et la forme n'est pas bien définie. D'après Baroghel-Bouny [BAR 94], le type d'hystérésis qui correspondrait aux matrices cimentaires ordinaires est le type H2. L'étude de Haniche [HAN11] a donné une courbe d'hystérésis de type H2 sur un béton à hautes performances ayant un rapport E/C de 0,36 et un dosage en ciment de 450 kg/m^3 . Néanmoins, en fonction de divers paramètres tels que le rapport E/C, les types H3 et H4 peuvent être également rencontrés. Par exemple, Ballard [BAL04] a relevé des courbes d'hystérésis de type H3 sur un béton ordinaire avec un rapport E/C de 0,64 et un dosage en ciment de 285 kg/m^3 .

I.4.2 Influence de la porosité et de la teneur en eau

La conductivité thermique du béton dépend de celles de la pâte de ciment, des granulats et de leurs proportions. La porosité et la teneur en eau influent fortement sur la conductivité thermique de la pâte de ciment et des granulats, donc sur celle des bétons de granulats légers [CHA02], [CLA93], [MIN03]. Plus la teneur en eau est élevée, plus l'eau pénètre dans les pores ouverts du béton (dans les granulats, la pâte de ciment ou à l'interface entre les granulats et la pâte de ciment). Comme la conductivité thermique de l'eau est plus élevée que celle de l'air, le transfert thermique par conduction augmente.

Mindess a présenté dans son ouvrage [MIN03] la dépendance de la conductivité thermique des bétons à leur masse volumique et teneur en eau (Figure I-6). Le matériau avec une porosité plus importante contient plus d'air et est un meilleur matériau d'isolation. Une teneur en eau de 10% conduit à une augmentation de conductivité du béton d'environ 60% pour une masse volumique de 1600 kg/m³. Cette valeur diminue avec la masse volumique.

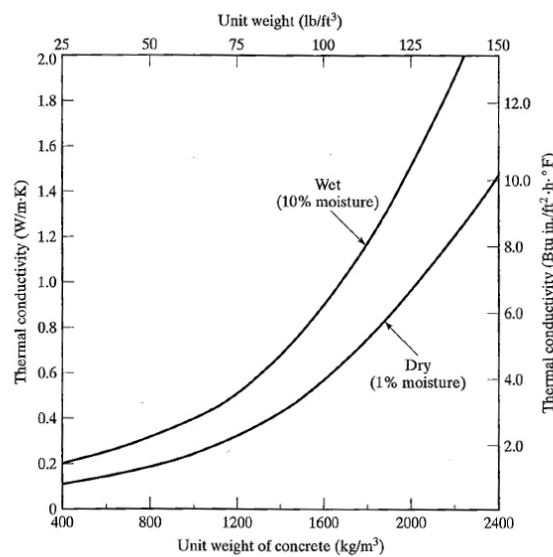


Figure I-11: Conductivité thermique en fonction de la masse volumique et de la teneur en eau des bétons [MIN03]

14.3 Influence de la température

La conductivité thermique du béton est influencée par la température [NEV00]. La conductivité thermique augmente jusqu'à la température de 50-60°C avant de diminuer fortement jusqu'aux températures 120-140°C à cause du départ de l'eau puis commence à se stabiliser. Cette observation est partagée par d'autres auteurs. L'étude de [MAR70] a montré que la conductivité thermique du béton composé de granulats siliceux (quartz) augmente avec la température ambiante et atteint un pic vers 60-80°C (Figure I-7). Kim [KIM03] a également remarqué une augmentation de la conductivité du béton ordinaire pour des températures variant de 20 à 60°C. La dépendance de la conductivité thermique du béton à la température ambiante est expliquée par la présence de l'eau dans le béton [NEV00], [MAR70]. En effet, comme la conductivité thermique de l'eau augmente avec la température, celle du béton augmente également. Le départ de l'eau libre du béton se produit avec la montée de la température jusqu'à 80°C puis l'eau adsorbée commence à s'échapper du béton. Le départ de l'eau conduit à la diminution de la conductivité thermique du béton. Cela explique l'évolution de la courbe conductivité thermique – température vers 60°C.

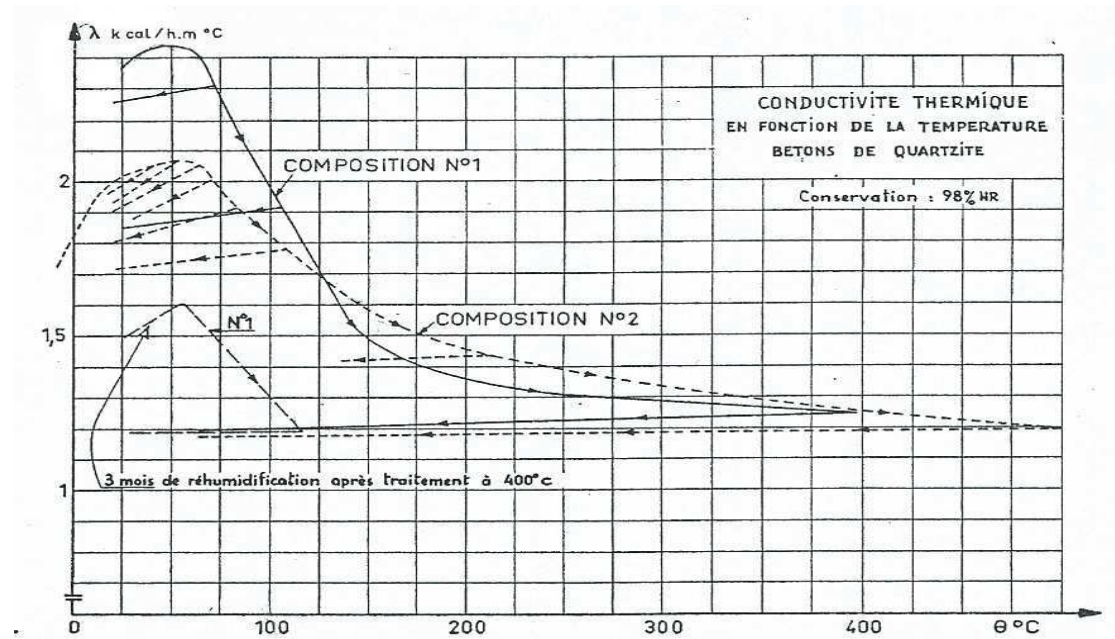


Figure I-12 : Conductivité thermique des bétons de quartz en fonction de la température [MAR70]

La chaleur massique d'un béton dépend de celles des granulats et de la pâte de ciment. Mindess [MIN03] a indiqué que la porosité (rapport E/C) et la température ont des impacts considérables sur la chaleur massique de la pâte de ciment (Tableau I-2Tableau I-3). La chaleur massique d'un béton dépend de ces facteurs ainsi que du type de granulat. La plage de valeurs pour la chaleur massique du béton ordinaire varie entre 800 et 1200 J/kg°C.

Matériau	Rapport e/c	Température	Chaleur massique
Pâte de ciment	0,25	21	1140
		65	1680
	0,60	21	1600
		65	2460
Béton	-	-	800 - 1200

Tableau I-4: caractéristique du béton à différents rapports E/C

Jusqu'à présent, les études thermiques sur les bétons concernent plutôt soit le béton ordinaire à température ambiante [KIM03], soit le comportement à haute température du béton ordinaire [HAN11],[MAR70] ou du béton léger [ALS12],[OTH11]. En général, l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température est conforme à la description précédente. L'étude du comportement thermique du béton léger à la température ambiante est encore très limitée.

I.5 Propriétés thermiques des bétons de granulats légers

La modification des paramètres de formulation du béton de granulat léger entraîne des différences de structure interne du béton (matrice cimentaire et granulats). Du fait des différences de porosité et de composition chimique, les bétons de granulats légers peuvent présenter des propriétés thermiques très variables. Les facteurs de cette variabilité sont : la composition de la matrice, la nature des granulats, les additions minérales et la fraction volumique des granulats légers dans le béton.

I.5.1 Influence de la composition de la matrice cimentaire

Selon [UYS04], le dosage en ciment influence non seulement la résistance en compression mais aussi la conductivité thermique des bétons de granulat léger. L'expérimentation a été réalisée sur des bétons de granulats

mixtes (75% de granulats ordinaires et 25% de pierre ponce) avec différents dosages en ciment : 200, 250, 350, 400 et 500 kg/m³. Les résultats de mesures de conductivité thermique sont présentés dans le Tableau I-4. L'augmentation du dosage en ciment entraîne une amélioration de la résistance en compression mais également une diminution de la résistance thermique. Lorsque le dosage en ciment augmente de 200 à 250, 350, 400 et 500 kg/m³, la conductivité thermique augmente respectivement de 3,4%, 5,2%, 9,4% et 25,6%.

Dosage de ciment (kg/m ³)	200	250	350	400	500
Densité (kg/m ³)	1970	1990	2020	2030	2040
Conductivité thermique	1,16	1,2	1,22	1,27	1,46

Tableau I-5: Conductivité thermique de bétons de granulats légers à différents dosages en ciment [UYS04]

Dans une autre étude, Gunduz [GUN08] a étudié la performance thermique des bétons de pierre ponce à faible résistance pour différents dosages en ciment. Le dosage en ciment diminue de 180 kg/m³ à 32 kg/m³ correspondant à un rapport E/C croissant de 0,88 à 5,46. Les bétons de ponce ont une conductivité thermique variant de 0,35 à 0,2 W/mK et une masse volumique variant de 1200 à 800 kg/m³. L'étude a montré que l'utilisation de différentes fractions des constituants permet d'obtenir une large gamme de bétons isolants à faible conductivité thermique.

I.5.2 Influence de la nature des granulats

Le béton est constitué d'une matrice cimentaire et de granulats qui diffèrent selon leur composition minérale et leur structure poreuse. Les granulats représentent 70-80% du volume d'un béton et ont une influence

prépondérante sur les propriétés thermiques des bétons. La conductivité thermique du béton de granulats légers dépend donc en tout premier lieu du volume des pores dans les granulats légers et dans la matrice cimentaire [CHA02]. La conductivité thermique du béton diminue souvent avec la porosité. Le Tableau I-5 présente des valeurs de conductivité thermique de bétons en fonction de la nature des granulats légers utilisés [CHA02].

	Masse volumique sèche du béton (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/mK) à l'état sec	Conductivité thermique (W/mK) à w _a de %
Vermiculite	400	0,09	0,158
Perlite	310	0,098	0,155
EVS (expanded vesicular)	1420	0,28	0,36
ESG-1 (expanded slag)	1280	0,31	0,36
ESG-2 (expanded slag)	1400	0,31	0,39
LECA (expanded clay)	1550	0,68	-

Tableau I-7: Conductivité thermique de différents bétons de granulats légers [CHA02]

On remarque que, en général, la conductivité thermique augmente avec la masse volumique du béton comme présenté par Mindess (cf. §I-2.4.2). Cependant, le béton LECA, de masse volumique légèrement supérieure à celle des bétons EVS et ESG, a une conductivité thermique plus de deux fois plus grande que ces derniers. Pour estimer l'effet de la structure poreuse sur la conductivité thermique, on peut comparer les bétons de laitier de haut fourneau EVS et ESG. Ces deux granulats ont la même matière première mais sont fabriqués par différentes procédures. L'EVS est fabriqué par la procédure "hydroscreen" et l'ESG par celle du granulateur à tambour. Cela conduit à des différences de géométrie et de morphologie de ces granulats. Le granulat EVS

a une forme angulaire et contient plus de grands pores ouverts (supérieur à 150µ m) tandis que le granulats ESG a une forme ronde et contient plutôt une grande quantité de petits pores (50% des pores de 1 à 120 µm). L'expérience de Chandra a montré que le béton EVS est moins conducteur, à même masse volumique, que les bétons ESG. D'autres paramètres que le volume de pores influent sur la valeur de conductivité des granulats. Leur nature minéralogique, la distribution porométrique jouent aussi un rôle sur les propriétés thermiques des granulats et donc des bétons.

I.5.3 Influence des additions minérales

Plusieurs études référencées dans [XU00], [FU99], [DEM03-1], [DEM03-2] et [DEM07] ont été menées pour caractériser l'influence des additions minérales sur les propriétés thermiques des bétons ou des pâtes de ciment.

Demirboga [DEM03-2] a présenté l'effet de la fumée de silice (FS) et des cendres volantes (CV) sur les bétons de granulats légers mixtes de pierre ponce (PP) et de perlite expansée (PE) (Figure I-8). Six gammes de béton ont été étudiées : A (100% PP), B (80% PP, 20% PE), C (60% PP, 40% PE), D (40% PP, 60% PE), E (20% PP, 80% PE) et F (100% PE).

Le liant, dosé à 200 kg/m³, est un mélange de Ciment Portland type III (CP) et d'addition minérale (FS ou CV) à des taux de substitution de 0, 10, 20 et 30 % de ciment par FS ou CV. L'auteur conclut que l'utilisation de la fumée de silice et des cendres volantes diminue progressivement la conductivité thermique du béton grâce à la faible conductivité de ces additions contenant majoritairement des phases minéralogiques amorphes. Il remarque également que les cendres volantes diminuent plus efficacement la conductivité thermique que la fumée de silice.

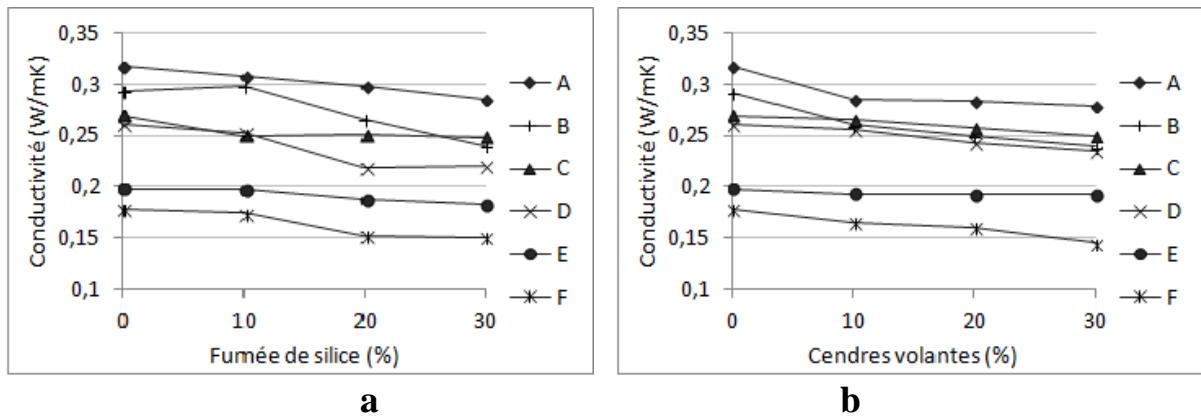


Figure I-13: Evolution de la conductivité thermique des bétons en fonction de la teneur en FS (a) et de la teneur en CV (b) [DEM03-2]

Dans d'autres travaux [DEM03-1] [DEM07], Demirboga a montré que la fumée de silice et les cendres volantes permettent de diminuer également la conductivité thermique du mortier et du béton de granulats ordinaires. Cela est toujours expliqué par la diminution de la masse volumique du béton et à la minéralogie (phases amorphes) des additions minérales.

Les impacts de la FS sur les propriétés thermiques (conductivité thermique, chaleur massique et diffusivité) des pâtes de ciment ont été étudiés par Xu et Chung [XU00] et Fu et Chung [FU99]. Ils ont utilisé le même type de ciment, CEM type I, et le même ratio eau/ciment (0,35). Leurs résultats sont présentés dans le Tableau I-6. La conductivité thermique a baissé de 0,52 à 0,4 W/mK (23%) pour un remplacement de 15% de CEM-I par FS. Le travail de Fu et Chung montre un impact plus important encore, la conductivité thermique ayant baissé de 31% pour un remplacement de 15% de CEM-I par FS. L'utilisation de la fumée de silice diminue également la diffusivité et augmente la chaleur massique de la pâte de ciment.

Composition	Diffusivité (1)	Chaleur massique (1)	Conductivité (1)	Diffusivité (2)	Chaleur massique (2)	Conductivité (2)
100% CP	0,37	0,7	0,52	0,37	0,7	0,52
85% CP +15% FS	0,26	0,78	0,4	0,27	0,77	0,36

(1) étude de Xu et Chung, (2) étude de Fu et Chung

Tableau I-8: Influence de la fumée de silice sur les propriétés thermiques de pâtes de ciment [XU00], [FU99]

I.5.4 Influence de la fraction volumique des granulats légers

Uysal et al. ont examiné l'influence de la fraction volumique de pierre ponce sur la conductivité thermique des bétons [UYS04]. Pour le dosage en ciment fixé à 300 kg/m^3 , le gravillon ordinaire est remplacé partiellement par de la pierre ponce. La Figure I-11 montre l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique du béton. Les points de la courbe correspondent respectivement (de gauche à droite) aux taux de substitution suivants : 0% (béton de granulats ordinaires), 25%, 50%, 75% et 100%. Les mesures ont été effectuées sur des échantillons prismatiques $110 \times 160 \times 40$ mm avec la méthode du fil chaud. Le remplacement total de granulats ordinaires par des granulats de pierre ponce diminue jusqu'à 46,8 % la conductivité thermique du béton. En fait, suite à l'augmentation de la fraction des granulats légers, la porosité du béton augmente, ce qui entraîne des diminutions de la masse volumique et de la conductivité thermique.

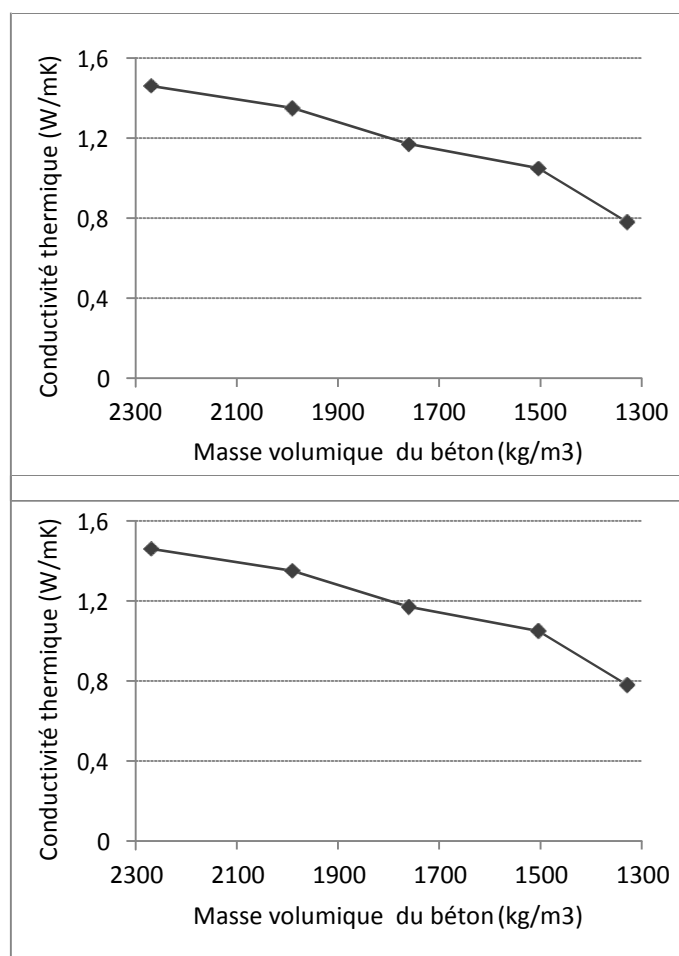


Figure I-14 : Conductivité thermique et masse volumique du béton ordinaire à différentes teneurs en pierre ponce [UYS04]

Parallèlement à ces travaux, Demirboga et Gul [DEM03-2] ont étudié l'impact de la substitution de la pierre ponce par de la perlite expansée sur les propriétés des bétons de granulats mixtes (pierre ponce et perlite expansée). Pour les bétons dosés à 200 kg/m³ de ciment, le taux de substitution augmente de 0 à 20, 40, 60, 80 et 100%. La mesure de la conductivité thermique est réalisée avec des échantillons prismatiques 110 x 160 x 40 mm par la méthode du fil chaud. La Figure I-10 représente l'évolution de la conductivité thermique des bétons en fonction de la fraction volumique de perlite expansée. Bien

entendu, la substitution de la pierre ponce par de la perlite expansée diminue la conductivité thermique des bétons car la perlite expansée a une masse volumique plus faible que celle de la pierre ponce.

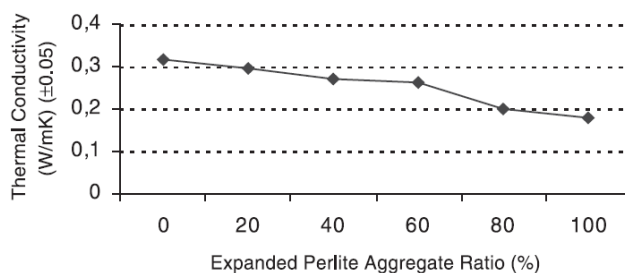


Figure I-15: Conductivité thermique d'un béton ordinaire en fonction de la fraction de la perlite expansée [DEM03-2]

I.6 Propriétés mécaniques des bétons de granulats légers

Ce paragraphe présente les travaux expérimentaux menés par différents auteurs sur les paramètres influençant les propriétés mécaniques des bétons de granulats légers. Cette synthèse s'intéresse plus particulièrement ensuite aux types de bétons de granulats légers que nous étudions : bétons de structure de granulats légers d'argile expansée, de schiste expansé, et de pierre ponce. Nous présentons ici les influences des caractéristiques des granulats (structure interne, forme, coefficient d'absorption d'eau, nature des granulats) et de la composition du béton (dosage en ciment, quantité d'eau de gâchage, teneur en additions minérales, fraction volumique des granulats légers).

I.6.1 Influence des caractéristiques des granulats

Le mode de rupture dans le béton de granulats légers est différent de celui des bétons de granulats ordinaires composés de granulats de masse volumique ordinaire. La matrice cimentaire est généralement plus résistante que le granulat léger [MIN03], [CLA93], [EUR00]. Les fissures traversent les

granulats légers au lieu de contourner les grains. Lo [LO04-1], [LO04-2] a observé sur les éprouvettes testées en compression que l'adhérence entre les granulats légers et la matrice cimentaire est toujours maintenue. La résistance maximale du béton est contrôlée par celle des granulats légers.

La résistance mécanique des grains de granulat léger dépend de plusieurs facteurs comme l'épaisseur et la régularité de leur coque externe, la répartition de la matière solide entre la coque et les structures internes, la nature minéralogique des structures internes, les micro-fissurations [ARN86]. Arnould et Virlogeux [ARN86] ont montré à l'aide de l'essai au pot du LCPC que pour une masse volumique sèche donnée, la résistance en compression du béton léger croit avec la résistance des grains (Figure I-11).

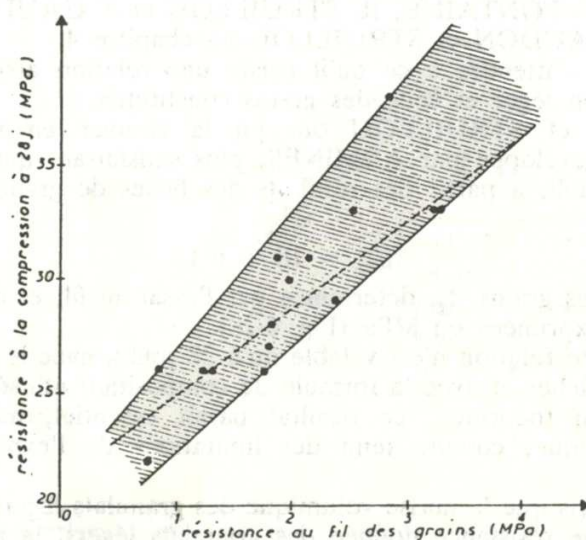


Figure I-16 : Résistance en compression à 28 jours de bétons de granulats légers en fonction de la résistance des grains [ARN86]

L'observation de la relation masse volumique/résistance en compression des granulats d'argile expansée (le Liapor) permettrait de dire que la résistance du béton pourrait être liée à la masse volumique des granulats légers

[ARN86]. Mais ces auteurs ont souligné que la relation entre la masse volumique et la résistance en compression n'est qu'une indication sur l'ordre de grandeur de la résistance en compression que l'on peut espérer pour un béton léger. En effet, plusieurs auteurs ont observé qu'il n'y a pas une relation rigoureusement linéaire entre la résistance en compression et la masse volumique du béton. Ke [KE08] a testé la résistance en compression de bétons de granulats légers de schiste expansé et d'argile expansée, de masse volumique réelle de 740 à 1580 kg/m³. Les bétons étudiés ont la même matrice cimentaire et la même proportion volumique de granulats légers de 45%. Ke a montré que la résistance de ces bétons varie peu (autour de 25 MPa). Le même phénomène a également été observé par Demirboga et *al.* sur les bétons de perlite expansée et de pierre ponce [DEM01].

Nous venons de voir que la résistance du béton de granulats légers était influencée par la résistance des grains, ce qui induit une borne supérieure pour les résistances. La résistance des grains est cependant un paramètre difficilement accessible. L'ACI a proposé de la corrélérer avec taille des grains. L'ACI [ACI03] a donc relié la résistance plafond des bétons légers au diamètre maximal des gros granulats : la valeur plafond augmente si le diamètre maximal des granulats diminue. La résistance en compression d'un béton de granulats légers augmente de 35 MPa à 42 MPa et 52 MPa lorsque le diamètre maximal des gros granulats légers diminue, respectivement, de 19 mm à 13 mm et 10 mm [ACI03]. Neville [NEV00] a souligné que la rupture se produit à travers les plus gros pores des gros granulats. L'utilisation des granulats de taille plus petite réduit les gros pores, donc augmente la résistance en compression du béton.

Plusieurs granulats légers expansés sont constitués d'une structure poreuse interne entourée d'une coque plus dense. Selon Ke [KE08, 09],

l'épaisseur de la coque du granulat influence la résistance mécanique du béton de granulat léger. Il a étudié la relation entre l'épaisseur de la coque de grain, l'absorption d'eau du granulat et la performance mécanique du béton correspondant pour trois granulats légers de masse volumique 740, 900 et 920 kg/m³. La coque semble limiter et ralentir la pénétration d'eau pour la plupart des granulats légers. Le coefficient d'absorption d'eau le plus faible correspond aux grains ayant la coque la plus épaisse et le pourcentage de grands pores le plus petit. L'influence de l'absorption d'eau des granulats sur la performance mécanique du béton de granulat léger est présentée dans le paragraphe I-5.2. Ke [KE08] a montré qu'à cause de la grande porosité interne des granulats légers, leur comportement mécanique est gouverné par l'épaisseur de la coque et sa proportion dans le grain. Il a observé que les fissures dans le béton de granulat léger sont transgranulaires et qu'à la rupture, la coque reste adhérente à la pâte de ciment tandis qu'elle est désolidarisée de la partie intérieure du grain. Ces observations confirment la bonne adhérence matrice- granulat et l'influence de la coque dans le comportement mécanique du béton. L'auteur a conclu que pour les granulats légers étudiés, plus la coque est épaisse, plus la résistance mécanique du béton est élevée.

I.6.2 Influence du rapport E/C et l'absorption d'eau des granulats

Comme pour les bétons de granulats de masse volumique ordinaire, plus le rapport E/C diminue, plus la résistance en compression du béton de granulat léger augmente. Le phénomène est observé par plusieurs auteurs [YAS04], [BHA03], [CHI03], [KE08], [ZIV09]. Selon Arnould et Virlogeux [ARN86], une réduction de 15 litres d'eau de gâchage conduit à une augmentation de 5 à 10% de la résistance en compression à 28 jours. Mais le manque d'eau dans le malaxeur peut provoquer des difficultés d'hydratation complète du ciment et de compactage du béton, qui entraînent une chute de la résistance en compression.

Pour les bétons de granulats légers, l'eau absorbée par les granulats est également un facteur affectant fortement les propriétés mécaniques du béton. Si on utilise les granulats sans pré-saturation pour fabriquer le béton, la pénétration de l'eau de gâchage dans les pores des granulats légers entraîne une diminution du rapport E/C dans le béton frais. De plus, il n'est pas évident de déterminer la quantité d'eau absorbée par les granulats dans la pâte, qui peut être différente de la quantité d'eau caractérisée par immersion suivant la norme EN 1097-6. Le rôle de filtre joué par les granulats légers diminue le rapport E/C au voisinage des granulats par rapport au reste de la matrice formant une zone plus dense que la matrice cimentaire [LO04-1], [WAS96]. Outre le processus physique d'absorption d'eau, un processus chimique apparaît à long terme au-delà de 28 jours. Wasserman et Bentur [WAS96] ont observé deux types de phénomènes : la réaction pouzzolanique entre le granulat et la solution alcaline qui pénètre dans les pores du granulat (formation de C-S-H) et le phénomène «d'imprégnation» entraînant un dépôt de portlandite (CH) dans les pores de surface des granulats. Plus les granulats ont une capacité d'absorption élevée et une porosité de surface importante plus ce dernier phénomène est important.

Les auteurs de [EUR00] ont mené une étude pour estimer la correction d'eau à apporter au béton frais en se basant sur l'absorption d'eau des granulats légers à base d'argile expansée, de pierre ponce et de cendres volantes frittées. Les granulats légers sont utilisés en remplacement des granulats de masse volumique ordinaire pour avoir une large gamme de bétons. Dans cette étude, aucune correction d'eau n'a été faite à l'eau de gâchage. Toutes les formulations ont une même quantité d'eau de gâchage 165 kg/m^3 mais n'ont pas le même rapport E/C efficace à cause des différents coefficients d'absorption des granulats. Les granulats sont séchés en étuve avant la

fabrication des bétons pour bien évaluer le rapport E/C efficace à partir de l'absorption des granulats légers à 15, 30, 60 minutes et 7 jours. Les auteurs ont estimé que l'absorption d'eau après 60 minutes donne la meilleure approximation du rapport E/C et permet d'être au plus proche du rapport E/C efficace.

Pour éviter la diminution éventuelle du rapport E/C due à l'absorption d'eau par les granulats légers, plusieurs auteurs ont proposé de fabriquer le béton avec des granulats pré-saturés. Dans ce cas, l'eau dans les granulats peut empêcher la pénétration de la pâte de ciment dans les grains. Zhang [ZHA90] a remarqué que la zone d'interface dépend de la porosité à la surface des granulats légers. Ke [KE08] a trouvé que les granulats pré-saturés pendant 48 h absorbaient dans le béton frais car des hydrates (phénomène d'imprégnation) ont été observés dans la périphérie des granulats les plus absorbants. Il confirme que cela dépend la porosité des granulats et leur absorption « résiduelle » après saturation. Selon d'autres auteurs [LO07, LO08, JOZ05], l'utilisation des granulats pré-saturés pourrait cependant provoquer une zone d'interface plus poreuse due à l'eau accumulée mais peu-absorbée à l'interface granulat / pâte de ciment comme dans le béton ordinaire. La zone de transition est une zone plus faible que la matrice cimentaire car elle est plus poreuse. Le pourcentage de pores est estimé deux fois plus élevé que dans le reste de la pâte dans les bétons fabriqués avec des granulats pré-mouillés (de 30mn ou de 1h) [LO07, 08]. Par contre, l'eau absorbée dans les granulats pendant la pré-saturation (ou pré-mouillage) conduit probablement à une hydratation supplémentaire et donc une amélioration de la résistance [LO04-2].

L'eau pré-absorbée par les granulats légers permet également de limiter le retrait du béton [BEN01], [ZHU04], [KOH99]. Selon ces auteurs, le retrait du béton de granulat léger au jeune âge est plus faible que celui du béton

ordinaire et l'utilisation des granulats légers à l'état saturé prévient plus efficacement encore le retrait du béton. Ceci est expliqué par la redistribution d'eau basée sur le mécanisme de retrait du béton. En effet, l'espace, à l'origine occupé par des particules de ciment et d'eau, est progressivement remplacé par un espace rempli par des produits d'hydratation. L'espace non recouvert par les composants solides comme le ciment non hydraté ou les produits d'hydratation devient les pores capillaires. Au début du durcissement, la plupart des pores capillaires sont entièrement saturés d'eau. Au cours de l'hydratation, l'eau capillaire est consommée et laisse place à de nouveaux pores capillaires. Cependant, contrairement à ce qui se passe dans le béton de granulats de masse volumique ordinaire, le retrait du béton de granulats légers est réduit parce que l'eau perdue intérieurement par l'auto-dessiccation de la pâte de ciment est immédiatement remplacée par l'eau interne aux granulats légers qui migre vers les zones à plus faible teneur en eau. Par conséquent, la pâte de ciment se rétracte moins.

I.6.3 Influence du dosage en ciment

Il y a une certaine dépendance de la résistance du béton au dosage en ciment. Neville [NEV00] a montré dans son ouvrage cette relation pour plusieurs types de bétons de granulats légers. Dans la Figure I-12, les courbes convergent vers une valeur proche de 70 MPa. Il s'agit donc d'une résistance plafond du béton léger : à partir d'un certain seuil, une augmentation du dosage en ciment ne conduirait plus à une amélioration de la résistance [ACI03], [NEV00]. Ce phénomène a été observé dans le travail de Ganesh Babu et Saradhi Babu [BAB03] où lorsque le dosage en ciment augmente, la résistance des bétons ne dépasse pas 21 MPa. Arnould et Virlogeux [ARN86] ont expliqué que, dans les bétons de granulats légers, la rupture se produit par cassure des grains qui ont une résistance plus faible que la matrice. De ce fait, à

partir d'une certaine valeur, l'augmentation de la résistance de la matrice n'aurait plus d'influence sur celle du béton. D'après Clarke [CLA93], bien que l'augmentation de la résistance en compression due à l'augmentation du dosage en ciment dépende également du type de granulats et du ciment, en général, dans le béton de granulats légers, 10% d'addition de ciment produit environ 5% d'augmentation de résistance en compression.

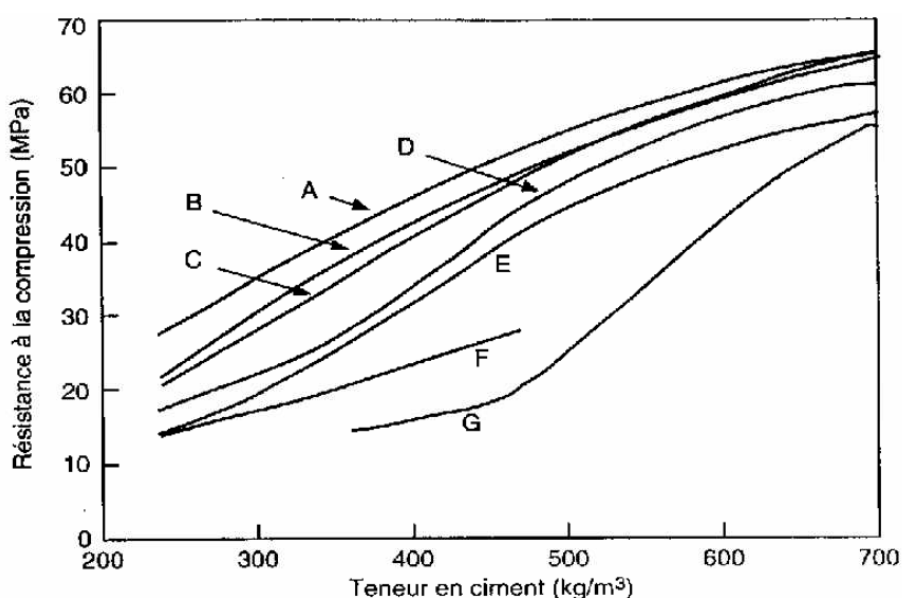


Figure I-17 : Évolution de la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) en fonction du dosage en ciment de bétons ayant un affaissement de 50mm et confectionnés avec différents types de granulats légers. (A) cendres volantes frittées et granulat fin ordinaire ; (B) laitier de haut fourneau en boulettes et granulat fin ordinaire ; (C) cendres volantes frittées ; (D) schiste fritté; (E) ardoise expansée ; (F) argile expansée et sable; (G) laitier expansé [NEV00].

Selon Ke [KE08, 09], une augmentation de 8% du dosage en ciment (diminution du rapport E/C de 0,45 à 0,35) conduit à une amélioration de 13-

35% des résistances des bétons selon la nature du granulat. Ce résultat correspond à une fraction volumique de gravillon léger de 45%. La résistance augmente plus vite si le volume de granulat léger dans le béton diminue. Ke a aussi relevé un ralentissement de l'augmentation des résistances des bétons de granulats légers avec l'augmentation du dosage en ciment.

I.6.4 Influence des additions minérales

L'utilisation de la fumée de silice pour fabriquer des bétons à hautes performances est très répandue. Plusieurs recherches ont montré que certaines teneurs en fumée de silice dans le béton permettent d'améliorer la résistance en compression, le module d'élasticité et les propriétés mécaniques du béton au jeune âge. Au contraire, les études sur les cendres volantes en substitution partielle du ciment prouvent que ses gains sont limités. Ce paragraphe présente l'influence de ces additions minérales sur les propriétés mécaniques du béton de granulat léger.

Demirboga [DEM01] a étudié l'influence de la fumée de silice et des cendres volantes sur la résistance en compression de bétons de granulats légers (Figure I-13). Le gravillon de ponce est remplacé par de la perlite expansée à différentes fractions volumiques de 0, 20, 40 et 60%. Les bétons ont le même rapport E/C de 1 et le même dosage de liant de 200 kg/m^3 . Le liant est composé du ciment et une des deux additions minérales, fumée de silice ou cendres volantes. Le dosage en fumée de silice ou en cendres volantes est de 0, 10, 20 et 30% de la masse totale du liant. Les essais de compression sont réalisés sur des échantillons cylindriques 100 x 200 mm. Les résultats ont montré que le pourcentage optimal de substitution du ciment par de la fumée de silice n'est pas constant. La substitution du ciment par de la fumée de silice a apporté des gains notables sur la résistance en compression du béton contenant

100% de gravillon léger de ponce. La résistance a respectivement augmenté de 6,1 MPa à 9, 10,3 et 6,8 MPa pour les dosages de 10, 20 et 30% en fumée de silice. Par contre, lorsque le béton contient plus de perlite expansée, l'effet de la fumée de silice est moindre. Pour les bétons contenant un mélange de pierre ponce et de perlite expansée comme gravillon, l'augmentation du dosage en fumée de silice n'a conduit qu'à une faible augmentation de la résistance en compression, voire une diminution pour le dosage de 30% en fumée de silice. Au contraire, la substitution du ciment par des cendres volantes n'a pas d'effet positif sur la performance mécanique à 28 jours du béton de ponce et de perlite expansée. Dans tous les types de béton étudiés et pour les différentes fractions de perlite expansée, la résistance en compression diminue avec l'augmentation du dosage en cendres volantes.

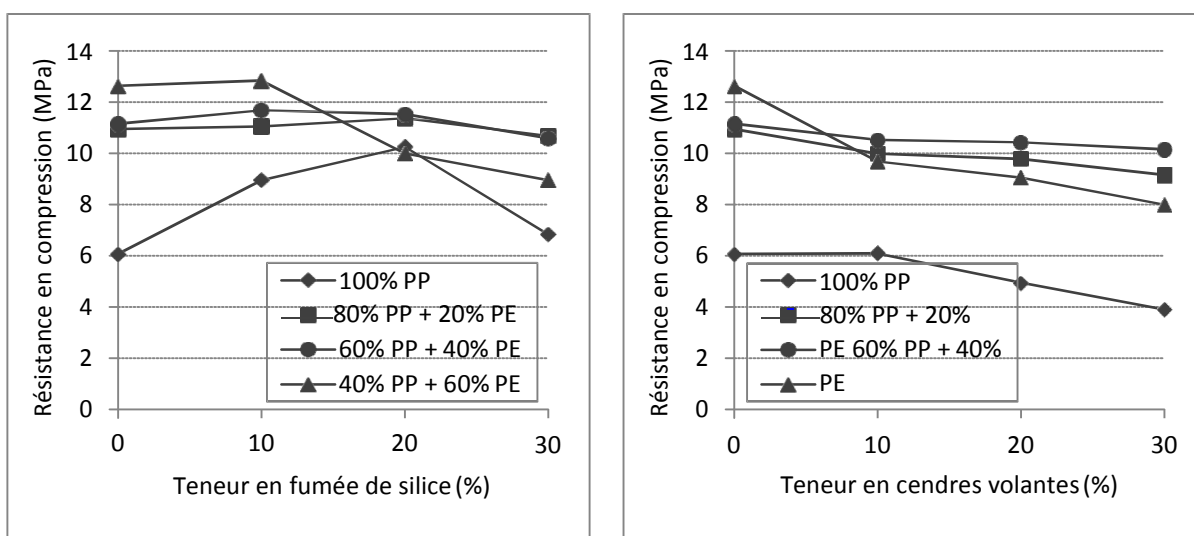


Figure I-18 : Évolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de la teneur en fumée de silice (a) et de la teneur en cendres volantes pour les bétons de pierre ponce (PP) et de perlite expansée (PE) [DEM01]

Chen et Liu [CHE08] ont étudié la relation entre la résistance du béton de granulats légers d'argile expansée et le taux de substitution du ciment par de

la fumée de silice ou des cendres volantes. Le dosage du liant est fixé à 530 kg/m³. Lorsque la substitution du ciment par les cendres volantes croit de 0 à 10, 20, 30 et 40%, la résistance en compression à 7 jours du béton diminue respectivement de 35 MPa à 31, 32, 20, et 18 MPa, par contre la résistance en compression à 28 jours varie de 50 MPa à 52, 56, 47, et 43 MPa, respectivement. La substitution du ciment par de la fumée de silice de 0 à 5, 10, et 15 % permet d'améliorer progressivement la résistance en compression : celle à 7 jours augmente respectivement de 35 à 40, 45, et 49 MPa ; celle à 28 jours augmente de 50 à 53, 58, et 61 MPa. Chen et Liu ont également démontré que l'utilisation des cendres volantes améliore l'ouvrabilité du béton.

Ganesh Babu et Saradhi Babu [BAB03] ont observé l'influence de la fumée de silice sur le béton de polystyrène expansé. Ils ont fabriqué 3 séries de bétons avec différents dosages en ciment, différents taux de substitution du ciment par de la fumée de silice et différents rapports E/C. La résistance de ces bétons à 28 jours varie de 10 à 21 MPa. Ces auteurs ont démontré qu'une augmentation du dosage en fumée de silice conduit à une amélioration plus importante de la résistance en compression à 7 jours que celle à 28 et 90 jours, i.e. la fumée de silice a accéléré l'hydratation du béton.

I.6.5 Influence de la fraction volumique des granulats légers

Comme la résistance des granulats légers est inférieure à celle de la matrice, il est logique de penser que la résistance mécanique du béton de granulats légers dépend de la fraction volumique des granulats. Mindess [MIN03] a proposé une méthode pour relier la résistance en compression σ_c du béton avec celles des granulats légers σ_a et de la matrice cimentaire σ_m et leurs fractions volumiques, pour les bétons fabriqués à partir de sable de rivière :

$$\sigma_c = \sigma_a^n \chi \sigma_m^{1-n}$$

Arnould et Virlogeux [ARN86] ont proposé d'utiliser le rapport du volume de granulats légers au volume de sable ordinaire G/S pour contrôler le couple masse volumique / résistance en compression du béton de granulats légers. Plus le rapport G/S augmente, plus la proportion de granulats légers (point faible du béton) augmente, et plus la résistance diminue. Pour trouver un arbitrage entre les deux besoins, faible masse volumique et forte résistance, ils ont établi que le rapport G/S devrait être compris entre 1,5 et 1,8.

L'influence de la fraction volumique de pierre ponce sur la résistance en compression du béton a été étudiée par Sahin [SAH03]. Différents essais ont été réalisés sur des échantillons cylindriques 150 x 300 mm de béton de granulats mixtes, en remplaçant partiellement le granulat ordinaire par de la pierre ponce. Pour un dosage en ciment fixé à 300 kg/m^3 , le taux de substitution volumique du gravillon de ponce augmente de 0% (béton de granulats ordinaires) à 25%, 50%, 75% et 100%. Bien entendu, le remplacement des granulats ordinaires par les granulats légers moins résistants diminue la résistance en compression et le module d'élasticité du béton (Tableau I-7).

Taux de remplacement (%)	0	25	50	75	100
Masse volumique (kg/m^3)	2182	1977	1638	1454	1167
Résistance de compression	23,11	16,39	13,79	10,34	8,98
Module d'élasticité (GPa)	14,46	10,61	9,95	6,12	4,42
Absorption d'eau du béton	4,1	6,1	8,3	9	-

Tableau I-9: Résistance en compression du béton à différentes fractions de la pierre ponce

L'étude de Demirboga [DEM01] permet également d'exploiter l'impact du taux de substitution de la pierre ponce par de la perlite expansée sur les propriétés des bétons de granulats mixtes (pierre ponce et perlite expansée). Le dosage en ciment est de 200 kg/m^3 . Le taux de substitution augmente de 0% à 20%, 40% et 60%. Le Tableau I-8 présente la résistance en compression des bétons suivant les différents teneurs en perlite expansée. Demirboga a observé un phénomène paradoxal : l'augmentation du taux de remplacement de la pierre ponce (granulat plus résistant) par de la perlite expansée (granulat moins résistant) entraîne une augmentation de la résistance du béton. Ceci peut-être expliqué par les phénomènes suivants : augmentation de la compacité grâce à la présence de la perlite ; interface granulat - matrice plus résistante grâce à l'effet « interlocking » de la perlite ; réaction pouzzolanique supplémentaire due à la perlite (contenant de la silice amorphe) ; durée de l'hydratation plus longue due à l'absorption d'eau plus élevée de la perlite.

Taux de substitution de PP par PE (%)	0	20	40	60
Masse volumique (kg/m^3)	1154	928	858,8	755
Résistance de compression (MPa) (7)	4,35	6,62	8,04	6,74
Résistance de compression (MPa) (28)	6,07	10,95	11,16	12,63

Tableau I-10: Résistance en compression aux différentes fractions volumiques de pierre ponce et de perlite expansée

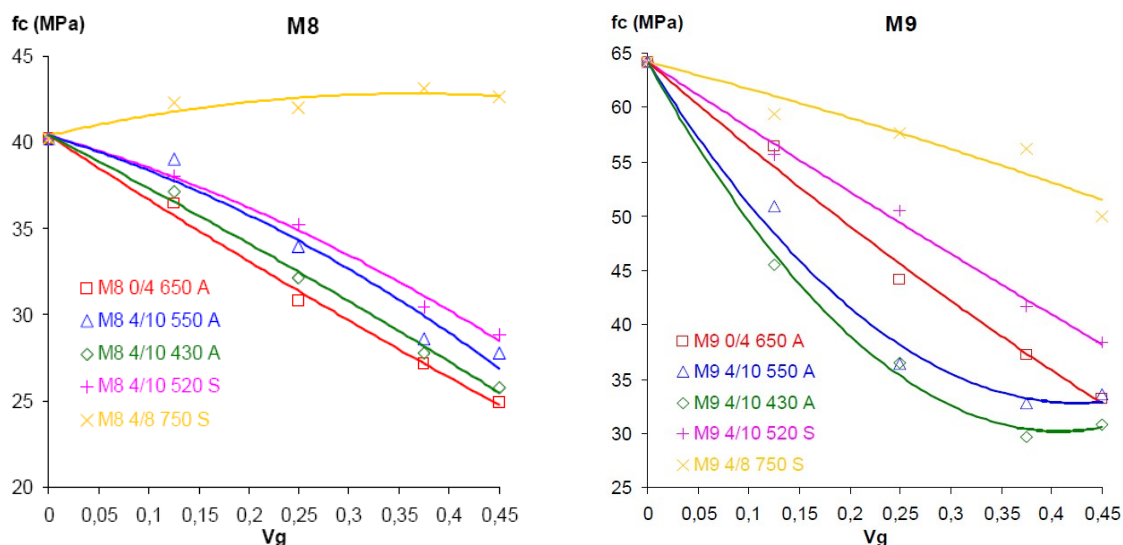


Figure I-19 : Résistance en compression du béton en fonction de la fraction volumique de granulats légers [KE09]

Le travail de Ke [KE08, 09] montre aussi l'influence de la fraction volumique des granulats légers. Les granulats sont à base d'argile expansée et de schiste expansé. Dans cette étude, trois matrices cimentaires de différents rapports E/C ont été utilisées dont deux (M8 et M9) sont sans fumée de silice. Pour la plupart des bétons étudiés, la résistance en compression du béton diminue avec l'augmentation de la fraction de granulats légers (Figure I-14). Le taux de diminution de la résistance est différent entre bétons et dépend du type de granulat. Le béton de granulat de schiste expansé 4/8 750S de masse volumique 1580 kg/m^3 se distingue des autres bétons par l'évolution de la résistance en compression qui diffère entre les deux matrices M8 et M9. Pour le béton M9 4/8 750S ayant le rapport E/C de 0,35, la résistance mécanique diminue lorsque la fraction volumique des granulats légers augmente. Pour le béton M8 4/8 750S ayant un rapport E/C de 0,446, la résistance en compression a même augmenté avec la fraction volumique des granulats légers, de 40 à 42 MPa. Ceci est expliqué par la structure solide dense du

granulat 750S de structure identique interne et externe. Sa résistance en compression est estimée meilleure que celle de la matrice M8 mais plus faible que celle de la matrice M9. En effet, si les granulats sont suffisamment résistants, c’est au sein du mortier que sera atteinte en premier la rupture. C’est la pâte cimentaire qui atteint ainsi sa résistance à la rupture avant le granulat dans le béton de matrice M8, et à l’inverse ce sont les granulats qui atteignent les premiers leur résistance à la rupture dans le béton de matrice M9.

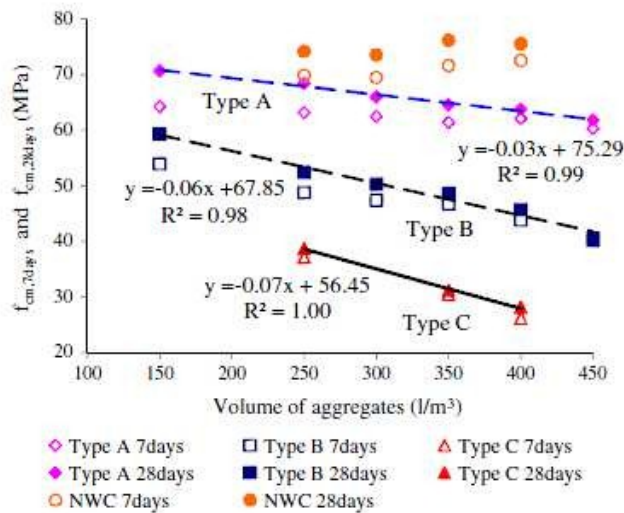


Figure I-20 : Relation entre la résistance en compression du béton et le volume des gravillons [BOG13]

Bogas et Gomes [BOG13] ont étudié l’influence de la fraction volumique des granulats d’argile sur la résistance en compression du béton (Figure I-15). Les bétons sont constitués du sable normal et d’un des trois types de granulat d’argile : Arlita 3/10 (type A), Leca 4/12 (type B) et Argex 4/8 (type C) de masse volumique respective, 1290, 1070 et 860 kg/m³. Le dosage en ciment est fixé à 450 kg/m³ et le rapport E/C est constant égal à 0,35. Pour tous types de granulats, la résistance en compression diminue avec l’augmentation de la fraction volumique de gravillon léger. L’auteur explique cela par la plus faible rigidité des gravillons légers par rapport aux gravillons

ordinaires. Les contraintes absorbées par la matrice sont plus importantes lorsque le volume de gravillons légers dans le béton augmente. Cela entraîne une rupture prématurée de l'éprouvette par rapport à une éprouvette de béton de gravillon normal.

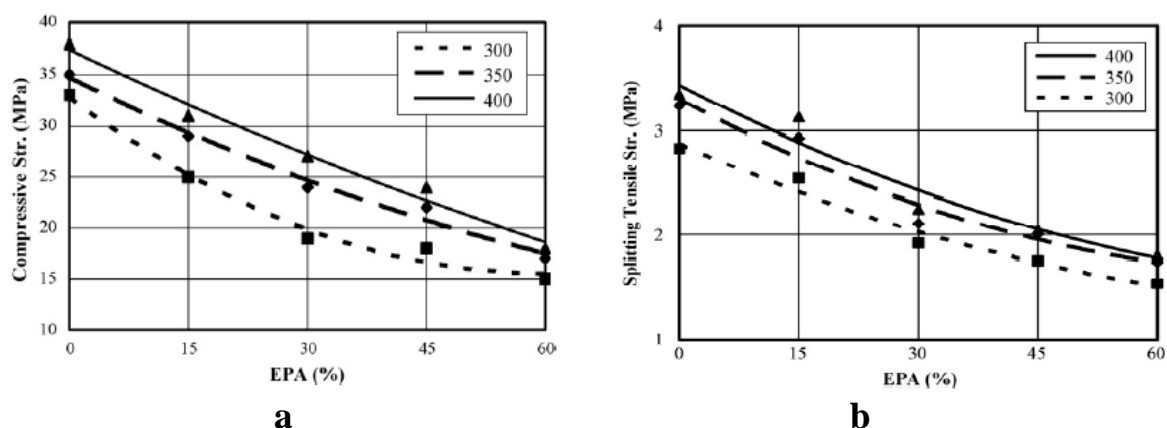


Figure I-21 : Relation entre la résistance en compression et le taux de remplacement de perlite (a) et relation entre la résistance en traction et le taux de remplacement de perlite (b) [TOP08]

Topçu et Isikdag [TOP08] ont étudié l'influence de la fraction des granulats légers en remplacement de sable alluvionnaire afin de déterminer l'effet de la perlite expansée sur la résistance en compression et la résistance en traction par fendage. Les échantillons cylindriques de $\phi=50 \times 300 \text{ mm}^2$ sont fabriqués avec un dosage en ciment de 300, 350 et 400 kg/m^3 . Les granulats contiennent initialement du sable (densité 2600 kg/m^3) et du gravillon concassé (densité 2700 kg/m^3). Ensuite, le granulat fin (sable) est substitué partiellement par de la perlite expansée en tenant compte de l'expansion volumétrique de la perlite mouillée. Le taux de remplacement augmente de 0% à 15%, 30%, 45% et 60%. Le rapport E/C reste fixé à 0,5. Les résultats de cette étude (Figure I-16) montrent une évidente diminution des

propriétés mécaniques des bétons lors du remplacement du sable. La résistance en compression des bétons baisse environ de 3 à 3,5 MPa pour 10% du volume de sable remplacé.

I.6.6 Paramètres affectant le module d'élasticité

Le module d'élasticité d'un béton dépend de la proportion de granulat et de la matrice cimentaire ainsi que du module d'élasticité de chaque constituant. Le béton de granulats légers a un module d'élasticité inférieur à celui du béton traditionnel car le module d'élasticité des granulats légers est plus faible en raison de leur porosité élevée. Généralement, le module d'élasticité d'un béton léger atteint la proportion de $\frac{1}{2}$ à $\frac{3}{4}$ de celui d'un béton traditionnel de même résistance [ACI03].

La Figure I-17 présente la relation contrainte - déformation d'un béton ordinaire et d'un béton de granulats légers, extraite de [NEV00]. La courbe de comportement du béton de granulats légers est linéaire jusqu'à plus de 90 % de la contrainte maximale. Ce phénomène est expliqué par l'absence de microfissures à l'interface matrice - granulat aux faibles chargements grâce à l'effet « interlocking » des deux phases. La partie décharge de la courbe contrainte - déformation est plus raide pour les bétons légers. Neville a ajouté que le remplacement des granulats légers fins par du sable de rivière conduit à un adoucissement moins raide et à une augmentation du module d'élasticité. Selon Neville [NEV00], du fait de la bonne cohérence matrice/granulat et des propriétés mécaniques voisines de ces derniers, les propriétés élastiques des granulats légers ont une influence plus prépondérante sur le module d'élasticité du béton que les granulats ordinaires. Comme l'élasticité des granulats est liée à leur porosité et donc à leur densité, le module d'élasticité du béton léger peut s'exprimer en fonction de sa masse volumique et de sa résistance en

compression.

La Figure I-18 présente les mesures de déformation réalisées sur différents bétons légers par Zhang et Gjorv [ZHA91-2]. Le module d'élasticité des bétons de granulats légers, ainsi que la linéarité de la relation contrainte/déformation, augmentent en fonction de la résistance en compression du matériau. Le comportement du béton de granulats légers est d'autant plus fragile que sa résistance est élevée. On note aussi la réduction et puis la disparition du domaine d'endommagement. La déformation à la rupture des bétons légers à hautes performances est supérieure à celle des bétons de granulats ordinaires de même résistance (de l'ordre de 0,33 à 0,46 % pour des résistances de 50 à 90 MPa).

L'influence de la proportion des granulats légers sur les propriétés mécaniques du béton est également étudiée dans [EUR00]. Les granulats légers d'argile expansée (LECA et Liapor) sont utilisés en substitution des granulats de masse ordinaire à des fractions volumiques égales à 20%, 40%, 60%, 80% et 100%. Le module d'élasticité du béton de Liapor diminue graduellement de 22,4 GPa à 17,3 GPa, alors que celui du béton de LECA varie autour de 20 MPa et atteint le pic de 22,6 MPa pour 40 % de granulats légers. Sahin [SAH03], Ke [KE09] et Chi et al. [CHI03] ont également observé que le module d'élasticité du béton diminue linéairement avec l'augmentation du pourcentage des granulats légers dans le béton pour un même rapport E/C. Il est conclu que le rapport E/C et les caractéristiques des grains ont une influence notable sur le module d'élasticité du béton de granulats légers.

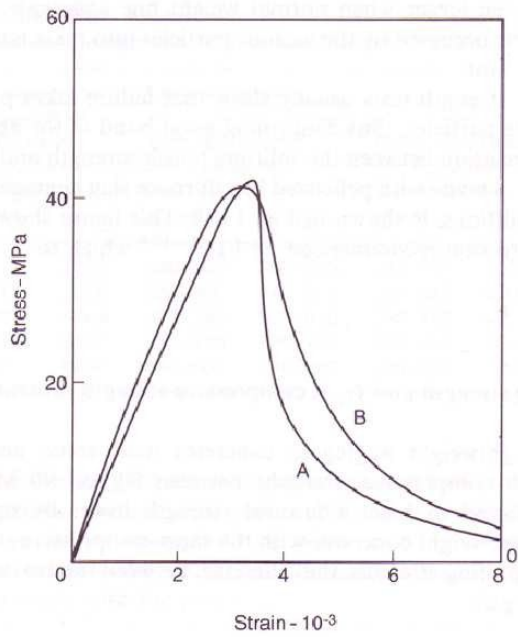


Figure I-22 : Relation contrainte - déformation du béton de granulats légers (A) et du béton ordinaire (B) [NEV00]

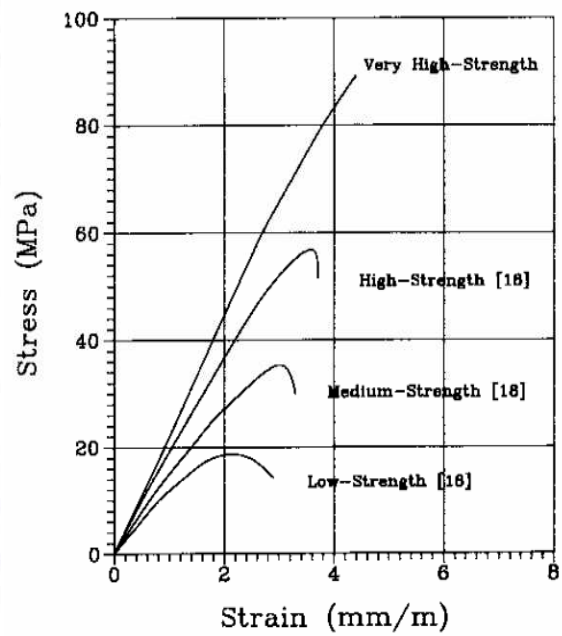


Figure I-23 : Relation contrainte - déformation de différentes gammes du béton de granulats légers [ZHA91-2]

Vu la forte hétérogénéité du béton, **le processus de dégradation** de ce matériau est gouverné par plusieurs mécanismes élémentaires **qui se produisent à une échelle inférieure**.

I.7.Approche multi échelles pour l'étude de l'endommagement thermique des bétons

I.7.1 Introduction

L'endommagement thermique des bétons **est un intitulé générique** qui est souvent utilisé pour classer sous une seule famille un ensemble de processus de déformation et de dégradation d'origines mécaniques, physiques et chimiques que subit le béton quand il est chauffé à haute température. Ces recherches ont mis en évidence la complexité du comportement des bétons à hautes températures et l'existence d'une combinaison de mécanismes d'origines mécaniques (déformations), physiques (transfert de la chaleur, départ de l'eau libre, variation de la conductivité,...) et chimiques (déshydratation, carbonatation, transformations chimiques...).

I.7.2 Matériaux hétérogènes et limites de l'approche macroscopique

Cette complexité de phénomènes physiques a souvent été prise en compte d'une manière empirique (apparente) dans les modèles macroscopiques à travers la définition des fonctions liant directement l'évolution les paramètres des lois macroscopiques à la température (module de Young, variable d'endommagement apparente, résistance apparente...). Outre l'aspect semi empirique de l'approche, ces modèles montrent dans certains cas de figure (même pour des cas élémentaires) des insuffisances importantes quant à la reproduction du comportement thermique du béton. Ces défauts sont liés dans la plupart des cas à la différence entre l'hypothèse de l'homogénéité souvent admise par les modèles macroscopiques et la nature fortement hétérogène du

matériau. Pour palier ce défaut des modèles macroscopiques, certains chercheurs ont postulé l'existence de fluage thermique transitoire.

Cette approche est basée principalement sur des observations expérimentales, le fondement théorique de cette classe de modèle n'est pour le moment pas constitué. L'identification du fluage thermique transitoire est aussi basée sur une approche empirique à travers des essais de sollicitations thermiques et mécaniques combinées conduisant à des courbes d'évolution de la déformation en fonction de la température.

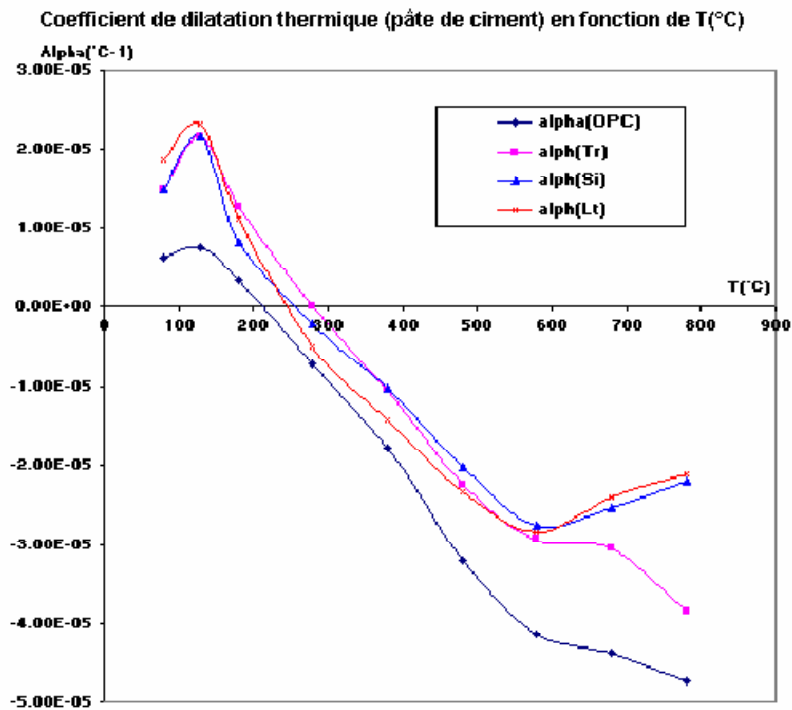
En supposant l'homogénéité du matériau, et sous l'effet d'une charge thermique, le béton subit des déformations. Ces déformations s'effectuent dans le matériau sans contrainte si elles ne sont pas empêchées. Ainsi, les seules déformations thermiques qui sont accompagnées de contraintes moyennes macroscopiques auront lieu dans le matériau dans les cas suivants :

1. Déformation empêchée (conditions aux limites).
2. Gradient de température conduisant à un champ de déformation non compatible.
3. Forme géométrique particulière conduisant à un auto-empêchement.

En partant de cette hypothèse d'homogénéité, et sous chargement thermique homogène, un échantillon libre en béton se dilatera sans contrainte et donc sans aucun endommagement thermique. Or, l'expérience menée en laboratoire montre que le processus d'endommagement thermique du béton commence très tôt dans le matériau même à des températures modérées.

I.7.3. Phénomène de dilatation différentielle empêchée à l'échelle mésoscopique

En dehors de toute transformation chimique (pas d'endommagement d'origine physicochimique) et sans empêchement de la dilatation libre du matériau (pas d'endommagement d'origine mécanique), la seule explication du phénomène réside dans l'existence d'un troisième type d'endommagement d'origine microscopique lié à la nature fortement hétérogène du béton. Cette constatation expérimentale a conduit à mener une analyse plus fine du phénomène en essayant d'explorer le matériau à une échelle plus petite. En effet, le béton est un matériau composite constitué d'un mélange de plusieurs composants ; la pâte du ciment, les granulats, le sable, les pores,... Il s'agit donc d'un matériau multiphasiques où chaque phase possède des caractéristiques mécaniques et physiques très différentes. Cette différence est encore plus importante sous chargement thermique car elle fait introduire en plus les coefficients de dilatation thermique de chaque phase dont la différence peut expliquer cet endommagement prématuré du béton non identifiable par une approche macroscopique homogène. En effet, l'expérience montre une grande différence entre le coefficient de dilatation de la pâte de ciment et celui des granulats. Ce coefficient varie en fonction de la température du type de ciment. Ceci a été confirmé par DIEDERICHS en effectuant des essais de mesure du coefficient de dilatation thermique avec différentes natures de granulats. Les courbes suivantes montrent les résultats obtenus par [DIEDERICHS et al, 1992].



Coefficient de dilatation thermique de differents granulats en fonction de la température.

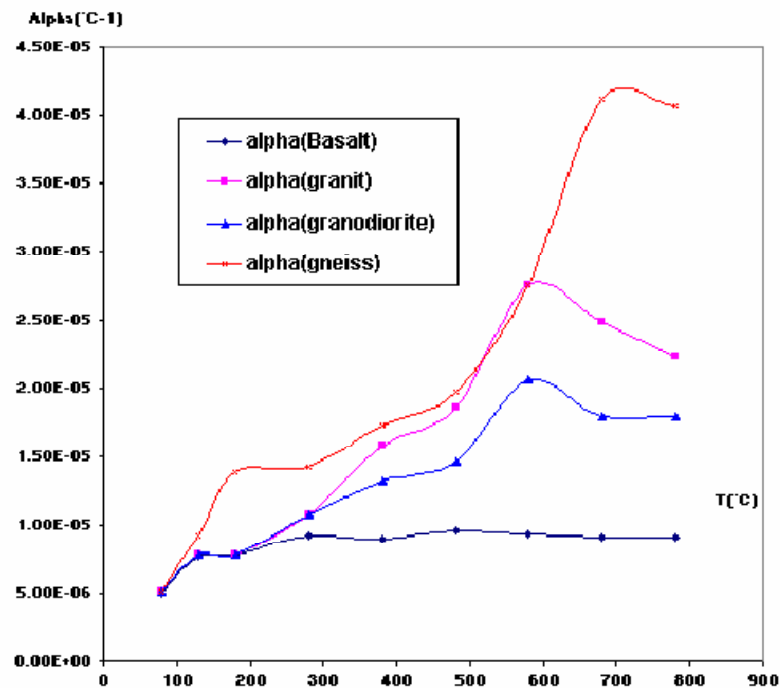


Figure I. 24 : Évolution opposée du coefficient de dilatation thermique des pâtes de ciment et des granulats

[Moun 02].

Cette différence confirme que le béton est sujet à un état complexe d'autocontrainte et cela même avec une température homogène et sans empêchement de sa déformation libre. La déformation différentielle entre le ciment et les granulats va donc provoquer des contraintes locales importantes qui peuvent être à l'origine de l'endommagement thermique du béton.

La question qui se pose maintenant ; comment peut-on identifier avec précision la part micromécanique de cet endommagement. Pour répondre à cette question, Il faut se doter d'un ensemble de moyens numériques et expérimentaux capables d'explorer la microstructure du matériau et en déduire par la suite les mécanismes élémentaires qui régissent la déformation thermique du béton.

I.7.4 Origine micromécanique de l'endommagement thermique

L'endommagement thermique du béton est dû en partie à son hétérogénéité. En considérant que la loi d'endommagement ainsi que l'énergie de fissuration sont indépendants de la température.

En effet, il s'agit d'un endommagement d'origine purement mécanique dû essentiellement à une « micro-déformation » mécanique qui a lieu au sein du béton quand il est chauffé. Avec une approche Macroscopique qui considère le béton comme matériau homogène, cette micro-déformation est inexistante car un champ de température homogène appliqué sur un échantillon libre de se dilater conduit à une déformation mécanique égale à zéro et par conséquent le matériau ne subira aucun endommagement.

Bases préliminaires :

Avec une approche macroscopique d'un milieu homogène isotrope, la déformation totale se décompose en 3 déformations :

La déformation hydrique ϵ_h : elle est de nature volumique et se déduit directement de l'humidité relative:

Pour un matériau isotrope :

$$\epsilon_h = \alpha_H DH\% . : 1$$

Nous supposons qu'il n'y a pas de pression de gaz hydrostatique pour une sollicitation très lente.

La déformation thermique ϵ_{th} : elle est de nature volumique et se déduit directement de la température : Pour un matériau isotrope :

$$\epsilon_{th} = \alpha_T DT^\circ : 2$$

La déformation mécanique ϵ_m : elle peut avoir comme origine:

- ◆ Les efforts mécaniques extérieurs F_{ext}
- ◆ Un gradient de température ou d'humidité $Grad(T)$ ou $Grad(H)$
- ◆ Les conditions aux limites (empêchement de la dilatation thermique ou hydrique libre)
- ◆ Une forme géométrique particulière conduisant à un auto-empêchement thermique ou hydrique même avec un champ de température ou d'humidité homogène (exemple un cylindre chauffé).

En fait lors d'un calcul mécanique avec un couplage simplifié avec la thermique et l'hydrique, le système à résoudre est le suivant :

$$K_{(U)} U = F_{exterieur} + F_{thermique} + F_{hydrique}$$

$F_{thermique}$ se déduit par le calcul suivant

$$F_{thermique} = \int_{\Omega} \sigma_{thermique} \delta \Omega \quad \text{et} \quad F_{hydrique} = \int_{\Omega} \sigma_{hydrique} \delta \Omega$$

avec

$$\sigma_{thermique} = \varepsilon_{thermique} \underline{E_{\varepsilon}(u)} \quad \text{et} \quad \sigma_{hydrique} = \varepsilon_{hydrique} \underline{E_{\varepsilon}(u)} : (\text{III.1})$$

$$\varepsilon_{ij}^{thermique} = \alpha_T T \delta_{ij} \quad \text{et} \quad \varepsilon_{ij}^{hydrique} = \alpha_H T \delta_{ij}$$

$$\text{avec} \quad \delta_{ij} = 1 \text{ si } i = j \quad \text{et} \quad \delta_{ij} = 0 \text{ si } i \neq j$$

En résolvant le système d'équation nous obtenons le vecteur de déplacement U en tous points de la structure par conséquent la déformation uX Totale $\varepsilon = \partial \varepsilon / \partial x$. La déformation totale est la somme de la déformation thermique hydrique et mécanique *Totale Mécanique thermique hydrique* :

$$\varepsilon = \varepsilon_{th} + \varepsilon_{hy} + \varepsilon_{mec} .$$

Pour simplifier il est à considérer que le béton est sec, et par conséquent pas de déformation hydrique.

Ainsi, **et sans transformation chimique**, seule la déformation mécanique est responsable d'un endommagement de la matière. Or les expériences menées en chauffant d'une manière homogène le béton montrent une baisse de sa rigidité et de sa résistance. Cette baisse de rigidité et de résistance ne peut pas être expliquée par la macro-mécanique d'un matériau homogène car la déformation mécanique est nulle.

$$\varepsilon_M = \varepsilon_{Totale} - \varepsilon_{th} - \varepsilon_h = 0$$

1.7.5 Hypothèse de l'existence de la déformation thermique microscopique

Cette baisse de rigidité et de résistance par un endommagement fissuration locale d'origine purement mécanique.

Nous en déduisons par conséquent que la loi de comportement

mécanique reste inchangée et que la baisse de rigidité et de résistance s’explique par une déformation mécanique supplémentaire d’origine thermo-microscopique liée à l’hétérogénéité du matériau.

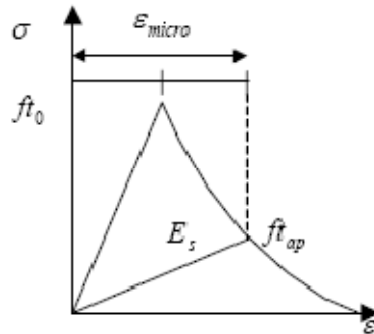


Figure 1.25: Micro déformation[Moun03].

En effet, dû à l’hétérogénéité du béton et à la différence des caractéristiques entre les granulats (rigidité, résistance, coefficient de dilatation) et le ciment, le béton subit des déformations et des contraintes mécaniques importantes pouvant dépasser localement la limite d’élasticité.

Ceci implique que même avec un champ de température homogène, il existe une déformation microscopique ainsi nous pouvons imaginer que la déformation totale se décomposera en 4 déformations :

$$\epsilon_{Totale} = \epsilon_M + \epsilon_{th} + \epsilon_h + \epsilon_{Microscopique}$$

L’existence de cette Thermo-micro-déformation a été mise en relief dans l’article du cahier CSTB [Moun 02] à travers l’exploitation du modèle béton numérique conjointement avec le nouveau modèle d’endommagement mécanique MODEV implémenté dans SYMPHONIE. Les figures suivantes montrent quelques résultats d’une simulation menée sur un cylindre en béton chauffé avec ou sans chargement mécanique.

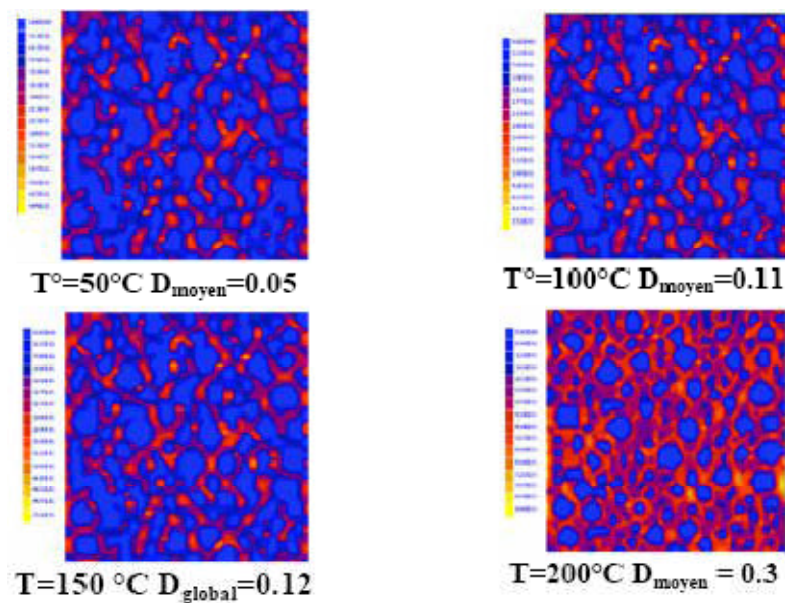


Figure I.26 : Evolution de l'endommagement en fonction de la température dans un VER de béton

[Moun 02].

I.7.6 Calcul de l'endommagement moyen à l'échelle macroscopique :

En toute rigueur, l'approche proposée permet de calculer par la méthode d'homogénéisation le tenseur d'élasticité macroscopique résultant de l'endommagement microscopique en fonction de la température.

La simulation d'un essai physique de type traction et compression (pour prendre en compte l'effet unilatéral). Cet essai numérique a pour but de déduire l'endommagement moyen dû à la température. L'incrément de déplacement imposé doit être très faible afin d'éviter l'endommagement mécanique supplémentaire.

Elle permet donc d'obtenir la relation force déplacement et d'en déduire ensuite l'endommagement moyen du VER selon la méthode suivante :

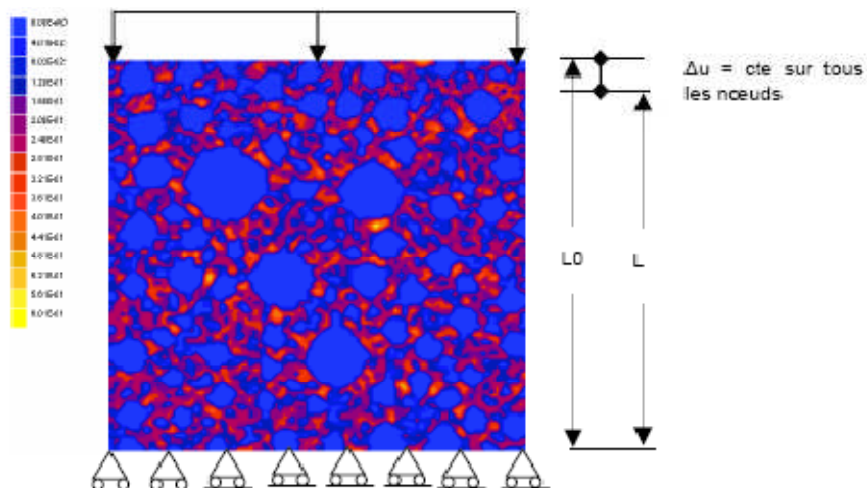


Figure 1.27 :Mesure de l'endommagement moyen (macroscopique)

[Moun 02].

A chaque noeud i de la face supérieure du VER, on applique un déplacement imposé ΔU_i et on calcule la force résultante ΔF_u correspondant aux réactions nodales ΔR_i :

$$\Delta F_u = \sum \Delta R_i$$

En supposant la nature isotrope de l'endommagement, le module apparent E_a est donc obtenu de la manière suivante :

$$\Delta \sigma = \frac{\Delta F_u}{S} = E_a \frac{\Delta U}{L_0}$$

Où L_0 est la longueur initiale du VER et S sa section

L'endommagement moyen D_{moyen} est donc déduit de la relation classique suivante :

$$E_a = E_0 (1 - D_{moyen})$$

$$D_{moyen} = 1 - \frac{E_a}{E_0}$$

La courbe suivante montre la variation du module apparent estimé :

Evolution du module apparent en fonction de T°

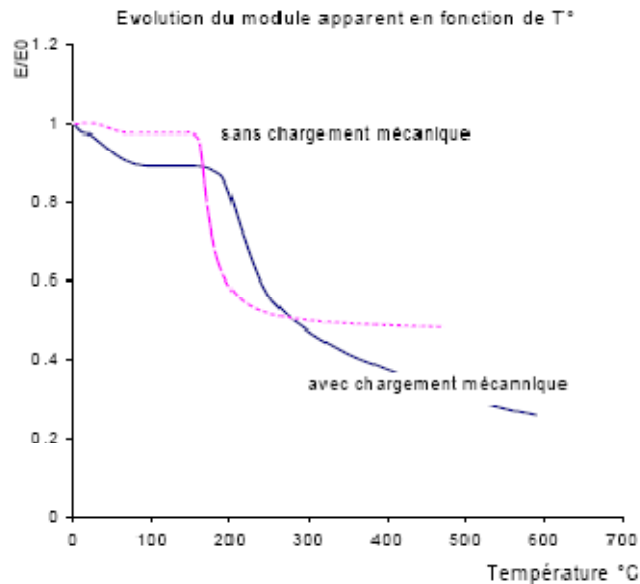


Figure I.28 : Evolution du module apparent moyen en fonction de la température [Moun 02].

L'intérêt principal de ce type d'approche (approche micro-macro) réside dans la possibilité d'explorer les mécanismes de déformations élémentaires qui sont à l'origine d'un comportement globale complexe. Ceci apporte une aide précieuse pour la compréhension de phénomènes que nous observons d'une manière globale et que nous attribuons à des lois de comportements macroscopiques apparentes. Dans notre cas, il s'agit de comprendre l'origine d'un comportement complexe que montre le béton face à une sollicitation thermique, et d'identifier ainsi l'origine de l'évolution de l'endommagement obtenue sur la courbe précédente.

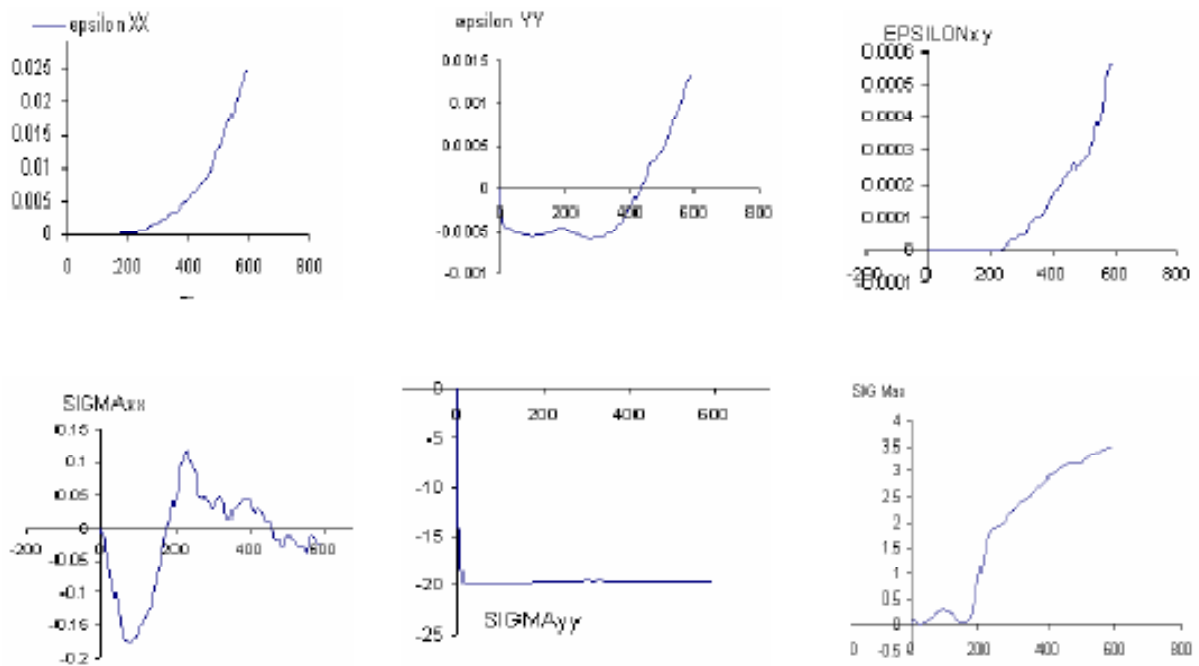


Figure I.29 : Courbes d'évolution des contraintes et déformations moyennes en fonction de la température

[Moun 02].

D'une manière générale, nous constatons une variation importante de l'évolution de l'endommagement après 200°C. Nous constatons également une évolution importante de la déformation mécanique selon X à partir de cette température.

La déformation mécanique tracée sur cette courbe est issue de l'équation de décomposition des déformations:

$$\epsilon_M = \epsilon_{Totale} - \epsilon_{th}$$

Pour un calcul macroscopique avec un milieu homogène et en revenant à la définition de la déformation, la déformation mécanique tracée contient la déformation mécanique d'un milieu homogène plus la déformation thermo-microscopique. Il s'agit donc d'une déformation mécanique totale $\epsilon_{MTotale}$

$$\varepsilon_{M\text{Totale}} = \varepsilon_M + \varepsilon_{\text{Microscopique}}$$

De plus, pour expliquer l'évolution de l'endommagement par rapport aux différentes courbes tracées, nous constatons que la courbe la plus intéressante est celle de l'évolution de la contrainte principale maximale. Avec cette courbe nous pouvons même tracer une corrélation directe entre la contrainte maximale de traction et l'évolution de l'endommagement. Ceci, nous permet de donner une première explication possible de l'évolution de l'endommagement du béton sous champ de température homogène et d'attribuer ainsi la baisse de rigidité et de la résistance à l'ouverture des microfissures dans le béton.

I.7.7 Approche multi échelles pour l'étude de l'endommagement thermique du béton

Dans la partie précédente il a été démontré l'existence d'une déformation empêchée qui a lieu au sein du béton et cela même avec une montée homogène en température. Dans le cas que l'état local de contraintes est loin d'être négligeable (ou nul selon l'hypothèse des modèles macroscopiquement homogène). En effet, même si la somme des contraintes sur un VER peuvent être nulle, les contraintes locales à l'échelle mésoscopique peuvent dépasser la résistance du matériau et conduire ainsi à l'endommagement purement mécanique du béton. Dans la suite nous exposons une démarche globale pour la prise en compte des différentes origines de l'endommagement thermique du béton en vue d'élaborer un modèle global :

La technique d'homogénéisation considère plusieurs échelles pour la modélisation. Elle considère par exemple le mortier comme un matériau à deux phases : la pâte de ciment et n phases de granulats de sables définie selon la granulométrie du matériau. La figure suivante présente les échelles choisies pour homogénéiser le mortier et le béton.

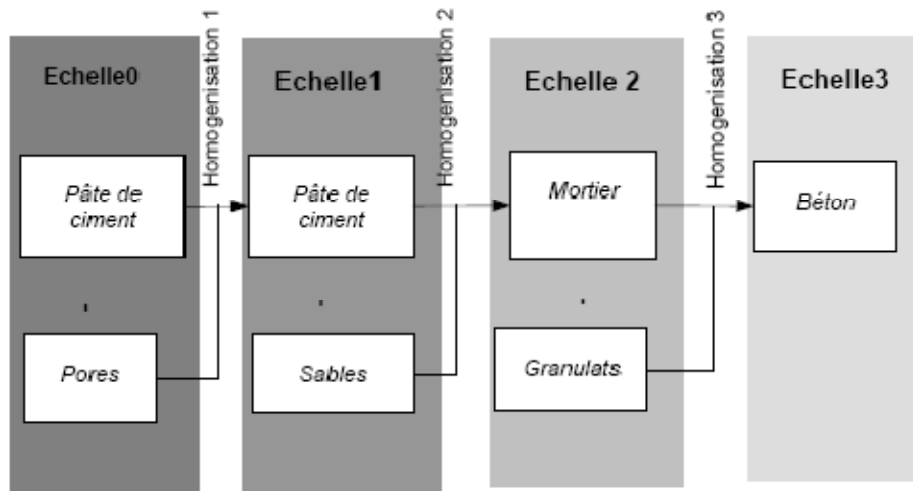


Figure I.30: Principe de l'approche par homogénéisation

[Moun 02].

I.8 Le modèle d'endommagement thermo mécanique

Ils sont classés en deux grandes catégories les mécanismes de base qui conduisent à l'endommagement du béton à haute température :

- Endommagement thermique accompagné de déformations empêchées (à l'échelle macroscopique ou microscopique).
- Endommagement thermique d'origine physicochimique.

I.8.1 Endommagement d'origine mécanique (macro et microscopique)

Le paramètre d'endommagement d représente donc la combinaison de deux endommagements thermiques :

- **Le premier** est un endommagement thermique d'origine mécanique dû aux déformations empêchées à l'échelle **macroscopique**, comme celles dues au gradient de température où aux conditions aux limites de blocage des déplacements...

Cet endommagement est modélisé d'une manière classique, à l'échelle du VER, par le modèle d'endommagement MODEV [Moun 2002] présenté au chapitre bibliographique.

L'endommagement mécanique se décompose en deux parties :

- a. un endommagement sphérique D_s .
- b. un endommagement déviatorique D_d

La combinaison linéaire des deux donne l'endommagement macro mécanique

d_{macro} tel que :

$$(1 - d_{macro}) = (1 - D_s)(1 - D_d)$$

$$D_{mécanique} = 1 - (1 - d_{micro})(1 - d_{macro})$$

- **Le second est micromécanique à l'échelle mésoscopique** se manifeste par déformation micromécanique engendrée par une dilatation différentielle entre la pâte et les granulats d_{micro} .

Par une exploitation du modèle BN, l'endommagement thermique micro d_{micro} sera quantifié en fonction de la température T , de la taille maximum des granulats d_a , de la nature des granulats.

Nous pouvons écrire maintenant que :

$$D_{mécanique} = 1 - (1 - d_{micro})(1 - d_{macro})$$

I.8.2 Endommagement d'origine physicochimique

Pour les températures de notre étude, nous avons postulé que l'endommagement physicochimique a lieu essentiellement dans la pâte de

ciment alors que l'endommagement dû à la dilatation différentielle est essentiellement à l'interface pâte granulats.

C'est un endommagement non accompagné de déformations, il représente les effets physico-chimiques et la dégradation dans la pâte de ciment en fonction de la température.

Le paramètre g de l'endommagement thermique dans la pâte de ciment, sera déterminé en exploitant les données expérimentales réalisés dans le cadre de cette thèse et en particulier les essais de flexion trois points à haute température sur la pâte de ciment Mounajed et al 2003.

$$D_{chimique} = g$$

Il en résulte que l'endommagement total D s'écrit de la manière suivante :

$$1 - D = (1 - D_{mécanique}) (1 - D_{chimique}) = \underbrace{(1 - D_s)(1 - D_d)}_{1-d} \underbrace{(1 - d_{micro})}_{dilatation} \underbrace{(1 - g)}_{chimique}$$

La figure suivante montre une présentation hiérarchique de l'approche d'endommagement thermique

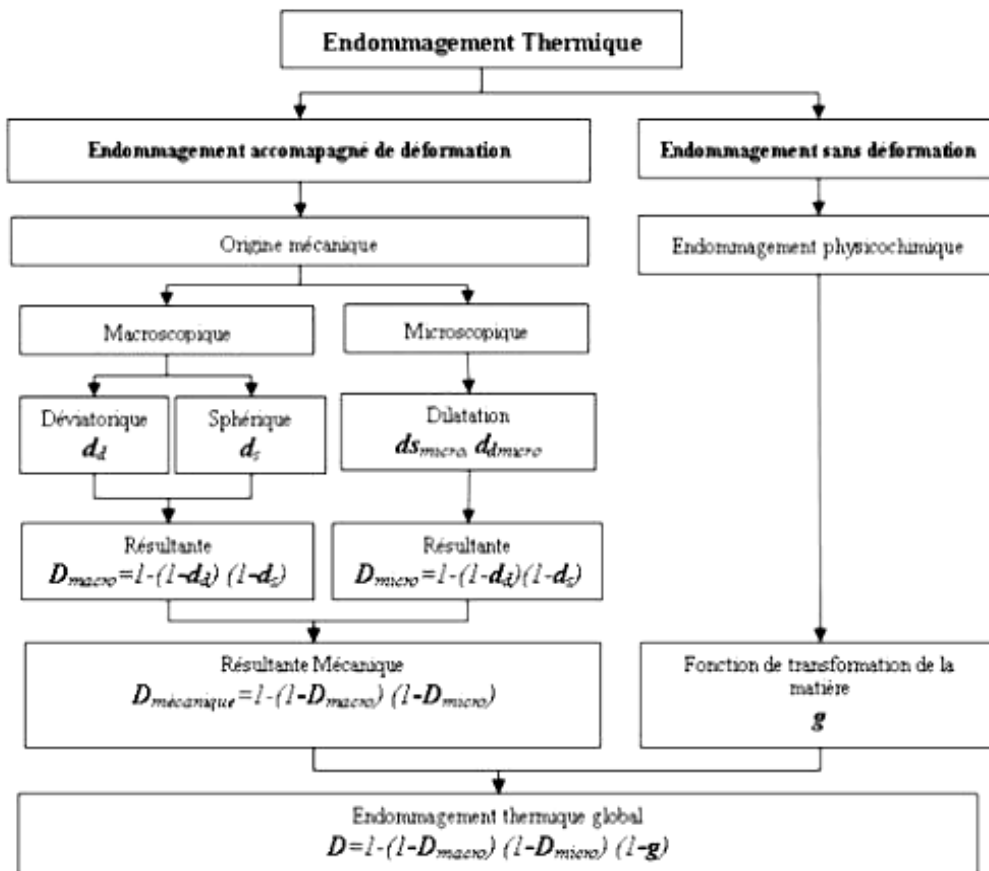


Figure I.31: Organigramme de l'approche d'endommagement thermique

[Moun 02].

La loi de comportement en traction simple du modèle d'endommagement s'écrit alors sous la forme :

$$\sigma(\varepsilon) = (1 - d)(1 - g)E_0\varepsilon$$

E_0 : est le module élastique initiale du matériau sain et la loi d'évolution de l'endommagement mécanique en traction est donnée par :

$$1 - d_t = \frac{\varepsilon_{d_0}}{\varepsilon} \exp(-B_t(\varepsilon - \varepsilon_{d_0}))$$

L'approche non locale permet d'introduire, dans la loi d'évolution de l'endommagement mécanique ci-dessus, l'énergie de fissuration G_f en fonction

de la température, en la reliant au terme d'écrouissage de l'endommagement B_t :

$$G_f(T) = l_c \frac{f_t(T)}{B_t(T)}$$

B_t : écrouissage de l'endommagement ;

G_f : énergie de fissuration [J/m²] ;

ε_{d0} : seuil de déformation en traction ;

l_c : taille caractéristique des éléments ;

E : module d'élasticité [Pa] ;

f_t : contrainte de traction au pic [Pa].

L'énergie de fissuration G_f est une fonction de la température. On a ainsi un terme de couplage entre l'endommagement mécanique et thermique.

1.8.3 La quantification de l'endommagement

La quantification de l'endommagement et de l'énergie de fissuration à haute température est un problème difficile à évaluer expérimentalement, vu la complexité du contrôle des chargements, de la température et de l'humidité. D'ailleurs il y a relativement peu de données sur l'évolution de l'énergie de fissuration à haute température à l'exception de quelques travaux : [Baz 88], [Stab 98], [Hei1 998], [Fel 99], Ces données sont peu précises et contradictoires, en effet il n'y a pas de consensus sur le sens variation de G_f , [Stab 98], [Hein 98], [Fel 99] ont constaté une augmentation de G_f en fonction de la température contrairement à [Baz 88].

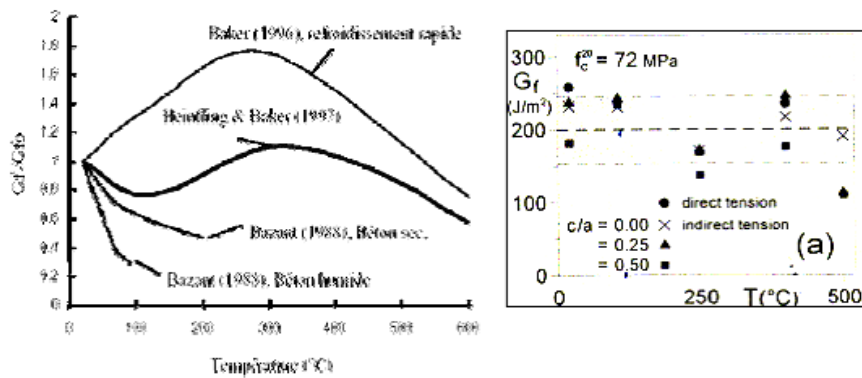


Figure I.32 : Courbes d'évolution expérimentale de l'énergie de fissuration en fonction de la température

[Moun 02].

I.8 .4 Identification expérimentale de l'endommagement physicochimique

Selon ce modèle, une nouvelle variable d'endommagement à haute température a été introduite dans le modèle MODEV. Cette variable prend en compte l'endommagement thermique d'origine physico-chimique. Elle vient se rajouter à la variable d'endommagement mécanique utilisée pour la prise en compte de la baisse de rigidité engendrée par une déformation micro ou macroscopique. Ainsi, l'endommagement thermique d'origine physico-chimique a été identifié à partir des résultats des essais [Moun 03]. La figure suivante montre la fonction qui alimentera le modèle.

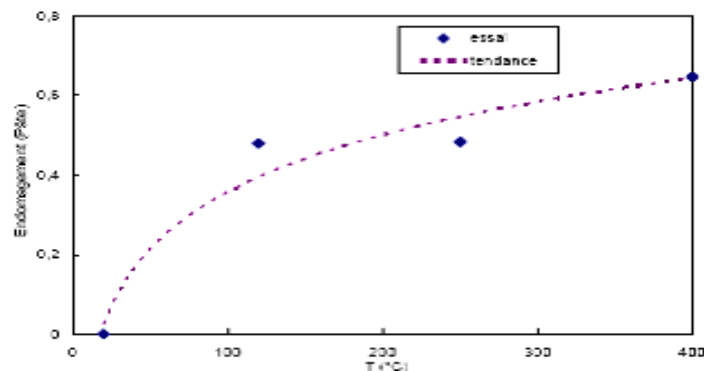


Figure I.33: Endommagement thermique d'origine physico-chimique

[Moun 03].

La fonction d'endommagement d'origine physico-chimique peut être écrite sous la forme suivante:

$$g(T) = 0,2 \cdot \ln(T) - 0,6$$

I.8.5 Validation du modèle et comparaison avec l'expérience

La validation du modèle a été effectuée sur la base d'une étude expérimentale [Moun 2003] dont l'objectif est double: fournir d'une part les données expérimentales nécessaires à la modélisation numérique en déterminant les paramètres d'entrée du modèle d'endommagement thermomécanique et d'autre part confronter le comportement expérimental des matériaux cimentaires à haute température aux simulations numériques.

Cinq matériaux ont été testés; une pâte de ciment, un mortier à hautes performances, un béton ordinaire, un BHP à granulats calcaires et un BHP à granulats silico-calcaires.

Les matériaux ont été testés sur un bâti de flexion trois points selon les recommandations de la RILEM, de manière à obtenir des essais complètement stables. Pour chaque matériau, 3 éprouvettes entaillées 100*100*400 mm³ ont été testées en flexion 3 points jusqu'à la rupture. Les éprouvettes ont été testées à 20 °C après avoir subi un cycle de chauffage refroidissement avec une température de palier de 20, 120, 250 ou 400 °C. Une vitesse de 0.5°C/min a été adoptée pour les phases de chauffage refroidissement. Cette vitesse a été optimisée par simulation afin d'éviter l'endommagement mécanique par effet de gradient de température.

L'étude expérimentale a permis, l'obtention de l'évolution des principales caractéristiques thermomécaniques des matériaux cimentaires testés, d'alimenter le modèle « béton numérique » et le modèle d'endommagement thermique du

code de calcul SYMPHONIE.

A cause de sa composition, nous postulons que les réactions physicochimiques ont lieu principalement dans la pâte de ciment dans la gamme de température étudiée. Or cet endommagement noté g dans le modèle ne peut être identifié que de manière expérimentale.

Résultats sur mortier de haute performance (MHP)

Il s'agit d'une éprouvette entaillée en mortier de dimension (100x100x400 mm³) chauffée lentement avec une vitesse de 0,5°C/min jusqu'à 400°C.

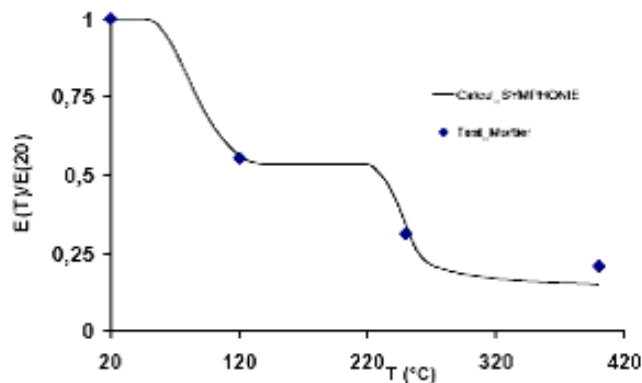


Figure I.34 : Baisse de rigidité du MHP reproduit par simulation

[Sullivan 71].

Les résultats d'essais de flexion trois points réalisés par Sullivan et al (1971) sur des éprouvettes de mortier. La simulation montre que l'endommagement est quasi stable entre 120 e 250°C, ce qui a été également constaté expérimentalement par Sullivan et al. Il faut noter que c'est dans cette plage de température qu'on constate le moins d'écart entre le coefficient de dilatation thermique de la pâte et celui du sable et des granulats.

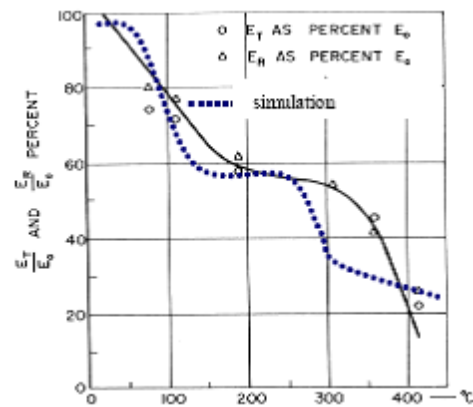


Figure I.35: Rapport du module d'un mortier ordinaire en fonction de la température (Essai flexion Sullivan et al 1971)

E_R : module mesure après refroidissement (à froid).

E_T : module à la température de traitement (à chaud).

E_0 : module du matériau saint à 20°C.

I.9 Conclusion

Les phénomènes de transfert de chaleur ont été décrits d'une façon générale puis les spécificités des matériaux poreux tels que les bétons ont été discutées. A température ambiante, le transfert de chaleur au sein du béton s'effectue par conduction dans la matrice solide et dans les pores. A température ambiante, le rayonnement dans les pores joue un rôle uniquement à partir d'un certain volume et taille de pores. Les transferts de chaleur dans les bétons sont donc essentiellement régis par leurs valeurs de conductivité thermique et de capacité thermique. L'amélioration conjointe du comportement thermique d'hiver et du confort thermique d'été nécessite de connaître ces deux paramètres. Le transfert par conduction d'un matériau poreux est fortement influencé par le volume des pores, leurs tailles et la distribution spatiale de la porosité. La teneur en eau modifie aussi les valeurs des propriétés thermophysiques. Or le béton met longtemps à perdre son eau résiduelle de gâchage, est soumis à des remontées capillaires et au phénomène d'adsorption de l'humidité ambiante. La température est aussi un paramètre climatique qui impacte la conductivité des matériaux poreux.

Avec la réglementation thermique RT 2012, les exigences sur l'efficacité de l'isolation thermique du bâtiment sont de plus en plus sévères. L'utilisation d'une technique d'isolation répartie peut permettre d'éviter des dispositifs constructifs lourds. Les granulats légers introduisent dans le béton un volume d'air supplémentaire améliorant ainsi le pouvoir isolant du béton. L'utilisation de ces bétons peut être une solution pour permettre de répondre aux exigences de la réglementation thermique 2012.

La synthèse réalisée dans ce premier chapitre permet de dresser un bilan des connaissances sur les caractéristiques thermiques et mécaniques des bétons de granulats légers. L'étude des paramètres de formulation a montré que l'augmentation de la fraction volumique des granulats légers, la composition de

la matrice cimentaire avec notamment des substitutions en additions minérales permet de diminuer la valeur de conductivité thermique. Contrairement aux bétons de granulats ordinaires, la résistance du béton de granulats légers dépend fortement de la résistance des granulats légers et donc de leur fraction volumique dans le béton. Ainsi l'amélioration des performances thermiques s'accompagne en générale d'une diminution de résistance à la rupture et de module d'Young des bétons. D'après les résultats des différentes études, la prévision des caractéristiques thermiques et mécaniques à partir de la seule masse volumique des bétons n'est pas possible. Des études antérieures ont pu mettre en relation l'influence des différents paramètres de formulation et de la nature des granulats (minéralogie, absorption d'eau, état hydrique) sur les propriétés mécaniques des granulats. Ces études ne portaient cependant pas sur des bétons particulièrement isolants et les formulations étaient en grande majorité composées de gravillons légers et de sable de densité normale. A l'inverse, les études déjà réalisées sur les propriétés thermiques des bétons légers sont peu nombreuses et concernent essentiellement des bétons de bloc de construction avec des exigences de résistance en compression inférieures à 10 MPa. Il existe donc pratiquement aucun résultat sur l'étude conjointe de la résistance (module) et de la conductivité thermique des bétons dont la résistance en compression soit supérieure à 25 MPa. Des bétons de masses volumiques identiques pouvant aboutir à des performances mécaniques très diverses, il est donc possible d'optimiser le couple pouvoir isolant, performances mécaniques en fonction des différentes combinaisons de granulats et des paramètres de formulation.

Nous nous proposons donc d'étudier des formulations de béton de granulats légers avec une substitution partielle ou totale en sable léger. Nous analyserons les comportements mécanique et thermique de ces bétons en fonction de la fraction volumique de sable léger, de la composition de la

matrice cimentaire et de la nature des gravillons et sables légers.

La bibliographie a montré l'importance de la teneur en eau sur la conductivité thermique des matériaux poreux. Du fait de leur porosité, les bétons de granulats légers ont un comportement hygroscopique, et leur teneur en eau peut donc varier, modifiant ainsi le comportement thermique de ces bétons. Nous compléterons donc notre étude par une analyse de l'influence des différents états d'humidité sur la conductivité, la chaleur spécifique et la diffusivité en fonction de la nature des granulats. L'influence des variations de températures dans la plage des températures usuelles d'usage des bâtiments sur les propriétés thermiques des bétons de granulats légers sera aussi abordée dans le cas d'un matériau sec.

L'étude des comportements thermique et mécanique des bétons de granulats légers est complétée par les simulations .L'objectif de la modélisation du transfert thermique est de quantifier le pouvoir isolant des bétons de granulats légers et le comparer au béton ordinaire.

L'approche multi échelles et multi physiques a permis de mettre en évidence l'existence de la déformation micromécanique due à la dilatation différentielle entre la pâte et les granulats et responsable en partie de l'endommagement sous effet thermique du béton.

C'est une approche originale permettant l'identification par simulation des lois de comportement des bétons à hautes températures. Cette approche a été également appliquée avec succès pour expliquer les observations expérimentales du comportement thermomécanique du béton sous chargement mécanique, appelé communément « fluage thermique transitoire ». En fin, une application aux bétons réfractaires soumis à des très hautes températures a été réalisée.

Chapitre II

*Analyse des matériaux et confection du béton léger
composé de différents sables*

II.1 Principe de base

Les constituants d'un béton léger sont les mêmes que ceux d'un béton traditionnel à l'exception des granulats légers. Cependant, dans le cas des bétons légers, l'absorption des granulats légers doit faire l'objet d'une attention particulière.

À l'étape du malaxage, lorsqu'une certaine quantité d'eau est ajoutée, la quantité disponible pour humidifier le ciment et permettre sa réaction dépend de la quantité d'eau absorbée par les granulats légers. Cette quantité d'eau peut être très importante. Cette particularité confère à chaque béton un caractère unique [CAL13].

Dès lors, il n'existe pas de règle absolue dans la formulation d'un béton léger [CAL13]. Dans certains cas, les granulats légers sont utilisés secs, dans d'autres, complètement saturés, selon les objectifs visés. [COQ76] a notamment mené des travaux sur l'effet de ce paramètre avec des résultats assez étonnants [CAL13]. Par exemple, l'utilisation de granulats secs améliorerait la résistance en compression pour un type de granulats légers. Cependant, la maniabilité diminuait [COQ76].

En pratique, les auteurs semblent s'accorder sur le point suivant [CAL13] : dans le cas où les granulats légers sont humidifiés avant d'être utilisés pour la fabrication du béton des distinctions doivent être effectuées dans la description des quantités d'eau en jeu. En effet, deux quantités d'eau sont à prendre en compte : d'une part l'eau absorbée ou eau interne qui n'est pas considérée dans l'eau de gâchage, d'autre part l'eau absorbée à la surface des granulats légers ou eau superficielle qui elle fait partie de l'eau de gâchage [COQ76] ; [HOL04].

II.2 Approche de Holm :

L'approche proposée par Holm [HOL 04] constitue la base de l'étude présentée dans cet article .Concrètement elle vise à estimer la quantité d'eau en provenance de granulats légers humidifiés ou saturés qui va intervenir dans l'eau de gâchage d'un béton léger. L'hypothèse formulée par Holm est la suivante : seule l'eau adsorbée à la surface des granulats légers se retrouve dans l'eau de gâchage et influe sur le rapport E/C.

Dès lors, un protocole a été mis en place pour estimer cette quantité d'eau. Il s'articule autour de deux mesures de teneur en eau des granulats légers afin d'arriver à l'estimation finale suivante :

$$\mathbf{MAD = MT - MAB} \quad \mathbf{(II-1)}$$

MAD= eau libre comptée dans le rapport E/C (% masse).

MT=Teneur en eau effective des granulats au moment de la fabrication du béton léger (%), selon la norme [ASTMC 566-97] ;

MAB=Teneur en eau des granulats légers selon la norme ASTM 566-97[16], après que la surface ait été séchée avec une serviette.

Cette hypothèse va être utilisée dans le cadre du présent article afin d'obtenir un rapport E/C effectif le plus proche possible de celui souhaité.

II.3 La Formulation

Le principe dans la formulation du béton léger étudié réside dans le remplacement des gros granulats par le même volume de gros granulats légers. Pour obtenir un béton de qualité. Cette phase consiste à ajuster expérimentalement la formulation du béton perdu en fonction des résultats obtenus par des essais chimiques effectués au laboratoire du LTPO afin de préserver ultérieurement la durabilité , la résistance aux agressions chimiques du

milieu environnement (milieu marin, milieu humide, effet du gel...etc) et aux sollicitations mécaniques de béton léger dont l'un des objectifs est le mûrissement est donc de maintenir le béton saturé, ou aussi saturé que possible jusqu'à ce que les pores remplis d'eau à l'origine de la pâte fraîche soient remplis jusqu'au point désiré par les produits d'hydratation [HOL04].

Dans ce chapitre deux parties sont définies : des essais appliqués aux différents composants du béton léger afin de déterminer les valeurs optimales à prendre en considération dans la deuxième partie de cette recherche.

Des essais physiques, chimiques, et mécaniques ont été effectués au sein des laboratoires suivants :

- _ Laboratoire LTPO d'ORAN
- _ Laboratoire du Département de Génie Civil d'Université Djilali

Liabes.

-Laboratoire LGCE de Cergy Pontoise.

II.3.1 Caractérisations des constituants

II.3.1.1 Sable

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur le mortier, il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées et le prix de revient des bétons, sachant qu'il doit être propre et ne pas contenir d'éléments nocifs.

Trois types de sable ont été utilisés dans cette étude , le sable de carrière de Sidi bel abbes ,le sable de dune de Taghit et le sable de dune d'Adrar.

- **Equivalent de sable (NF EN 933-8) .**

L'essai s'effectue sur un échantillon de sable ou il faut vérifier que les grains de sable ont bien un diamètre inférieur à 2 mm par tamisage et vérifier que la masse sèche de l'échantillon soit de 120 g.

La procédure opératoire des essais est la suivante :

Tamiser le sable humide à 2 mm en récupérant les fines restantes sur le tamis à l'aide d'une petite brosse, et peser 120 g de sable sec.

Remplir de solution lavant la première éprouvette en plastique jusqu'au trait repéré inférieur, et verser le sable pesé, tapoter le fond de l'éprouvette.

Laisser reposer 10 minutes, puis mettre alors le bouchon et placer l'éprouvette sur machine à secouer, et tourner le bouton vers la droite jusqu'à la butée. À la fin de l'agitation, retirer l'éprouvette, enlever son bouchon.

Plonger le tube laveur au fond de l'éprouvette, et faire remonter les fines par un mouvement rotatif du tube, tout en le faisant remonter.

Arrêter de verser de la solution lorsque le niveau atteint la deuxième graduation, puis poser l'éprouvette sur la paille à l'abri d'éventuelles vibrations, laisser reposer 20 minutes.

Au bout des 20 minutes, mesurer la hauteur (h_1) du niveau supérieur de flocculat par rapport au fond du cylindre.

Placer le manchon sur le cylindre, puis abaisser soigneusement l'ensemble du piston dans le cylindre, jusqu'à ce que l'embase repose sur le sédiment.

- Bloquer la tige en serrant la vis.

- Déterminer la hauteur du sédiment (h_2) en mesurant la distance entre la face inférieure de la tête du piston et la face supérieure du manchon, en plaçant le réglet dans l'encoche du manchon.

- Répéter l'opération sur une deuxième prise d'essai.

On calcule pour chaque éprouvette, le rapport (SE) avec la formule suivante:

$$SE = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \dots \dots \dots \text{(II.2)}$$

Où

- **Hauteur h_1** : sable propre +élément finis,
- **Hauteur h_2** : sable propre seulement,
- **SE** : la valeur de l'Equivalent de sable

Selon que la hauteur h_2 est mesuré visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine **ES_v** (équivalent du sable visuel) ou **ES_p** (équivalent du sable au piston).

ES à vue	ES à piston	Nature et qualité du sable
ES < 65%	ES < 60%	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité ou vérification plus précise de la nature des fines par un essai au bleu de méthylène.
65% ≤ ES < 75%	60% ≤ ES < 70%	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
75% ≤ ES < 85%	70% ≤ ES < 80%	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ES ≥ 85%	70% ≤ ES < 80%	Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

Tableau II.1 : Les valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et qualité du sable.

▪ **Valeur de bleu méthylène (NF EN 933-9)**

Permet de évaluer la quantité et la nature des argiles contenues dans les sables, sur une fraction inférieure à 2 mm .Elle se fait par absorption d'une quantité de bleu de méthylène proportionnelle à la quantité exposée. Plus les agrégats seront argileux plus la valeur augmentera (signifiant que l'argile est fortement active et donc nuisible).

La procédure opératoire des essais est la suivante :

Peser 30 g de sable, et 500 g d'eau déminéralisée dans le bêcher de 3l. Placer- le bêcher sous l'agitateur, descendre la pale et verser les fines, et régler la vitesse d'agitation à 600 tours par minute, pendant 5 minutes.

Diminuer la vitesse pour une agitation de 400 tours/minute pour le reste de l'essai, puis verser 1 ml de solution de bleu, agité pendant 1 minute. Prélever, à l'aide de la baguette de verre, une goutte de suspension. Déposer la goutte sur le papier - filtre. Noter le volume total de solution injectée : V

La Valeur Bleu de Méthylène est déterminée par la relation :

$$VB = \frac{V}{M} \times 10 \dots\dots\dots (II.3)$$

VB : Valeur de bleu de l'échantillon (en g de bleu / kg de fines).

V : Volume total de solution injectée en l.

M : Masse de la prise d'essai en grammes.

10 : Valeur constante.

▪ **Masse volumique absolue : (NF EN 1097-6)**

La masse volumique absolue d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau déduction faite de tous les vides, aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains.

Le présent travail décrit la **Méthode au pycnomètre pour les grains compris entre 0,063 mm et 31, 5 mm** pour la détermination de la masse volumique réelle .

▪ **Coefficient d'absorption d'eau des granulats. (sable)**

Pycnomètre, se composant d'un flacon en verre, ou tout autre récipient approprié, d'une capacité comprise entre 250 ml et 2 000 ml, constante à 0,5 ml pendant la durée de l'essai, et de l'entonnoir en verre correspondant.

Note 1 : Le volume du pycnomètre doit être choisi en fonction de la taille de la prise d'essai.

Préparation des éprouvettes :

Dimension maximale des granulats mm	Masse minimale de la prise d'essai kg
31,5	1,5
16	1,0
8	0,5
≤4	0,25

Tableau (II.2): masse minimale des éprouvettes

▪ **Méthode de pycnomètre**

Préparation de la prise d'essai

Les granulats doivent être échantillonnés conformément à l'EN 932-1, puis réduits conformément à l'EN 932-2.

L'essai doit être réalisé en utilisant deux prises d'essai. Préparer chacune d'elles pour obtenir un volume compris entre 0,5 l et 0,6 l. La laver sur un tamis de 4 mm afin d'éliminer les grains les plus fins, puis la laisser s'égoutter. Écartier tous les grains refusés au tamis de 31,5 mm.

- Maintenir le bain d'eau à une température de (22 ± 1) °C pendant toute la durée de l'essai.

- Peser le pycnomètre et son entonnoir, ou, s'il s'agit de granulats légers flottants, peser le pycnomètre, la grille et l'entonnoir (M_1).
 - Sécher les prises d'essai dans l'étuve à (110 ± 5) °C jusqu'à masse constante.
 - Laisser refroidir à température ambiante et placer avec précaution la première prise d'essai dans le pycnomètre.
 - Peser le pycnomètre contenant la première prise d'essai, ou, s'il s'agit de granulats légers flottants, insérer la grille dans le pycnomètre, placer l'entonnoir au sommet et peser le tout (M_2).
 - Remplir le pycnomètre avec de l'eau jusqu'au repère. Sortir le pycnomètre du bain d'eau, sécher soigneusement ses parois extérieures et peser (M_3).
 - Répéter la procédure avec la deuxième prise d'essai.
- Noter toutes les pesées avec une précision égale ou supérieure à 0,1 % de la masse de la prise d'essai ($M_2 - M_1$).

Note:1 Pour éviter que l'entonnoir n'adhère au pycnomètre, il est possible d'appliquer sur la zone de contact un peu de gel de silicone avant la pesée.

Masse volumique réelle pré-séchée :

$$\rho_p = \rho_w \frac{(M_2 - M_1)}{V - (M_3 - M_2)} \dots\dots\dots (\text{II.4})$$

Où :

M_1 est la masse du pycnomètre et de l'entonnoir, en grammes ;

M_2 est la masse du pycnomètre, de l'entonnoir et de la prise d'essai, en grammes ;

M_3 est la masse du pycnomètre, de l'entonnoir, de la prise d'essai et de l'eau, en grammes ;

V est le volume du pycnomètre, en millilitres ;

ρ_w est la masse volumique de l'eau à la température d'essai, en méga grammes par mètre cube. Arrondir la valeur de la masse volumique à 0,001 Mg/m³ près. Arrondir la moyenne des résultats des deux prises d'essai à 0,01 Mg/m³ le plus proche.

▪ **Coefficient d'absorption (W_F)**

Les granulats doivent être échantillonnés conformément à l'EN 932-1, puis réduits conformément à l'EN 932-2

$$W_F = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100 \dots\dots\dots (II.5)$$

Ou :

M_1 : masse humide du sable.

M_2 : masse après séchage du sable.



Figure (II.1) : mesure de la masse volumique

▪ **Analyses granulométriques des sables (EN 933-1 , EN 933-2)**

L'analyse granulométrique permet de classer un sable selon les différents diamètres granulaires. Il est atteint par le tamisage manuel d'un échantillon dans

une série de tamis et de déterminer le pourcentage de passants et du refus sur chaque tamis. Les quantités tamisées sont : 2000 g pour tous les sables.

Exécution de l'essai :

1) Lavage

Placer la prise d'essai dans un récipient et ajouter l'eau nécessaire pour la recouvrir.

Note 1 : une période de trempage de 24 h facilite la séparation des mottes. Un agent de dispersion peut être utilisé.

Agiter la prise d'essai suffisamment vigoureusement pour obtenir une séparation complète et la mise en suspension des fines.

Humidifier les deux côtés d'un tamis de 63 μm réservé à l'usage exclusif de cet essai, et adapter un tamis de protection (par exemple, d'ouverture 1 mm ou 2 mm) au-dessus. Placer les tamis de façon que la suspension passant à travers le tamis puisse être évacuée ou, si besoin est, recueillie dans un récipient adéquat.

Verser le contenu du récipient sur le tamis supérieur. Poursuivre le lavage jusqu'à ce (m) soit claire. que l'eau passant à travers le tamis de 63 .

Sécher le refus sur le tamis de 63 μm à $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ jusqu'à ce que la masse soit constante. Laisser refroidir, peser et inscrire le résultat, soit **M2**.

2) Tamisage

Verser le matériau lavé et séché (ou l'échantillon sec directement) dans la colonne de tamis. Cette colonne est constituée d'un certain nombre de tamis emboîtés, et disposés de haut en bas, dans un ordre de dimension de mailles décroissant, avec le fond et le couvercle.

Note1: L'expérience prouve que le lavage n'élimine pas nécessairement l'ensemble des fines. Il est donc nécessaire d'introduire un tamis de contrôle de 63 μm dans la colonne.

Agiter la colonne, manuellement ou mécaniquement, puis reprendre un à un les tamis en commençant par celui qui présente la plus grande ouverture et

agiter manuellement chaque tamis en s'assurant qu'il n'y a pas de perte de matériau, en utilisant, par exemple, un fonds et un couvercle.

Transvaser tout le matériau qui passe à travers chaque tamis sur le tamis suivant de la colonne avant de poursuivre l'opération avec ce tamis.

Note 2 : L'exécution du tamisage peut être considérée comme achevée lorsque le refus ne change pas de plus de 1,0 %, en 1 min de tamisage.

3) Dimension nominale des ouvertures

Lors d'une analyse granulométrique, les tamis de la série suivante compris entre d et D de la taille du produit désigné, doivent être utilisés en plus de tout autre tamis nécessaire :

- 0,063 mm ; 0,125 mm ; 0,250 mm ; 0,500 mm ; 1 mm ; 2 mm ; 4 mm ; 8 mm ; 16 mm ; 31,5 mm ; 63 mm ; 125 mm.

Peser le refus au tamis ayant la dimension de maille la plus grande et noter sa masse R_1 .

Effectuer la même opération pour le tamis immédiatement en dessous, et noter la masse du refus R_2 .

Poursuivre la même opération pour tous les tamis qui sont dans la colonne, afin d'obtenir la masse des différentes fractions de matériaux retenus et noter ces masses, $R_3, R_4, \dots R_i, \dots R_n$.

Peser le matériau tamisé, restant dans le fond le cas échéant, et inscrire la valeur de sa masse soit P .

Calculer la masse des refus sur chaque tamis, exprimée en pourcentage de la masse sèche d'origine M_1 .

Calculer le pourcentage cumulé des différents tamisât de la masse sèche d'origine passant m non compris jusqu'au tamis de 63.

Calculer le pourcentage de fines (f) passant à travers le tamis de 63 µm conformément à l'équation suivante :

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \dots \dots \dots \text{(II.6)}$$

Où :

M_1 est la masse séchée de la prise d'essai, en kilogrammes ;

M_2 en kilogrammes ; est la masse séchée du refus au tamis de 63

P est la masse du tamisât restant dans le fond, en kilogrammes.

Il faut répéter l'essai lorsque la somme des masses R_i et P diffère de plus de 1 % de la masse M_2 .

Module de finesse

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF).

- **Pour $1,8 < M_f < 2,2$:** le sable est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.
- **Pour $2,2 < M_f < 2,8$:** le sable à utiliser si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.
- **Pour $2,8 < M_f < 3,2$:** le sable est à utiliser si l'on cherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité et avec des risques de ségrégation.
- **Pour $M_f > 3,2$:** le sable est à rejeter.

Le module de finesse est déterminé selon la méthode suivante :

$$M_f = \frac{\sum R_c\%(0,125;0,250;0,500;1;2;4)}{100} \dots \dots \dots \text{(II.7)}$$

On a le moyen de module de finesse : $2,8 \leq M_{f_m} \leq 3,2$

Mf_m : le module de finesse moyenne.

(S_1, Mf_1) pour le sable (0/3) et (S_2, Mf_2) pour le sable (0/1) .

$$S_1 = \frac{Mf_m - Mf_2}{Mf_1 - Mf_2} \times 100$$

$$S_2 = \frac{Mf_1 - Mf_m}{Mf_1 - Mf_2} \times 100.$$

..... (II.8)

▪ **Présentation résultat et interprétation**

a. Analyse granulométrique du sable

Tamis (mm)	Sable de Taghit		Sable de sidi bel abbes		Sable d'Adrar	
	La masse de l'échantillon (g)	187,60	La masse de l'échantillon (g)	192,20	La masse de l'échantillon (g)	183,60
	Retenu (g)	Passant cum (%)	Retenu (g)	Passant cum (%)	Retenu (g)	Passant cum (%)
63	0,00	100	0,00	100	0,00	100
45	0,00	100	0,00	100	0,00	100
40	0,00	100	0,00	100	0,00	100
31,5	0,00	100	0,00	100	0,00	100
22,4	0,00	100	0,00	100	0,00	100
20	0,00	100	0,00	100	0,00	100
16	0,00	100	0,00	100	0,00	100
14	0,00	100	0,00	100	0,00	100
12,5	0,00	100	0,00	100	0,00	100
11,2	0,00	100	0,00	100	0,00	100
10	0,00	100	0,00	100	0,00	100
8	0,00	100	0,00	100	0,00	100
6,3	0,00	100	0,00	100	0,00	100
5,6	0,00	100	0,00	100	0,00	100
4	0,00	100	0,00	100	3,40	98,1

2	0,09	100	1,19	99	46,50	74,7
1	5,10	97	2,67	99	106,80	41,8
0,5	25,82	86	9,34	95	146,90	20,0
0,250	112,72	40	121,44	37	170,00	7,4
0,125	178,20	5	184,86	4	179,60	2,2
0,063	185,78	0,97	190,65	0,8	183,10	0,3
Fond	185,78	0,97	190,98	0,63	183,2	0,21

Tableau II.3 : Tamisage des différents sables du béton léger.

Diamètre en mm	Gravier1	Gravier2
31.5		
25		
20		
16		
12.5	100	
10	97.5	
8	80	100
6.3	44.5	99.8
5	14.2	97
5	3.6	40.8
3.15	2	19.5
2.5	1.1	10
1.25	0.9	0
0.63	0	0
0.315	0	0
0.16	0	0
0.063	0	0

Tableau II.4 : Tamisage des différents graviers.

Sables utilisés

Les sables utilisés dans les mélanges dans le béton léger ont été pris de trois sites majeurs. Les sables de dunes proviennent de deux régions différentes de la région sud, la première zone (1A), de la deuxième zone (2A) et celui de la carrière au Nord (3A).

L'analyse granulométrique du gravier et du sable a été faite selon la norme NF 18-560 avec une tamiseuse à fréquence réglable, la fréquence utilisée est de 50HZ les résultats obtenus sont résumés dans les graphes des figures II.3 et II.4.

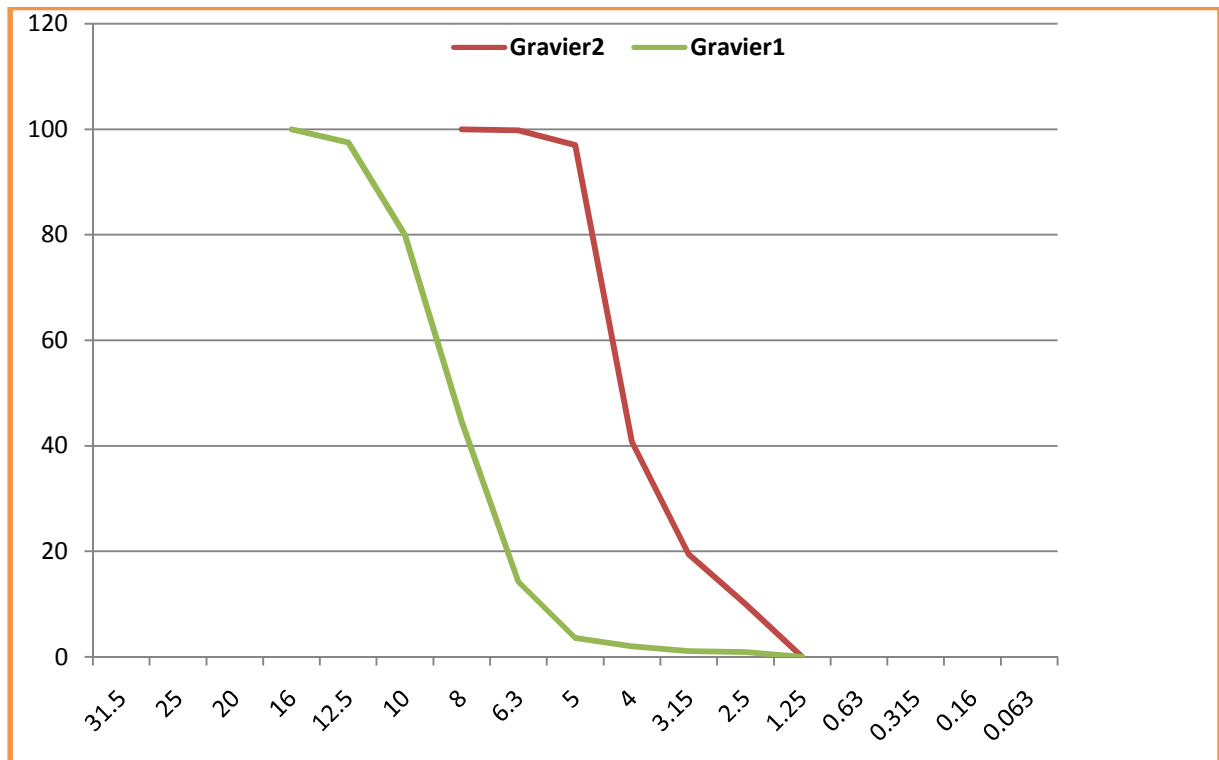
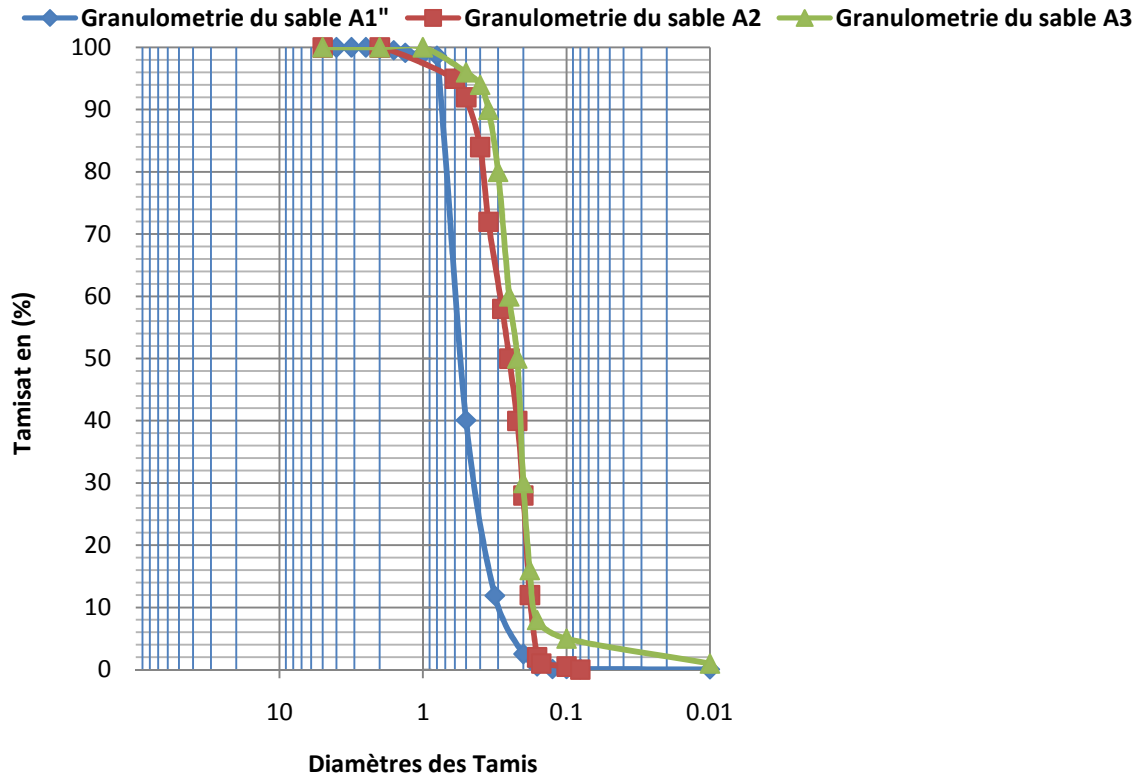


Figure II.2 : Analyse granulométrique des différents graviers utilisés dans la première partie.



Les sables prélevés dans la zone sud ont un module de finesse inférieur à 2.1 donc très fins, quant aux prélèvements effectués dans la zone Nord A3 , montrent un sable dont le coefficient d'uniformité $C_u = 2.4$ et un module de finesse correspondant à 2.70, ce qui nous permet de conclure que le sable A est conforme à la norme NF P 18-598. Les sables de dunes vont être utilisés pour la correction de la structure granulaire du sable, on distingue que les analyses granulométriques des sables de dunes A1 et A2 montrent que la granulométrie est très serrée .Ces derniers riches en fines naturelles nécessitent généralement plus d'eau, ce qui entraîne une chute de résistance sur ce il est préférable d'avoir une granulométrie idéale du mélange du sable (50% sable alluvionnaire et 50% sable de dunes) montrera une granulométrie bien étalée et continue qui s'inscrira dans le fuseau granulométrique.

Caractéristiques physiques des différents sables :

La densité spécifique, la masse apparente et l'essai d'absorption ont été effectués conformément à la norme NF P 18-554 ainsi que l'essai de l'équivalent de sable (ES) a été réalisé selon la NF P 18-598

Echantillons	Masse Apparente	Densité spécifique	Absorption %	ES %	MF %
A1	1502	2590	0.052	90.3	0.92
A2	1527	2600	1.02	86.72	1.231
A3	1367.5	2500	1.88	86.63	2.70

^aES équivalent de sable.

^bMF module de finesse.

Tableau II.5 : Propriétés physiques des sables de dunes.

Analyses chimiques des sables

Les tests chimiques ont été effectués (Laboratoire d'analyse chimique LTPO à Oran, Algérie).

Les Composants	1-A	2-A	3-A
Silice	93.95%	97.16%	72.48%
Cao	6.56%	3.02%	16.7%
Fe ₂ O ₃	0%	0 %	2.5 %
Al ₂ O ₃	0.68%	0.76%	0.5%
SO ₃	0 %	0 %	0 %
CaO ₃	0 %	1.87%	22.74 %
CO ₂	0 %	0.82%	10.0 %

Tableau II.6: Analyses chimiques du sable de carrière et les sables de dunes

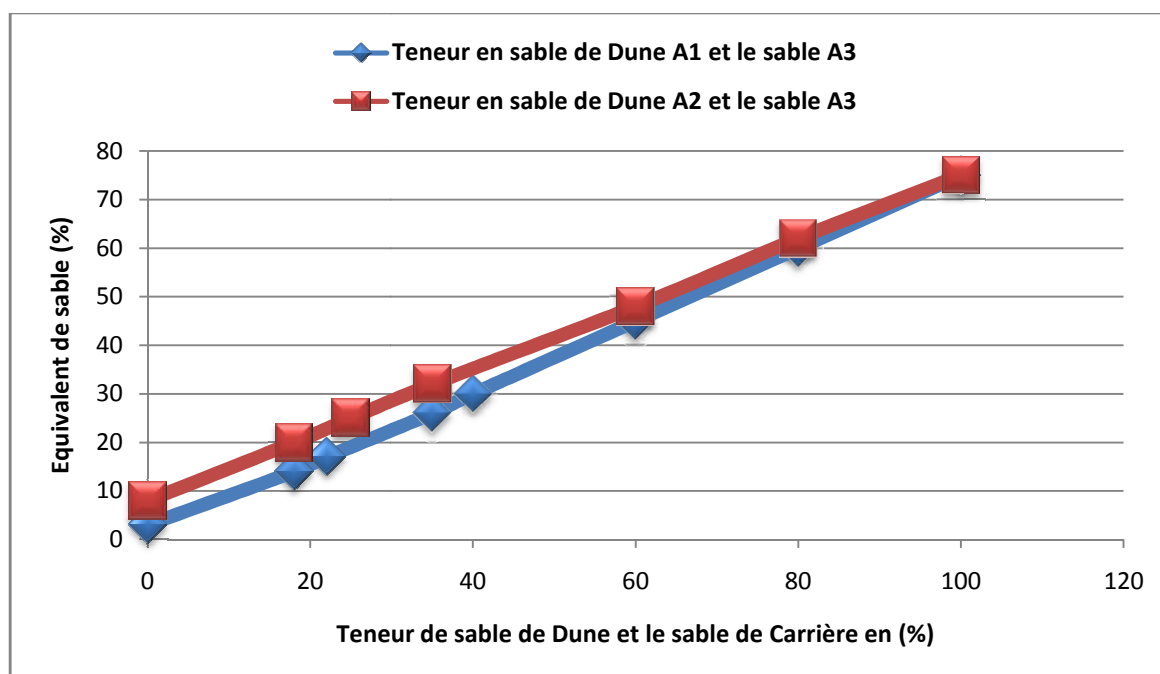


Figure II.4 : Évolution de la valeur de l'équivalent de sable selon l'augmentation de la proportion de dunes de sable.

L'analyse chimique révèle que les sables sont d'origine calcaire de particules fines sont inertes c'est-à-dire ils sont un simple filler et ne comportent pas de particules « actives » c'est-à-dire des particules argileuses qui vont se gonfler en présence d'eau faisant chuter les frottements internes .

Selon la figure II.4, ce sont des sables dont les compositions chimiques sont 95 % de silice, de 1 à 2 % de calcaire et des traces de différents oxydes. Par conséquent, la constitution du sable est blanche légèrement ocre [BENDH98].

La valeur de l'équivalent de sables des dunes est supérieure à 60%, le poids volumique s'améliore aussi ou reste quasi constant, lorsque la teneur en sable du mélange augmente jusqu'à 50% .Il décroît légèrement ensuite pour aboutir à la valeur relative au sable seul , comme le montre la figureII.4, [BENDH98].

II.4 La pierre ponce

Les compositions chimiques de la pierre ponce et des granulats de cendres volantes, reportées ici dans le tableau -3 [VAQ76]. La ponce est riche en silice, en alcalins et possède une teneur non négligeable en sulfonium. Parmi ces agrégats notre choix a porté sur les agrégats minéraux poreux parmi cette variété la pierre ponce utilisée directement dans le béton, la valeur de la densité de la pierre ponce est de 900Kg/ m³.

	SiO₂	Al₂O₃	MgO	Fe₂O₃	CaO	K₂O+ Na₂O	SO₃
Pierre ponce	69 %	18 %	1,0 %	2,0 %	3,0 %	5,0 %	1,8 %

Tableau II.7 : Composition chimique de pierre ponce [VAQ76]

II.5 Le Ciment

Pour bénéficier pleinement de l'activité hydraulique nous constatons que le diamètre des agrégats du sable de dune est petit, souvent on favorisera l'utilisation du ciment CPA. Dans le cas des ciments composés, il n'est pas toujours facile de calculer le E / C exacte de façon précise puisque la quantité de ciment n'est pas connue d'une manière précise [ZRI10].

Le ciment adopté pour la confection du béton est conforme à la norme NF P15-301 [24]. Pour bénéficier pleinement de l'activité hydraulique des fines d'addition, on privilégiera souvent le CPA par rapport aux CPJ car , dans le cas des ciments composés , il n'est pas toujours facile de calculer le rapport E/C exact puisque la quantité de ciment n'est pas connue de façon précise [ZRI10].

Nous avons utilisé le ciment CPA Portland (CEM I / A 42,5) dont les caractéristiques physiques : la densité spécifique de la valeur 3.2 et la surface spécifique de Blaine est de $3585 \text{ cm}^2 / \text{g}$.La composition chimique de ce ciment est donnée dans le tableau II.8 et le tableau II.9.

II.5.1 Composition chimique du ciment :

La composition chimique et celle minéralogique selon les formules de Bogue sont données par les tableaux suivants :

SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	SO₃	Insolubles (CaO libre)	LOI	Insolubles (SiO₂ non combinés)
22,07	6,43	4,16	63,83	0,21	1,49	0,16	1,73	92,29

Tableau II.8 : Les Oxydes (%)

Phase	Clinker			
Minéraux	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Content(%)	51.20	21.16	3.10	12,42

Tableau II.9: Composition minéralogique de Bogue

II.6 Superplastifiant :

Super-Plastifiant a été utilisé au cours de tous les essais, il a été intégré dans le mélange selon la norme NFP18-335, le Super-Plastifiant est PLASTACRYL85 (Granitex).Il sert à améliorer la maniabilité, en gardant le rapport E / C constant .Ses caractéristiques sont données dans le tableau II.10 :

Superplastifiant	Les caractéristiques
La forme	liquide
Couleur	Transparent
pH	6-6.5
Densité	1.05± 0.01
Taux de chlorure	<1 g/l

Tableau II.10 : Les caractéristiques du Super plastifiant

II.7 Protocole expérimentale

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des granulats, où l'on dispose le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités sont recherchées pour un ouvrage désiré.

Généralement les qualités recherchées avec une telle composition sont :

- ❖ Une consistance adaptée à sa destination.
- ❖ Des qualités de résistance à différentes échéances, le plus souvent à 28 jours.

❖ Des qualités de durabilité qui conduisent à imposer un dosage minimum en ciment et un rapport E/C maximum.

Cette partie a, dans un premier temps, pour but de développer les étapes de formulation et de confection des bétons. Ensuite, de s'intéresser aux essais sur béton, permettant ainsi de caractériser leurs performances physiques et mécaniques et d'évaluer le comportement des bétons destinés aux ouvrages hydrauliques par rapport aux bétons ordinaires.

Pour cela on a choisi de faire varier quelques paramètres tels que le type de sable pour avoir une idée sur l'effet de changement de sable sur la résistance et la maniabilité.

En conclusion, notre objectif est d'obtenir un béton résistant, étanche, durable et par conséquent capable à résister à n'importe quelle agression. Plusieurs méthode de formulation ont été élaborées par **Abrams, Dreux-Gorisse, Caquot, Faury...etc.**

II.7.1 Présentation de la méthode

On se réfère dans le premier cas aux courbes granulométriques des constituants secs afin d'utiliser la méthode de Bolomey en amont. Un mélange quelconque de ces constituants à des proportions définies à lui aussi une courbe granulométrique. En fonction des quantités des constituants secs à mettre en œuvre on a une infinité de mélanges donc une infinité de courbes granulométriques.

Le principe de la méthode

- Déterminer la courbe optimale du mélange des éléments secs,
- Calculer les pourcentages de ces constituants qui permettent de donner un mélange sec dont la courbe soit aussi voisine que possible de la courbe optimale,
- Dédire la composition d'un mètre cube de béton.

L'équation qui régie cette courbe est exprimé par la formule suivante :

$$P=A+ (100-A) \sqrt{d /D}.....(II.9)$$

P : est le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d

D : est le diamètre du plus gros granulat

A : coefficient varie entre 8 et 16 en fonction du dosage en ciment, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort .

II.7.2 Etude de la composition de béton

Les premières formulations sont :

- ✓ la première formulation avec sable 0/3 de la région de sidi bel abbes, on note (BLGS).
- ✓ la deuxième formulation avec sable de Taghit , on note (BLGST).
- ✓ la troisième formulation du sable d'Adrar , on note (BLGSA).

■ Béton avec adjuvant

Dosage en ciment et en eau

Le rapport C/E est évalué par la formule :

$$f'_{C28} = G \sigma_c \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)..... (II.10)$$

f'_{C28} : Résistances moyennes en compression désirée (Mpa).

G : Coefficient granulaire donné en fonction du serrage du béton et du diamètre de gros granulats.

Pour les bétons légers confectionnés, on prend $G=0.45$ qui correspond aux granulats courants de $D \leq 16$ mm.

C : Dosage en ciment (Kg/m^3).

E : Dosage en eau (en litre).

σ_c : Classe vraie de résistance de ciment(Mpa).

D'après les calculs en a trouvé :

Le dosage en eau correspondant 187,16 litre.

Le dosage en ciment considéré dans notre étude est de $350 Kg/m^3$.

Le rapport E/C égale 0,53

II.7.3 Récapitulative des Bétons

Un récapitulatif sur différents formulations du béton de la première partie

Composition du béton : BLG ST			
DESIGNATION	Quantité sans adjuvant (kg/m³)	Quantité avec adjuvant (kg/m³)	Pourcentage %
Sable 0/1	0,00	0,00	0,0%
Sable 0/3	721	721	39,0%
Gravier 3/8	390	390	21,0%
Gravier 8/15	339	339	18,0%
Ciment (C1) 42,5	350	350	-
Dosage adjuvant	-	-	3%
Rapport E/C	0,53	0,43	-

Tableau II.11 : compositions du béton BLGST

Composition du béton :BLG SA			
Désignation	Quantité sans adjuvant (kg/m³)	Quantité avec adjuvant (kg/m³)	Pourcentage %
Sable 0/1	177	177	10,06%
Sable 0/3	474,6	474,6	26,94%
Gravier 3/8	394	394	22,0%
Gravier 8/15	491	491	27,0%
Ciment (C1) 42,5	350	350	-
Dosage adjuvant	-	-	3%
Rapport E/C	0,53	0,43	-

Tableau II.12 : Compositions du béton BLGSA

II.7.4 Trace de la courbe granulaire de référence

Après la représentation des courbes granulométriques des différents granulats, et sur le même graphique, en traces la courbe de référence, et les courbes de fuseau supérieur et inférieur.

La courbe référence est calculé selon la formule suivante :

$$\text{Courbe référence} = \Sigma (\%g * \%C)/100.....(\text{II.11})$$

%g : Pourcentage de granulat.

% C : Pourcentage de ciment

II.7.5 Essai d'affaissement au cône d'Abrams (EN 12350-2)

Cet essai consiste à remplir un moule tronconique (D=20cm,d=10cm,h=30cm) en trois couches tassées par une tige d'acier de 16 mm de diamètre et d'extrémité arrondie. Le piquage est exécuté de l'ordre de 25 coups par couches. On soulève, ensuite, le moule avec précaution, puis, on mesure l'affaissement.

La consistance d'une composition de béton change avec le temps en raison de l'hydratation du ciment et éventuellement d'une perte d'humidité. Il convient que les essais sur différents échantillons soient donc réalisés à intervalle constant après le gâchage, si des résultats réellement comparables doivent être obtenus.

Les observations expérimentales obtenues permettent de définir les performances mécaniques et thermiques .Or, l'expérience menée au laboratoire a dû être finalisée par le processus d'endommagement du matériau afin d'atteindre les performances recherchées à des températures extrêmes.

II.7.6 Evolution de l'absorption d'eau de la pierre ponce :

L'absorption de la pierre ponce, est importante car elle entraine d'importantes variations de plasticité et d'ouvrabilité, sur la courbe de la figure 3, on constate que les granulats légers ont une forte absorption d'eau dans les premières minutes, ce qui permet d'envisager en amont le rapport E/C et le pré

mouillage des granulats avant la confection du béton, le pré- mouillage des granulats est nécessaire afin de réduire le ratio E/C à l'interface granulat/pâte cimentaire. Il en résulte une hydratation locale du ciment améliorant la résistance locale et retarde les microfissures.



Figure II.5 : Pré-mouillage des agrégats légers (la pierre ponce)

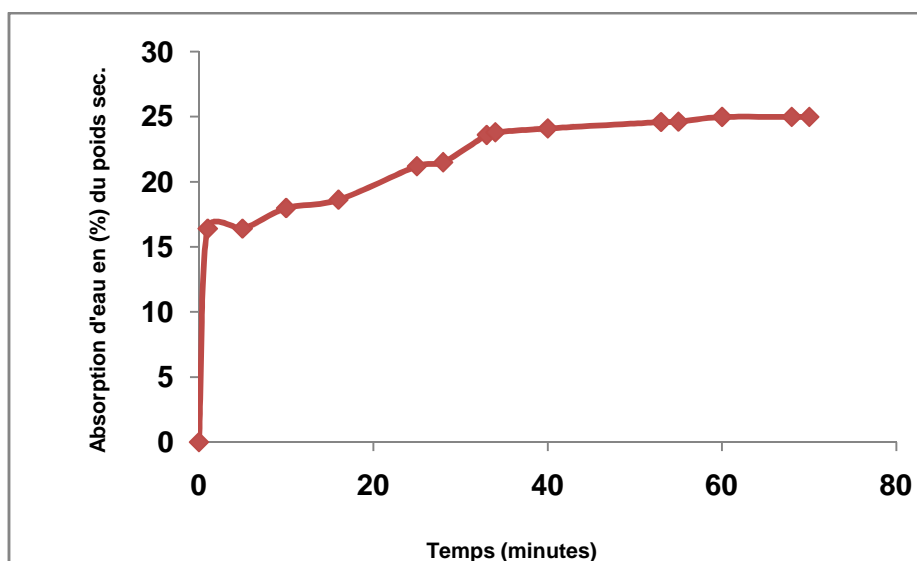


Figure II.6a: Evolution de l'absorption(%) durant la 1ère heure

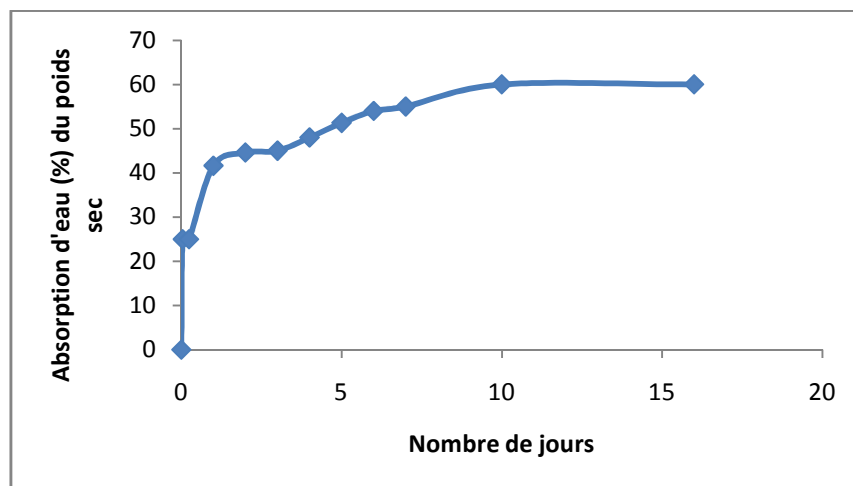


Figure II.6b: Evolution de l'absorption(%) à long terme

Figure II.6 : Evolution de l'absorption d'eau en (%) du poids sec

L'absorption d'eau de granulats légers est généralement décrite comme une succession de deux phases constatés sur les figures II.6 a et II.6b.

Une phase d'absorption rapide (de quelques secondes jusqu'à quelques heures) qui intervient dès que les granulats secs sont immergés.

Une période d'absorption plus lente jusqu'à l'atteinte d'une valeur stable, confirmé par [CAL13] .Cette phase d'absorption a tendance à durer jusqu'à 2ans cité par le même chercheur.

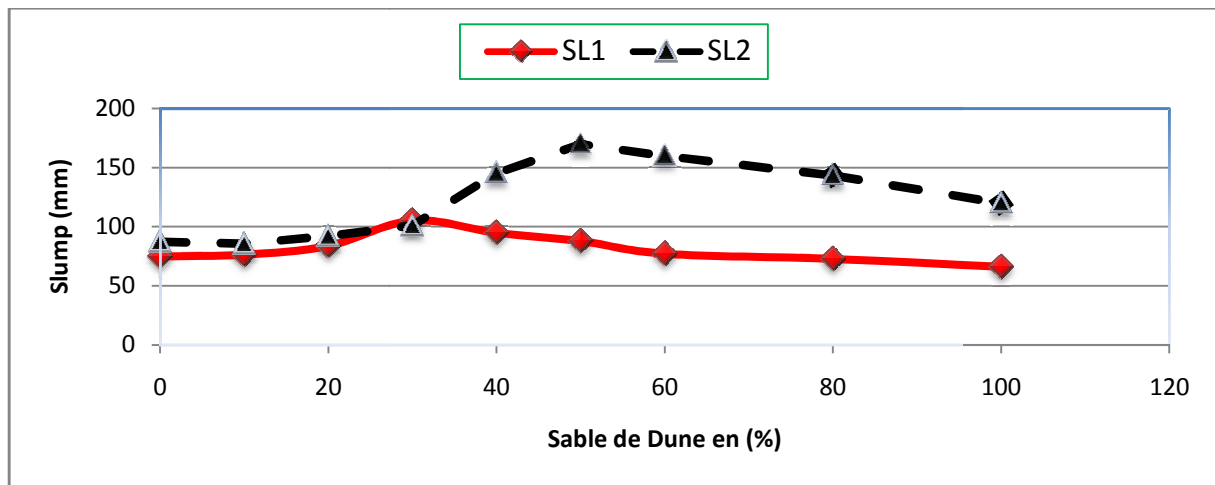
Le pré mouillage des granulats légers est primordial avant l'introduction des autres constituants, cette étape est nécessaire afin d'estimer la valeur de W / C. Nous notons que l'absorption de la pierre ponce en cours le nombre de jours commence à se stabiliser partir du quatrième jour figure 1,dont le coefficient d'absorption de l'eau est entre 18 et 20 % à 48 h [NGU13].

Des granulats ordinaires, de calcaire par exemple, absorbent généralement moins de 2 % d'eau par masse de granulats secs (essais d'absorption à 24 heures selon les normes ASTM C127 [et ASTM C 128.Dans le cas des granulats légers, l'eau est absorbée au cœur des particules, alors que pour des granulats

ordinaires, l'eau se situe essentiellement en surface cette différence joue un rôle primordial dans la formulation des mélanges [CAL13].

II.7.7 La variation de l'affaissement en fonction de la teneur en sable

La première partie a fait l'objet d'essais effectués à différents pourcentages de sables de carrière et de dunes dans la confection du béton léger utilisé dans la deuxième partie.



La Figure II.7 : La variation de l'affaissement en fonction de la teneur de sable pour le béton léger des compositions SL1 et SL2.

La figure II.7 . Montre la variation de l'affaissement en fonction de la teneur de sable pour les mélanges SL1 (A1 et A3), SL2 (A2et A3) .Les données indiquent que le contenu de dunes de sable augmente, le slump augmente initialement . Cependant, le slump test diminue vu que la quantité de sable de dunes est de plus de 50 % [AL-H07]. Tous les résultats montrent qu'il est possible de maintenir l'ouvrabilité du béton (SL2) malgré les hausses teneur en sable de dune.

Quand tous les agrégats fins sont remplacés par le sable de dune (100 % de remplacement) une forte diminution ont été observée dans tous les mélanges résultant de l'affaissement du béton [AL-H07].

II.3 Choix des paramètres et confection du béton léger

Dans cette seconde partie de travail ,elle a été subdivisée en deux étapes succinctes , la première a eu pour objet la confection du béton léger en substituant à différents pourcentages de sable de Dune des deux zones A1 et A2 afin de nous permettre dans la seconde étape de mieux cerner le comportement mécanique du béton léger visé par cette recherche.

Des éprouvettes cylindriques (16 x 32) cm² sont utilisées en cours de tous les essais au laboratoire. Le pourcentage de forme irrégulière de la pierre ponce est de 50 % du volume, G/S=2/7 et C/S=2.16.

La composition des mélanges des bétons légers dans la seconde partie est comme suit :

- type de béton léger (BLG1) :100% du sable alluvionnaire
- type de béton léger (BLG2) : 50% du sable alluvionnaire A3 et 50 % du sable de Dune A1dont le module de finesse $M_f= 2.10$
- type de béton léger (BLG3) :50% du sable alluvionnaire A3 et 50 % du sable de Dune A2dont le module de finesse $M_f= 2.30$

	A1	A2	A3
BLG1	100%	X	X
BLG2	50%	X	50%
BLG3	50%	50%	X

Tableau II .13 : La nomenclature des mélanges au cours des phases expérimentales réalisées au laboratoire.

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1 Résultats Expérimentaux :

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux ,partant d'un choix d'une teneur en ciment ,d'un dosage en sable déterminé et d'un rapport E/C constant.

III.1.1 Effet de dunes de sable et de pierre ponce sur la résistance du béton

Cette diminution de la résistance est attribuée à l'augmentation de la surface spécifique des granulats fins nécessitant plus de coulis pour revêtir la surface des granulats.

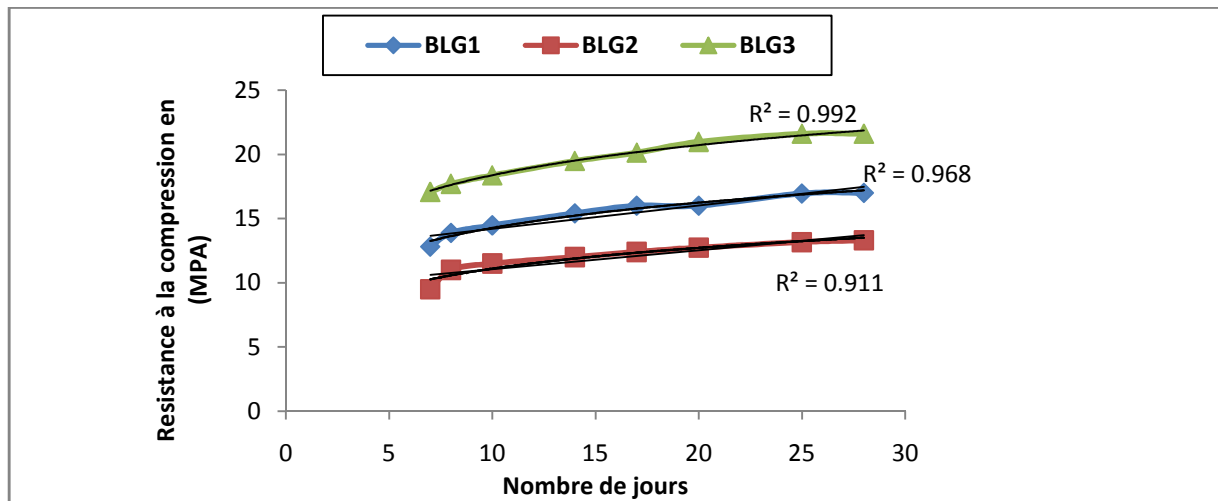


Figure III.1 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps

La figure III.1 Montre une augmentation de la résistance à la compression au cours du temps en particulier pour BLG3 béton dont la résistance est sensiblement supérieure à celle qui peut BLG1 et BLG 2. Cela confirme les résultats de l'analyse de taille des particules. Le développement de la résistance du béton léger est plus rapide et atteint 90% de la performance déclarée à 7 jours [ARN86].

Selon [ARN86] une réduction de 15 litres d'eau de gâchage entraîne une augmentation de 5 à 10% de la résistance à la compression à 28 jours, l'eau absorbée dans les agrégats au cours de la pré- saturation conduit probablement à

une amélioration de l'hydratation et donc la résistance [LOT04]. La résistance du béton de granulats légers a été influencée par la résistance des grains.

Dans le cas des bétons légers, les granulats vont absorber une partie de l'eau du mélange et réduire localement le ratio E/C à l'interface granulat /pâte cimentaire .Il en résulte une excellente hydratation locale du ciment, améliorant la résistance locale et prévenant la microfissuration initiale .Ces microfissures apparaîtront à un niveau de contrainte de cisaillement supérieure, l'utilisation de 50% d'agrégats de la pierre ponce donne des résultats encourageants sur les propriétés mécaniques et un gain de poids du béton léger .La capacité des granulats « de la pierre ponce» permet de retarder les microfissures, est cependant limitée et aboutir à un modèle de rupture plus rapide [LECA].

III.1.2 Module d'élasticité

Le module d'élasticité d'un béton dépend de la proportion de granulat et de la matrice cimentaire ainsi que du module d'élasticité de chaque constituant. Le béton de granulats légers a un module d'élasticité inférieur à celui du béton traditionnel car le module d'élasticité léger est plus faible en raison de leur porosité élevée.

Généralement, le module d'élasticité d'un béton léger atteint la proportion de 1/2 à 3/4 de celui d'un béton traditionnel de même résistance [ACI03],comme pour les bétons de granulats de masse volumique ordinaire , plus le rapport E/C diminue , plus la résistance du béton de granulat léger augmente, ce phénomène est observé par plusieurs auteurs[YAS04,BHAN03,CHI03].

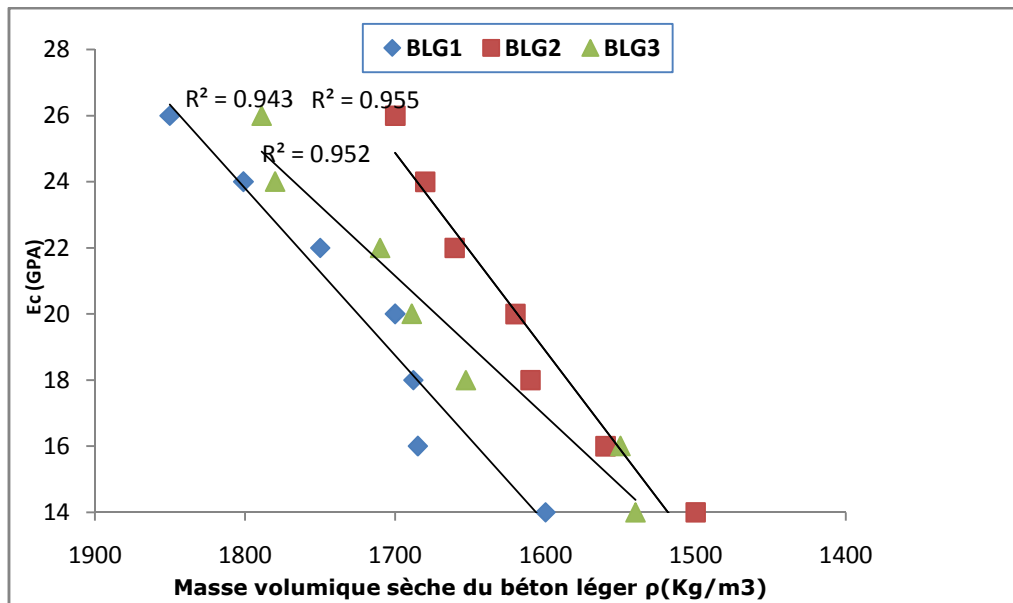


Figure III.2 : Relation entre le module d'Young du béton léger et la masse volumique sèche des bétons légers.

La figure III.2 montre la relation linéaire entre le module d'élasticité du béton léger et la masse volumique à 28 jours. Quand la résistance augmente, le module d'élasticité diminue avec une augmentation de la teneur en sable de dunes ce qui confirme qu'il ya une corrélation entre le module d'Young et la densité [KE08], cependant une telle diminution du module d'élasticité n'est pas appréciable .

L'action combinée du sable A1 et le sable de dune A2 réalise de meilleures caractéristiques mécaniques à celui de la troisième composition composée du sable A1 et le sable de dune A3. Plusieurs auteurs ont constaté que plusieurs échantillons de même densité conduisent à des meilleures performances [KE09].

Le béton de granulats légers a un module d'élasticité inférieur à celui du béton traditionnel car le module d'élasticité de granulats légers est plus faible en raison de leur porosité élevée. Généralement, le module d'élasticité d'un béton léger atteint la proportion de (1/2) à (3/4) de celui d'un béton traditionnel de même résistance [ACI03].

III.1.3 Les effets du séchage sur le béton léger

Le phénomène du séchage permet de cerner le problème des bétons lors de leurs expositions au phénomène de température et de prévoir leurs comportements à ce type de sollicitations.



Figure III.3 : Séchage des éprouvettes en béton léger

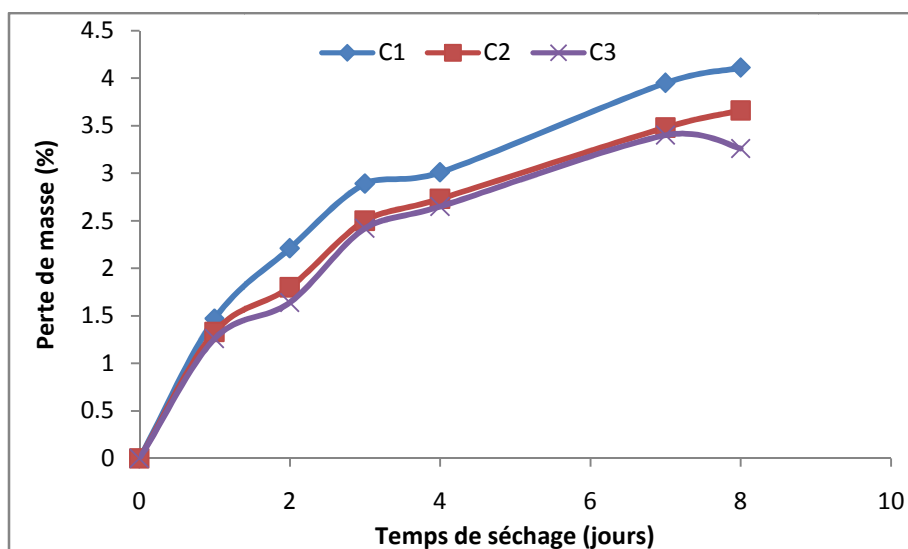


Figure III.4 : Les effets de séchage sur le béton léger

La figure III.4 Affiche le temps de séchage du béton léger. Nous constatons que le phénomène de séchage des différents mélanges C1 :BLG1, C2 :BLG2 et C : BLG3 suit une progression linéaire où la perte de masse est en fonction du nombre de jours puis ils tendent vers une progression asymptotique, ces différents temps séchage mettent en évidence la perte de masse qui a probablement une relation avec la qualité du sable de dune et les agrégats légers ce qui visible sur les graphes ou le graphe C1 présente la plus grande perte. A la lecture des résultats le séchage des mélanges ne présentent pas des écarts considérables. Ainsi la quantité d'eau présente dans la pâte diminue plus lentement que dans le cas d'un béton usuel, ce qui explique la cinétique plus lente du retrait [ARN86]. Dans le cas des bétons légers, une partie de l'eau absorbée dans les granulats peut migrer vers la porosité de la pâte. [CAL13].

Ce processus de séchage induit, de façon pratiquement inévitable, une fissuration de peau [ACK83], néanmoins, les résultats expérimentaux mettent en évidence que l'application d'un changement de l'effort de compression ne modifie pas significativement l'évolution de la perte en masse des éprouvettes (Maney 1941 cité par [LAS97], [HAN86] cité par Bazant et al . 1997 [BAZ97],[NEV00] cité par [LAS97]) , bien que le changement de la compression réduise significativement la micro-fissuration citée par[BEN05] . Cela est montré à travers les essais de [LAS97] sur le mortier de rapport E/C = 0,5 et séché à un âge de 28 jours.

III.1.4 Effets de la température sur le béton léger

Etant donné que le béton résiste à des températures très élevées, en particulier le béton léger qui est connu pour sa faible conductivité thermique lui attribuant une meilleure résistance à la propagation de la chaleur dans le matériau, nous avons essayé à travers des tests à connaître la durabilité du matériau.

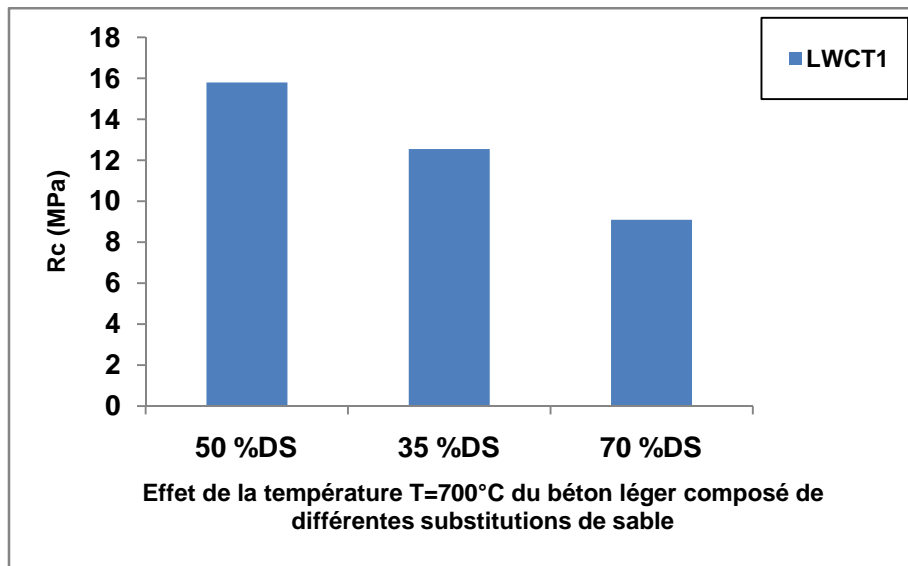


Figure III.5a : Résistance du béton léger composé d'une substitution de différents dosages de sable à 700°C

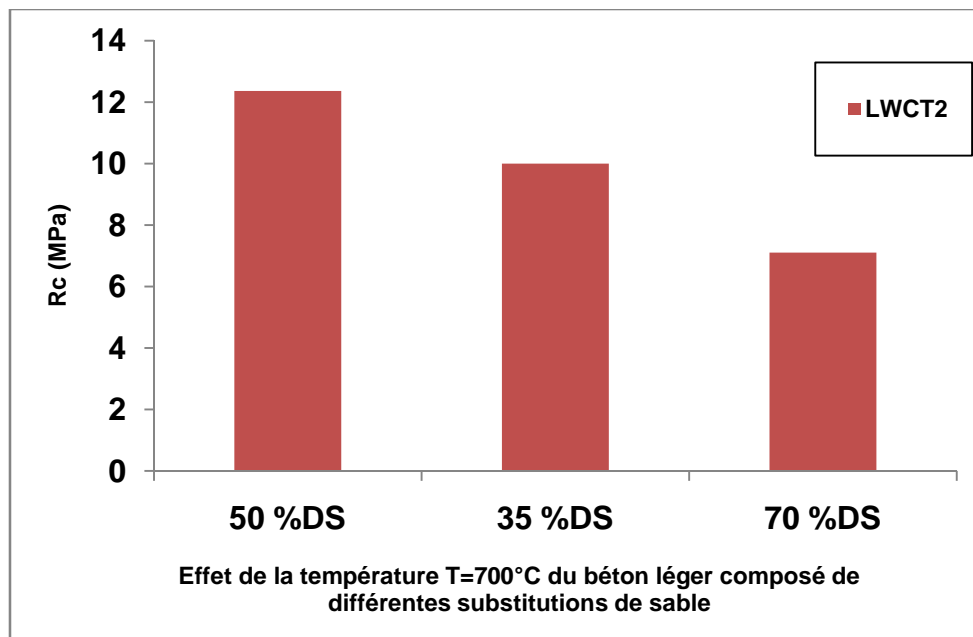


Figure III.5b : Résistance du béton léger composé d'une substitution de différents dosages de sable à 700°C

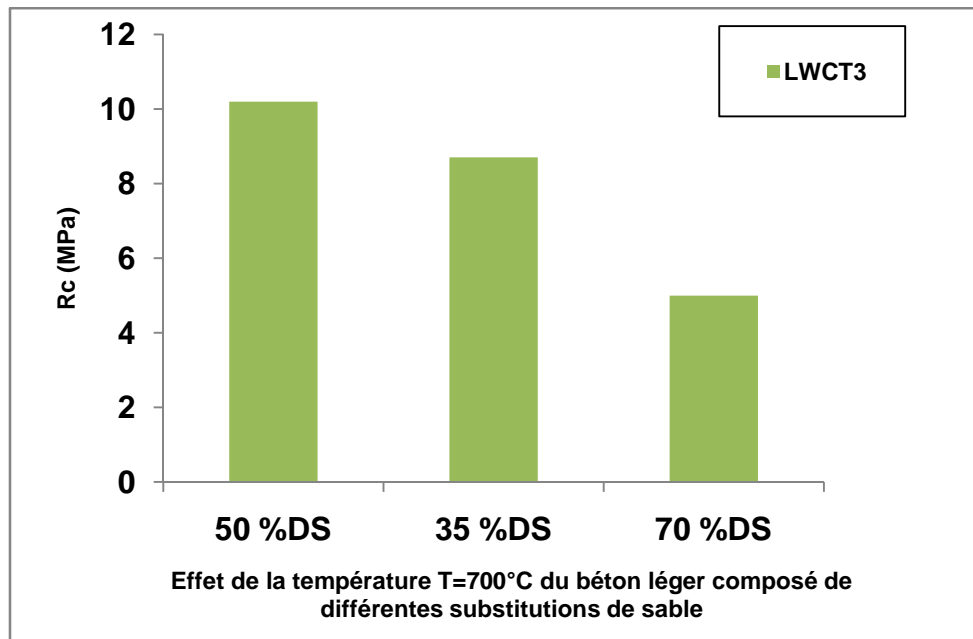


Figure III.5c : Résistance du béton léger composé d'une substitution de différents dosages de sable à 700°C

Figure III.5: Effet de la température sur la résistance à la compression du béton léger à différentes substitutions de sable .

La figure III.5 illustre la résistance à la compression des différents mélanges soumis à une température de 700°C, nous pouvons remarquer que la contrainte de compression a diminué, la cause principale est le module élastique plus faible des granulats légers [CAL13]. Ces résultats sont en accord avec les recherches menées, les chercheurs s'accordent à dire que la déshydratation du béton lors de l'échauffement [ARIO07, HAN02, LI04].

Pour le béton durci, l'augmentation de la température d'exposition entraîne deux phénomènes qui influent directement sur la résistance mécanique. La déshydratation provoque des modifications physico-chimiques sur la matrice cimentaire. Selon [NECH02], du fait de la haute température, les granulats qui se mettent en expansion s'opposent au retrait de la matrice cimentaire. Ces deux actions contradictoires (retrait de la matrice cimentaire et expansion des granulats) génèrent des efforts de compressions. Ce qui engendre la dégradation

de l'interface pâte granulats, et peut provoquer des microfissurations dans la matrice cimentaire.

Afin d'améliorer les performances mécaniques et la durabilité du béton, la tendance est de diminuer sa porosité et sa perméabilité. Dans certaines conditions, on constate un écaillage ou éclatement du béton porté à une température élevée [Noumowé (1995), Anderberg (1997), Bazant (1997)]. À la suite d'autres recherches [Ulm *et al.* (1999), Pesavento (2000), Dal Pont (2003)], cette partie de travail vise à simuler ce comportement à haute température afin de tenter d'en expliquer les mécanismes. Afin d'expliquer l'origine de l'écaillage et de l'éclatement observés sur certaines éprouvettes de béton, nous déterminons les différentes contraintes thermiques susceptibles de se développer au sein d'une éprouvette. Les éprouvettes utilisées, de 16x32 cm, sont soumises à un cycle de chauffage de 1°C/mn de la température ambiante (20°C) jusqu'à 600°C. L'approche consiste à faire un calcul thermo-hydrique puis, à partir des résultats obtenus, de déterminer les contraintes mécaniques. Deux modèles de calculs sont utilisés : l'élasticité linéaire et la plasticité en utilisant le modèle de Drucker-Prager.

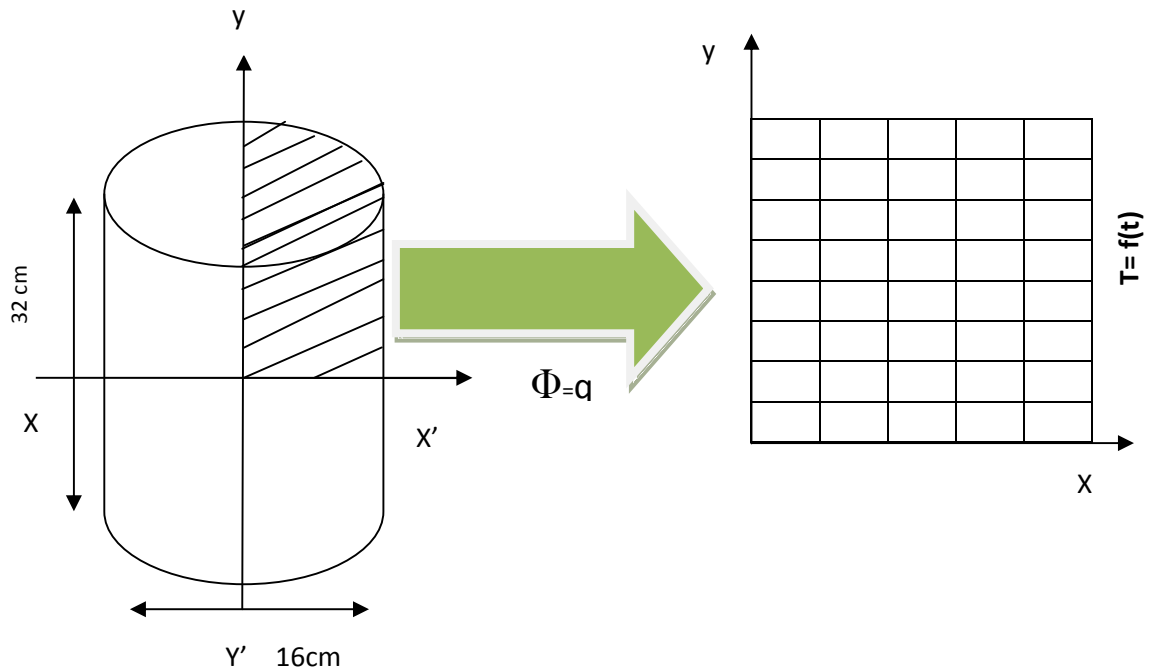


Figure III.6 : Modélisation du transfert thermique sur une éprouvette du béton léger

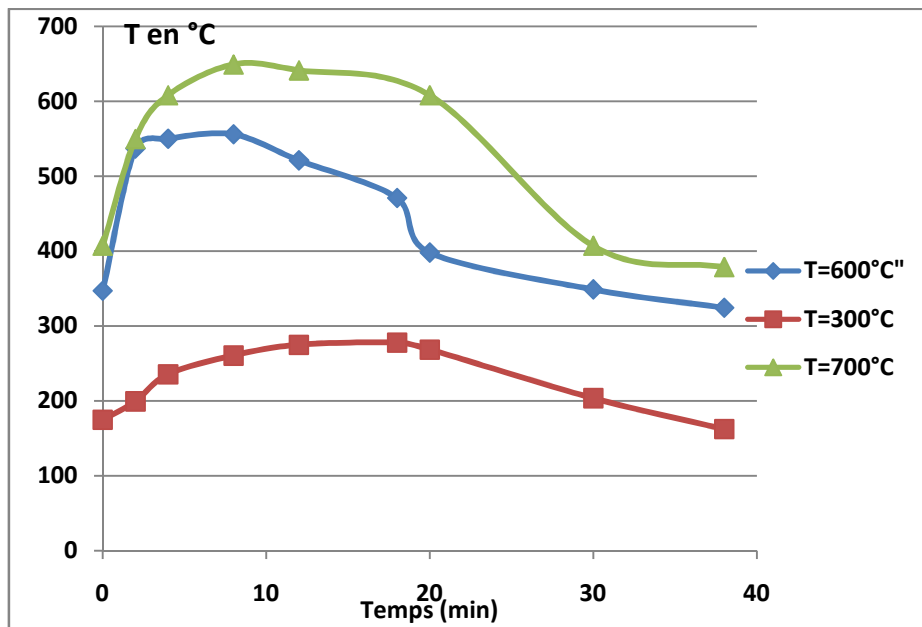


Figure III.7 : Propagation de la température dans le temps à travers l'éprouvette en béton léger

Les résultats expérimentaux et numériques de la figure III.7 montrent qu'aux alentours de 700 °C, la perte de masse et le gradient thermique de l'éprouvette sont au maximum.

La déshydratation provoque des modifications physico-chimiques sur la matrice cimentaire et du fait de la haute température, les granulats se mettent en expansion s'opposent au retrait de la matrice cimentaire. Ces deux actions contradictoires (retrait de la matrice cimentaire et expansion des granulats) génèrent des efforts de compressions. Ce qui engendre la dégradation de l'interface pâte granulats, et peut provoquer des microfissurations dans la matrice cimentaire.

III.2 Conclusion

Les granulats légers (GL)

Au niveau des propriétés générales, les bétons de granulats légers (BGL) sont généralement moins rigides s à résistance égale, mais leur durabilité est excellente, grâce à l'adhérence exceptionnelle développée entre les GL poreux et la pâte de ciment.

Absorption d'eau

Les GL ont des porosités totales très élevées (jusqu'à 50%, voire plus) ; heureusement, tous les vides ne sont pas accessibles à l'eau dans les conditions normales, mais l'absorption est plus élevée qu'avec les granulats de densité courante. La cinétique d'absorption est relativement rapide dans les premières heures ; il est par conséquent essentiel d'humidifier préalablement les GL, si l'on souhaite garder une consistance stable durant la mise en place du béton. Il faut aussi, lors du dosage, tenir compte de la quantité d'eau présente dans les granulats.

Influence des GL sur l'état frais du béton sont les suivantes :

- en raison de leur forte absorption d'eau, les GL sont généralement humidifiés avant emploi, pour éviter une perte rapide d'affaissement. Toute l'eau absorbée par les GL après mise en place conduit alors à l'abaissement du rapport eau/ ciment et, donc, à une amélioration générale des propriétés du béton, le mortier travaille plus dans un BGL que dans un béton traditionnel.
- pour un seuil de cisaillement donné, les BGL ont un affaissement plus faible à ceux des autres bétons courants de structure ;
- Enfin, le contraste de densité des GL et mortier tend à favoriser la ségrégation.
- les GL développent une adhérence parfaite avec le mortier, grâce à leur porosité et à leur rugosité.
- puisque la rigidité du mortier est généralement supérieure à celle des GL, le transfert des contraintes est assuré entre les deux phases. Alors, pour un chargement externe donné et non des GL, qui contrôlent la rupture du béton, c'est alors la faiblesse du mortier et non celle des propriétés du béton.
- Le transfert des contraintes est donc assuré par le biais des propriétés mécaniques du mortier (résistance à la compression, module d'élastique) et par le module élastique équivalent des GL[DE LAR99] .

Une autre caractéristique est la forte élévation de la température en condition adiabatique, son origine provient de la plus faible capacité thermique du béton :

- l'eau stockée dans les GL peut migrer dans la matrice, peut accroître le niveau d'hydratation du ciment.
- l'isolation thermique apportée par les GL fait que l'élévation réelle de la température s'approche davantage de la température adiabatique, pour une structure géométrique donnée.

- le retrait endogène est à peu près inexistant, à cause du rapport eau /ciment élevé. C'est un autre avantage pour la prévention de la fissuration au jeune âge.
- le retrait total et les déformations de fluage sont plutôt faibles, grâce à la dose optimale de super plastifiant.

Le retrait endogène suit rigoureusement la même tendance que celle de l'élévation de la température en conditions adiabatiques. La principale différence provient du fait que le retrait endogène est très faible ou n'existe pas pour les bétons de faible résistance, alors que chaque béton présente une chaleur d'hydratation, le retrait total (qui apparaît en milieu sec) reste par contre du même ordre de grandeur quelle que soit la page de résistance, si le béton de moindre retrait est choisi. Ce phénomène est à relier à la compensation qui existe entre le retrait endogène et le retrait de dessiccation : le premier augmente avec l'auto-dessiccation, alors que le second diminue, le retrait total n'augmente que si le volume de pâte devient grand.

Les deux analyses sont complémentaires dans le sens où l'analyse thermo élastique traite de la résistance à la fissuration et l'analyse énergétique de la résistance à l'endommagement.

Un matériau idéalement résistant aux chocs thermiques présenterait simultanément une bonne résistance à la fissuration et à l'endommagement, ce qui est impossible compte tenu des exigences contradictoires que cela suppose en matière de module d'élasticité et de résistance à la rupture

Porosité

Une augmentation de la porosité conduit généralement à une diminution de la résistance à la rupture, du module d'élasticité et de la conductivité thermique. La porosité peut apparaître donc comme un facteur néfaste pour la résistance à la fissuration.

Il s'avère délicat de généraliser l'influence que peut avoir la porosité. C'est pourquoi le recours à l'expérimentation reste pratiquement incontournable dans tous les cas.

On :

1. Une haute teneur en sable de dune (plus de 60 %) est déconseillé pour le béton .
2. Afin de compenser la réduction de la résistance due à l'utilisation de sable de dune, un ratio inférieur eau- ciment peut être spécifié.
3. Afin de réduire l'absorption de surface dans les mélanges de béton contenant des substitutions de sable de dunes de l'utilisation de ciment de laitier est recommandé.
4. Les proportions de mélange nécessaires devraient être fondées sur les mélanges d'essais.
5. Le pré- mouillage des agrégats est nécessaire, car il permettra de réduire le ratio W / C . Il en résulte une hydratation du ciment locale amélioration de la résistance locale et retarde les microfissures.
6. Il sera souhaitable d'envisager d'utiliser la méthode des éléments finis pour localiser les contraintes entre les interfaces globale de mortier.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'eau absorbée dans les granulats pendant la pré-saturation conduit probablement à une hydratation supplémentaire et donc amélioration de la résistance.

Le développement récent de bétons allégés capables de jouer un rôle en tant qu'isolant ,tout en conservant des niveaux de performances suffisants .Le problème actuel est de favoriser des produits composites capables de remplir plusieurs usages, nous ne cherchons plus actuellement que la performance mécanique mais nous tentons également d'améliorer les qualités thermiques et économiques.

Comme un béton léger a généralement un dosage en ciment plus important qu'un béton traditionnel, le pourcentage du retrait endogène est lié à la quantité de ciment dans le mélange.

Le remplacement du sable alluvionnaire (le sable alluvionnaire est le plus fin avec presque 90% des grains entre 0 et 2 mm) par du sable léger (le sable léger est le plus fin, car le refus à 50% est à 1 mm environ) diminue la masse volumique du béton .Les performances thermiques ont améliorées. Le seul critère de la masse volumique n'est donc pas suffisant pour pouvoir formuler des bétons avec les meilleurs rapports résistance /conductivité et rigidité/conductivité des bétons de granulats légers.

Lorsque le rapport $0.25 < G/S < 0.5$ toutes les propriétés sauf la résistance au gel sont améliorées, notamment la résistance à la compression et le module d'élasticité, si le rapport varie 0 à 0.5, le module d'Young croit de 50% quelque soit le granulats. Il a également noté un ralentissement de l' augmentation des résistances du béton léger avec l'augmentation de ciment.

En se basant sur les résultats expérimentaux obtenus, ces éléments concernent seulement les granulats testés dans cette étude, les études présentées sur l'influence des caractéristiques des granulats légers (minéralogie, chimie, distribution et taille des pores) sur les propriétés mécaniques et thermiques des bétons peuvent permettre d'étendre ces conclusions à d'autres granulats .

D'après les résultats, on peut constater qu'il est possible de confectionner un béton à base du sable de dune avec des caractéristiques similaires à celle du béton ordinaire ou parfois ,plus performante , ceci est obtenu avec la prise en considération des particularités de ce sable (granulométrie fine et serrée ,grande porosité ,propreté..) et le choix succincte de formulation.

Le remplacement du sable alluvionnaire (le sable alluvionnaire est le plus fin avec presque 90% des grains entre 0 et 2 mm) par du sable léger (le sable léger est le plus fin, car le refus à 50% est à 1mm environ) diminue la masse volumique du béton .Les performances thermiques, elles sont améliorées. Le seul critère de la masse volumique n'est donc pas suffisant pour pouvoir formuler des bétons avec les meilleurs rapports résistance /conductivité et rigidité/conductivité des bétons de granulats légers .

L'eau absorbée dans les granulats pendant la pré-saturation conduit probablement à une hydratation supplémentaire et donc amélioration de la résistance .

On peut conclure aussi que l'absorption des granulats est primordiale car lors de malaxage du béton, l'emploi de granulats à forte absorption peut provoquer un léger raidissement s'ils n'ont pas été pré mouillés avant leur introduction dans le malaxeur et influencent sur certaines propriétés comme la liaison avec la pâte de ciment, leur stabilité chimique et leurs résistance à l'abrasion ainsi que la résistance du béton au gel et dégel.

Comme un béton léger a généralement un dosage en ciment plus important qu'un béton traditionnel, le pourcentage du retrait endogène est lié à la quantité de ciment dans le mélange.

Il est difficile d'obtenir des résistances élevées et elles exigent de très fortes teneurs en ciment, les performances du béton léger peuvent aussi être améliorées par l'ajout de fines, pour un dosage constant en fine d'addition, la maniabilité est améliorée quand le rapport Eau /Ciment augmente, pour un rapport Eau /Ciment fixé la maniabilité dépend de la nature et du dosage des fines. A cet effet la substitution du sable de Dune dans la composition du béton léger pourra être bénéfique.

Perspectives

- Grâce au progrès dans le domaine des matériaux, les constructeurs doivent étendre cette gamme de béton dans des applications économiques et utiliser ce matériau comme élément porteur.
- Si le béton léger peut être utilisé dans les pièces en béton de structure, il est toutefois nécessaire de prendre en considération la réduction du module et de la résistance à la compression .
- En raison de l'isolement thermique plus important qu'offre le béton léger, les différences de températures ont tendance à être un peu plus forts. En outre, comme elles ont une plus grande capacité d'absorption , les pièces en béton léger sont davantage susceptibles de gauchir et de subir d'autres distorsions du fait de variations de l'humidité différentielle.
- La faible valeur de E qui est associée au béton léger donne des pièces plus flexibles ,mais cette rigidité réduite peut parfois se révéler avantageuse .E présence de chocs ou de réponses dynamiques , ainsi qu'avec certains types d'ouvrages à haut degré d'hyperstaticité comprenant des voiles avec bords encastrés , cette plus faible rigidité a tendance à réduire les concentrations d'efforts en des points particuliers.

- Donc, le problème actuel est de favoriser des produits composites capables de remplir plusieurs usages, nous ne cherchons plus actuellement que la performance mécanique mais nous tentons également d'améliorer les qualités thermiques et économiques.

Annexes

Annexe 2

Composition du béton léger

- 1-Composition du béton léger avec les sables de dunes« Taghit-Adrar ».
- 2- Composition du béton léger avec le sable alluvionnaire « Sidi bel abbes »
- 3- Composition du béton léger avec le sable de dune « Adrar ».
- 4- Composition du béton léger avec le sable de« Taghit ».

Compo.BL	BLT	BLA	BLS	BLSATB
Ciment(kg)	350	350	350	350
Sable (kg)	760	760	760	760
Pierre ponce (l)	491	491	491	491
adjuvent	3%	3%	3%	3%
Eau (l)	170	162	150	142

Compo.BLA	20%	40%	50%	80%
Ciment(kg)	350	350	350	350
Pierre ponce (l)	491	491	491	491
adjuvent	3%	3%	3%	3%
Eau (l)	169	175	180	203
Sable de dune	130	250	380	608
Sable	520	400	380	152
E/C	0.5	0.5	0.5	0.58

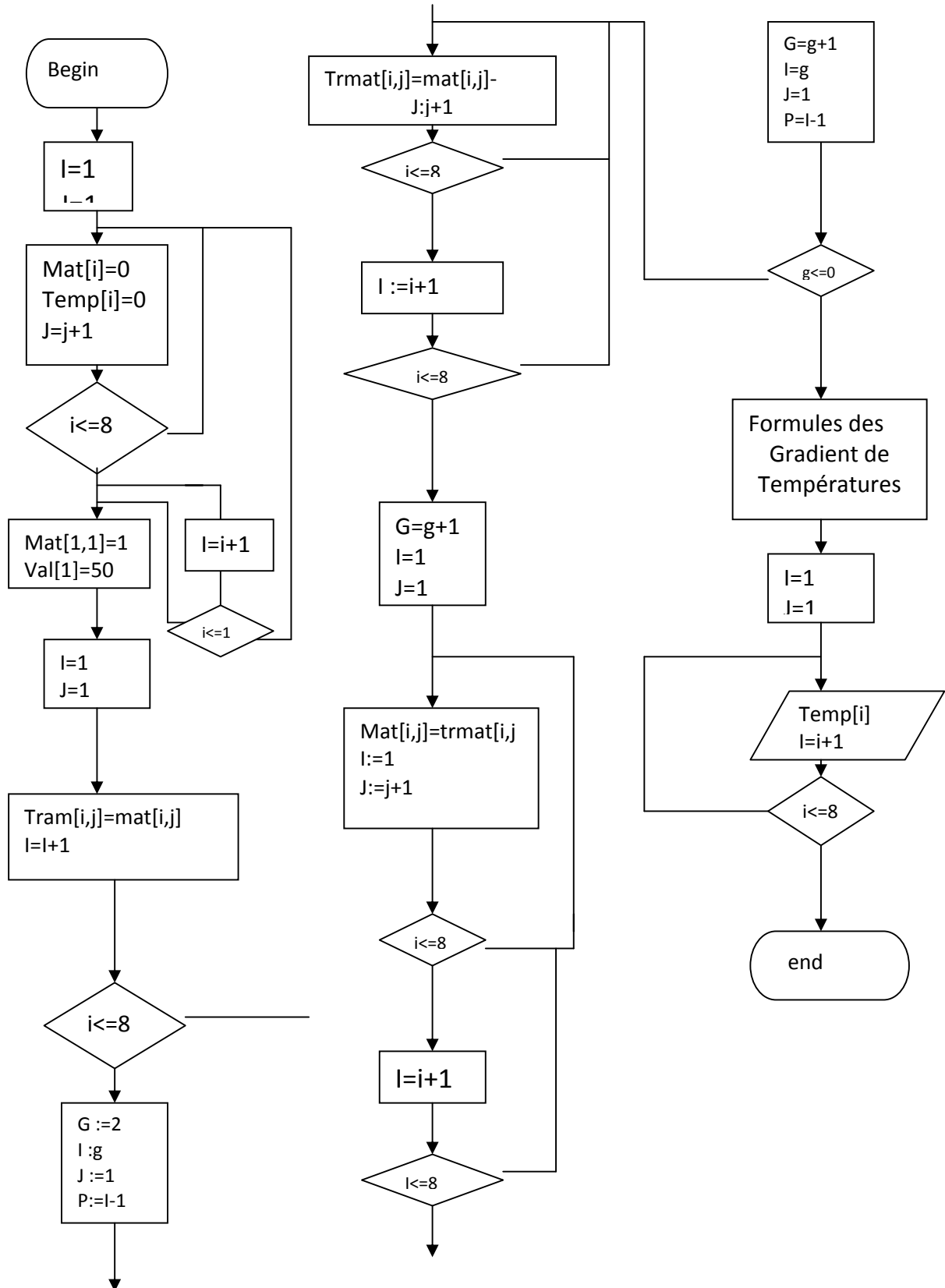
Compo.BLT	20%	40%	50%	80%
Ciment(kg)	350	350	350	350
Pierre ponce (l)	491	491	491	491
adjuvent	3%	3%	3%	3%
Eau (l)	171	175	178	217
Sablede dune	130	260	380	608
Sable	520	400	380	152
E/C	0.5	0.5	0.51	0.62

Compo.BLA	C1	C2	C3	C4
Ciment(kg)	350	350	350	350
Pierre ponce (l)	491	491	491	491
adjuvent	3%	3%	3%	3%
Eau (l)	162	162	175	203
Sable alluvionnaire	114	190	380	608
Sable	590	570	380	152
E/C	0.5	0.5	0.5	0.58

Compo.BLATS	100%	50%	70%	30%
Ciment(kg)	350	350	350	350
Pierre ponce (l)	491	491	491	491
adjuvent	3%	3%	3%	3%
Eau (l)	170	162	150	142
Sablede duneT	X	325	455	X
Sablede duneA	X	325	195	195
Sable S	650	X	X	455
E/C	0.5	0.5	0.5	0.5

Annexe 3

Transfert de chaleur à travers les éprouvettes en béton



Références Bibliographiques

References Bibliographiques

- [ACI03] ACI 213R-03, Guide for structural lightweight-aggregate concrete, Reported by ACI Committee 213, American concrete institute, 2003.
- [ACI04] ACI SP-218.,High-performance structural lightweight concrete, American concrete institute, 2004.
- [ACK83] Acker P.,De la controverse sur les lois de fluage du béton et des moyens d'en sortir, Cement and Concrete research ,13,p.580-582,1983.
- [AL98] AL-KHAIAT H., HA QUE M. N., Effect of initial curing on early strength and physical properties of a lightweight concrete, Cement and Concrete Research, 28, P859-866, 1998.
- [AL-H07] A.S.Al-Harthy,M .Abdel Halim ,R.Taha,K.S.Al-Jabri. The properties of concrete made with fine dune sand .Construction and building materials 21,1803-1808,2007.
- [ANDE 97] ANDERBERG Y.,Spalling phenomena of HPC and OC, Proc. Int. Workshop on Fire Performance of High-Strength-Concrete, NIST Spec. Publ. 919, L.T. Phan, N.J. Carino, D. Duthinh, and E. Garboczi, eds., National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Md., 69-73,1997.
- [ARN86] ARNOULD M., VIRLOGEUX M., Granulats et bétons légers, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées p.505-513,1986.

- [ARI07] Arioiz, O. Effects of elevated temperatures on properties of concrete » *Fire safety Journal*. 42:516-522,2007.
- [BAB03] BABU K. G., BABU D. S., Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume, *Cement and Concrete Research*, 33: 755-762, 2003.
- [BAN 87] Banfill P, Carr M., The properties of concrete made with very fine sand. *Concrete* 1987 (3) :11-6, 1987.
- [BHA 03] BHANJA S., SENGUPTA B., Modified water-cement ratio law for silica fume concretes. *Cement and Concrete Research*, 33 : 447-450, 2003.
- [BEJ98] BALANDIN A., WANG K.L., Significant decrease of the lattice thermal conductivity due to phonon confinement in a free-standing semiconductor quantum well, *Physical Review B*, 58: 1544-1549, 1998.
- [BAR94] BAROGHEL-BOUNY V., Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons: Méthodes, analyse, interprétations, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1994.
- [BAR07] BARBOURA S. S., Modélisation micromécanique du comportement de milieux poreux non linéaires: Application aux argiles compactées, Mémoire de thèse, Université Pierre et Marie Curie, 2007.
- [BAR 94] Baroghel-Bouny V. Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons : Méthodes ,analyse,interprétations. Laboratoire Central des Ponts et chaussées, 1994.

- [BAZ 97] BAZANT Z.P., Analysis of pore pressure, thermal stresses and fracture in rapidly heated concrete, Int Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST, Proc.,_ed. par L.T. Phan, N.J. Carino, D. Duthin et E. Garboczi, NIST Special publication 919, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland,1997.
- [BAZ97] Bažant Z.P.,Hauggaed A.B, Bawejas.,Ulm f.J (1997) „Micro perstress-solidification theory for concrete creep.I :Aging and drying effects,Journal of engineering Mechanics,123 (11),p.1188-1194,1997.
- [BEA03] BEAUCOUR A L., FIORIO B., ORTOLA S., Prediction of the Elastic Modulus of Structural lightweight Aggregate Concrete, 6th CA.NMETIACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technologies, Bucharest, Romania, 225-239, June 8-11, 2003.
- [BEN 02] F.Benboudjema.,Thèse de Doctorat .Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations Biaxiales .Application aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs des centrales Nucléaires,2002.
- [BEJ93] A., Heat transfer, John Wiley & Sons, 1993.
- [BEJ03] BEJAN A, KRAUS A.,Heat transfer handbook. John Wiley & Sons, 2003.
- [BEN86] BENVENISTE Y., On the effective thermal conductivity of multiphase composites, Journal of Applied Mathematics and Physics, 37: 697-713, 1986.

- [BEN87] BENVENISTE Y., A new approach to the application of Mori-Tanaka's theory in composite material, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 56: 2984- 3002, 1987.
- [BEN92] BENTZ D. P., STUTZMAN P. E., GARBOCZI E. J., Experimental and simulation studies of the interfacial zone in concrete, *Cement and Concrete Research*,22: 891-902, 1992.
- [BEN99] BENTZ D. P., SNYDER K. A.,Protected paste volume in concrete. Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate. *Cement and Concrete Research*, 29: 1863-1867, 1999.
- [BEN01] BENTUR A, IGARASHI S. I., KOVLER K.,Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates. *Cement and Concrete Research*, 31: 1587-1591, 2001.
- [BEN87] BENVENISTE Y., Revisiting the generalized self-consistent scheme in composites: Clarification of some aspects and a new formulation. *Mechanics of Materials*, 6: 147-157, 1987.
- [BER02] BERRYMAN J. G., PRIDE S. R., WANG H.F., A differential schema for elastic properties of rocks with dry or saturated cracks, *Geophysics Journal International*, 151: 597-611, 2002.
- [BHA03] BHANJA S., SENGUPTA B.,Modified water-cement ratio law for silica fume concrete. *Cement and Concrete Research*, 33: 447-450, 2003.
- [BIA04] BIANCHI A M.,FAUTRELLE Y., ETAY J., Transferts thermiques. Presses polytechniques et universitaires romandes,

- 2004.
- [BIN08] BINICI H, SH.TAHIR, A.ORHAN, H.KAPLAN. Durability of concrete made with granite and marble and recycle aggregates.J Mater Process Technol. 20 :299-308,2008.
- [BIL04] BILLARD Y., Contribution à l'étude des transferts de fluides au sein d'une paroi en béton, Mémoire de thèse, INSA de Lyon, 2004.
- [BOG13] BOGAS J.A., GOMES, A.,Compressive behavior and failure modes of structural lightweight aggregate concrete - Characterization and strength prediction, Materials & Design, 46: 832-841, 2013.
- [BOG 15] BOGAS J.A, J. de BRITO, J. M. FIGUEIREDO.,Mechanical characterization of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete. Journal of Cleaner Production, Volume 89.15 ; Pages 187-195. February 2015.
- [BON03] BONACINA C., CAMP ANALE M., MORO L., Analytical and experimental investigations on the heat transfer properties of light concrete, International Journal of Thermophysics, 24: 1407-1414, 2003.
- [BOR01] BORNERT M., BRETHEAU T., GILORMINI P., Homogénéisation en mécanique des matériaux 1, Matériaux aléatoires élastiques et milieu périodiques, Collection Mécanique et Ingénierie des Matériaux, Hermès, 2001.
- [BOR08-1] BORIES S. et al. Transferts de chaleurs dans les milieux

- poreux - Conduction, convection, rayonnement, Techniques de l'Ingénieur; Génie énergétique, R 8250, 2008.
- [BOR08-2J] BORIES S. et al., Transferts de chaleurs dans les milieux poreux - Changement de phase, Techniques de l'Ingénieur, Génie énergétique, R 8251, 2008.
- [BOU02] Boudaoud Z, Breysse D., Etude des effets de cobroyage d'un sable et d'un clincker Sur les propriétés d'un béton, Matériaux et constructions, vol35, p.310-316.2002.
- [BOU13] A.bouaziz, R.Hamzaoui, S.Rezigue, A.Bennabi. Valorisation du sable de dune dans les formulations des mortiers et des bétons. 31ème rencontres, E.N.S. Cachan, 29 au 31 mai 2013.
- [BRA75] BRAKEL J. V., Capillary liquid transport in porous media, Mémoire de thèse, Technische Hogeschool, Delft, 1975.
- [BRI01] BRICARD A, GOBIN D., Transferts de chaleur avec changement d'état solide-liquide, Techniques de l'Ingénieur, Génie énergétique, R 8240, 2001.
- [BRI04] BRINI A., Modélisation multi-échelles du comportement et du vieillissement des mousses synthétiques immergées, Mémoire de thèse, Université Pierre et Marie Curie, 2004.
- [BYA10] BYARD B. E., SCHINDLER A K., Cracking tendency of lightweight concrete, Final research report, Highway Research Center, Auburn University, 2010.
- [CAL13] Thomas Calais. Propriétés mécaniques et Durabilité d'un béton léger, application en région froide. Maître ès sciences (M. Sc.).

- University of LAVAL Québec : p64,2013.
- [CAR59] CARSLAW H. S., JAEGER J. C., Conduction of Heats in Solids, 2e edition, Oxford University Press, 1959.
- [CAR86] CARMICHAEL J., Pumice concrete panels, Concrete International,8:31-32, 1986.
- [CAV03] CAVALERL., MIRAGLIA N., PAPIA M., Pumice concrete for structural wall panels, Engineering Structures, 25: 115-125, 2003.
- [CEN08] CENGEL Y. A, BOLES M. A, LACROIX M., Thermodynamique : une approche pragmatique, Chenelière/McGraw-Hill, 2008.
- [CER05] V.Cerezo. Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base des particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique .Thèse de Doctorat Lyon,2005.
- [CHA02] CHANDRA S., BERNTSSON L., Lightweight aggregate concrete, Noyes/William Andrew, 2002.
- [CH11] CHARRAS, T., DI PAOLA, F., La procédure Pasapas, Documentation Cast3M, CEA, 2011.
- [CHE08] CHEN B., LIU J., Experimental application of mineral admixtures in lightweight concrete with high strength and workability, Construction and Building Materials; 22: 655-659, 2008.
- [CHI02] CHIA K. S., ZHANG M. H., Water permeability and chloride

- penetrability of high strength lightweight aggregate concrete. Cement and Concrete Research, 32: 639-645, 2002.
- [CHI03] CHI J. M. et al. Effect of aggregate properties on the strength and the stiffness of lightweight concrete, Cement and Concrete Composites, 25: 197-205, 2003.
- [CHR.79] CHRISTENSEN R. M., LO K. H., Solutions for effective shear properties in three sphere and cylinder models, Journal of Mechanics and Physics of Solids, 27: 315-330, 1979.
- [CLA93] CLARKE J. L., Structural Lightweight Aggregate Concrete, Blackie Academic and Professional, 1993.
- [CLA95] CLAUSER C., HUENGES E., Thermal Conductivity of Rocks and Minerals, in Rock Physics and Phase Relation, A Handhook of Physical Constants, American Geophysical Union, 1995.
- [CLY06] CLYNE T.W. et al., Porous materials for thermal management under extreme conditions, Phitosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 364: 125-146, 2006.
- [COQ76] Coquillat, G. . Bétons légers de structure .Le bâtiment,bâtir,1976.
- [CLA95] CORTES H., BLOT J., Transferts thermiques, Application à l'habitat. Ellipses, 1999.
- [COUSS95] COUSSY.Mechanics of Porous Continua. Wiley,New York, 1995.

- [DAL03] AL PONT S. Lien entre la perméabilité et l'endommagement dans les bétons à haute température. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Marne La Vallée, France, 2003.
- [DAR10] DAR Y ABEIGI K., CUNNINGTON G.R., KNUTSON J.R., Combined heat transfer in high-porosity high-temperature fibrous insulation: Theory and experimental validation, *Journal of thermophysics and heat transfer*, 25: 536- 546, 2010.
- [D.A.R13] D.A.R .Daloge, M.GS.Dias, C.T.Ariyansa..., Offshore sand as a fine aggregate for concrete production .*Brit J Appl Sci Technol*, 3(4), pp.813-825, 2013.
- [DEG94] DEGIOV ANNI A., Conductivité et diffusivité thermique des solides, *Techniques de l'Ingénieur, Mesures et Contrôle*, R 2850, 1994.
- [DEM01] DEMIRBOGA R., ORUNG I., GÜL R., Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes, *Cement and Concrete Research*, 31: 1627-1632, 2001.
- [DEM03-1] DEMIRBOGA R., Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar, *Energy and Buildings*, 35: 189-192, 2003.
- [DEM03-2] DEMIRBOGA R., GÜL R., The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete, *Cement and Concrete Research*, 33:

- 723-727, 2003.
- [DEM07] DEMIRBOGA R., Thermal conductivity and compressive strength of concrete incorporation with mineral admixtures, *Building and Environment*, 42: 2467- 2471, 2007.
- [DED92] Dederichs U., Jumpanen U-M. and Penttala ., Behaviour of high temperatures. Espoo 1989. Helsinki University of technology, Department of Structural Engineering, Report 92. P.723, 1992.
- [DOR02] DOREY R. A, YEOMANS J. A, SMITH P. A., Effect of pore clustering on the mechanical properties of ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, 22: 403-409, 2002.
- [NE 02] NORME EUROPEENNE 1745, Maçonnerie et éléments de maçonnerie - Détermination des valeurs thermiques de calcul, 2002.
- [ESH57] ESHELBY J. D., The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, *Proceedings of the Royal Society of London*, A 241, 376-396, 1957.
- [EUR00] EUROLIGHTCON, Mechanical properties of lightweight aggregate concrete, Document BE96-3942/R23, 2000.
- [EYG97] EUROCODE 2, Calcul des structures en béton, 1992.
- [EYG97] EYGLUNENT B., Manuel de thermique, 2e édition, Hermès, 1997.
- [FEL99] Felicitti, R & Gambrova, P. G. On the properties of high performance siliceous concrete exposed to high

- temperature. Mechanics of Quasi-Brittle materials and structures, edited by G. Pijaudier-Cabot, Zdenek Bittnar & Bruno Gérard. Paris :Hermes ,p167-186,1999.
- [FI004] FIORIO B., BEAUCOUR AL., ORTOLA S., Optimization of the mechanical behavior of lightweight aggregate concrete by the use of high performances cementitious matrixes, Symposium Fib (ceb-fip)/AFGC on Concrete Structures: the Challenge of Creativity, Avignon, France, April 26-28, 2004.
- [FLEX10] T. Flexikala, P. Partheepan Granite powder concrete. Indian J. Sci Technol, 3 ,pp.311-317,2010.
- [FRA07] FRANCO A, An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method, Applied Thermal Engineering, 27: 2495-2504, 2007.
- [FRE08] FREDRIKSSON H., AKERLIND U., Physics of functional materials, John Wiley & Sons, 2008.
- [FU99] FU X., CHUNG D. D. L., Effect of admixtures on thermal and thermomechanical behavior of cement paste, ACI Materials Journal, 96-M57, 1999.
- [GAW 03] GAWIN D., PESAVENTO F., SCHREFLER B.A. Modelling of hygro-thermal behaviour of concrete at high temperature with thermo-chemical and mechanical material degradation, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 192, 1731-1771,2003.
- [GAR00] GARBOCZI E. J., BERRYMAN J. G., New effective medium theory for the diffusivity or conductivity of a multi-scale

- concrete microstructure model, *Concrete Science and Engineering*, 2: 88-96, 2000.
- [GAWO4] GAWIN D., KOSNY J., WILKES K., Thermal conductivity of moist cellular concrete-experimental and numerical study. *Proceedings of ASHRAE Thermal IX Conference*, Clearwater Beach, FL, 2004.
- [GH008] GHOSH S.K., ANWAR BEG O., Theoretical analysis of radiative effects on transient free convection heat transfer past a hot vertical surface in porous media, *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 13: 419-432, 2008.
- [GR005] GRONDIN F. A., Modélisation multi-échelles du comportement thermo-hydrromécanique des matériaux hétérogènes. Application aux matériaux cimentaires sous sollicitations sévères, *Mémoire de thèse*, Université Pierre et Marie Curie, 2005.
- [GRU01] GRUSZKIEWICZ M. et al., Water adsorption at high temperature on core samples from The Geysers geothermal field, California, USA, *Geothermics*, 30: 269-302, 2001.
- [GUE97] GUETTALA A .MekmiS,S,Tibermacine N.A.Study of mechanical characteristics for sand concrete (Rolled sand concrete and dune sand concrete),In ;7th Arab structural engineering conference ,Kuwait,Nov.24-26 ,1997.
- [GRU07] GRUESCU C. et al., Effective thermal conductivity of partially saturated porous rocks, *International Journal of Solids and Structures*, 44: 811-833, 2007.

- [GUN08] GUNDUZ L., The effects of pumice aggregate/cement ratios on the low strength concrete properties. *Construction and Building Materials*, 22: 721- 728, 2008.
- [HAS68] GUSTAFSSON S. E., Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials. *Review of Science Instruments*, 62: 797-804, 1968.
- [HAN11] HANICHE R., Contribution à l'étude des bétons portés en température / Evolution des propriétés de transfert / Etude de l'éclatement, Mémoire de thèse, INSA de Lyon, 2011.
- [HAN02] Hando, SK., Agarwal S., SK. Physiochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures. *Cement Concrete Research* , 32 :1009-18,2002.
- [HANI08] Hanifi Binici, Tahir Shah, Orhan Aksogan, Hasan Kaplan. Durability of concrete made with granite and marble and recycle aggregates, 2008.
- [HAN66] Hansen T. C. Influence of size and shape of member on the shrinkage and creep of concrete, *Journal of the American Concrete Institute*, 63.p. 267-290, 1966.
- [HAS62] HASHIN Z., SHTRIKMAN S., A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials, *Journal of Applied Physics*, 33: 3125-3131, 1962.
- [HAS62-2] HASHIN Z., The elastic modulus of heterogeneous materials,

- Journal of Applied Mechanics, 29: 143-150, 1962.
- [HAS63] HASHIN Z., SHTRIKMAN S., A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials, Journal of Mechanics and Physics of Solids, 11: 127-140, 1963.
- [HAS68] HASHIN Z., Assessment of the self consistent scheme approximation: conductivity of particulate composites, Journal of Composites Materials, 2: 284-300, 1968.
- [HAS83] HASHIN Z., Analysis of composite materials - A survey, Journal of Applied Mechanics, 50: 481-505, 1983.
- [HEB11] H.Hebhoub,M.Aoun,Belachia ,H.Houari,E.Ghorbel . Use of waste marble aggregates in concrete, 2011.
- [Hein98] Heinfling, G., Contribution à la modélisation numérique du comportement du béton et des structures en béton armé sous sollicitations thermo-mécanique à hautes températures. Thèse de génie civil; INSA -Lyon, 227p, 1998.
- [HIL59] HILL F.B., WILHELM RH., Radiative and conductive heat transfer in a quiescent gas-solid bed of particles: Theory and experiment, AJChE Journal, 5: 486-496, 1959.
- [HIL63] HILL R., Elastic properties of reinforced solids: some theoretical principles. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 11: 357-372, 1963.
- [HIL65] HILL R., A self-consistent mechanics of composite materials, Journal of Mechanics and Physics of Solids, 13: 213-222, 1965.

- [HOL04] HOLM, T.A., OOI,O.S. and BREMMER, T.W. ,Moisture Dynamics in Lightweight Aggregate and Concrete”,ESCI Publication #9340,2004.
- [HOS04] HOSSAIN K. M. A., Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete, Cement and Concrete Research, 34: 283-291, 2004.
- [HOS05] HOSSAIN K. M. A., Volcanic ash and pumice as cement additives: pozzolanic, alkali-silica reaction and autoclave expansion characteristics. Cement and Concrete Research, 35: 1141-1144, 2005.
- [KAN07] KANEMA M., MORAIS M.V.G. de, NOUMOWE A., GALLIAS J.L, CABRILLAC R.Experimental and numerical studies on thermo-hydrous in concrete exposed to high temperature, Heat and Mass Transfers, Ed. Springer,2007.
- [KAV95] KA VIANY M., Principales of Heat Transfer in Porous Media, Springer, 1995.
- [KE08] KE Y., Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers : expérience et modélisation, Mémoire de thèse, Université de Cergy-Pontoise, 2008.
- [KE09] KE Y., BEAUCOUR A-L., ORTOLA S., DUMONTET H., Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete, Construction and Building Materials, 23: 2821-2828, 2009.
- [KE10] KE Y., ORTOLA S., BEAUCOUR A-L., DUMONTET H., Identification of microstructural characteristics in lightweight

- aggregate concretes by micromechanical modelling including the interfacial transition zone (ITZ), *Cement and Concrete Research*, 40: 1590-1600, 2010.
- [KIM03] KIM H. K. et al., An experimental study on thermal conductivity of concrete, *Cement and Concrete Research*, 33: 363,2003.
- [KIM12] KIM H. K. et al., JEON J.H., LEE H. K., Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air, *Construction and Building Materials*, 29: 193-200,2012.
- [KLU02] KLUG C., CASHMAN K. V., BACON C. R., Structure and physical characteristics of pumice from the climactic emption of Mount Mazama, Oregon, *Bulletin of Volcanology*, 64: 486,2002.
- [KLU02] KOCKAL N.U., OZTURAN T., Strength and elastic properties of structural lightweight concretes, *Materials and Design*, 32: 2396,2002.
- [LAR05] LAROZE S., *Mécanique des structures*, Tome 3, Cépaduès, 2005.
- [LAS97] Lassabatère T., Torrenti J-M., Granger L., Sur le Couplage entre séchage du béton et contrainte appliqué. Actes du Colloque Saint-Venant, Paris, France, 331-338,1997.
- [LAT09] LATIF M. J., *Heat Conduction*, 3^e edition, Springer, 2009.
- [LEC] Leca. *Caractéristiques des bétons allégés*.

- [LAR05] LAROZE S., Mécanique des structures, Tome 3, Cépaduès, 2005.
- [LI04] Li, M., Ccx., Sun, W. Mechanical properties of high –strength concrete after fire. Cement Concrete Research.34
- [LIU11] J. Liu. "Étude expérimentale de la perméabilité relative des matériaux cimentaires et simulation numérique du transfert d'eau dans le béton", *Thèse de Doctorat*, Génie civil, Université Lille Nord-de-France, 2011.
- [L004-1] LOT. Y., CUI H. Z., Effect of porous lightweight aggregate, on strength of concrete, *Materials letters*, 58, P916-919, 2004.
- [L007] LOT. Y., TANG W. C., CUI H. Z., The effects of aggregate properties on lightweight concrete, *Building and Environment*, 42: 3025-3029, 2007.
- [L008] LO T. Y. et al., The effect of aggregate absorption on pore area at interfacial zone of lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, 22: 623- 628, 2008.
- [L014] LO T. Y. et al., The effect of aggregate absorption on pore area at interfacial zone of lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, 22: 623- 628, 2008.
- [KE14] KE Y., ORTOLA S., BEAUCOUR A-L., DUMONTET H., Micro-stress analysis and identification of lightweight aggregate's failure strength by micromechanical modeling, *Mechanics of Materials*, 68: 176-192, 2014.

- [MER70] MERECHAL J. C., Contribution a étude des propriétés thermiques et mécaniques du béton en fonction de la température, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, 274: 122-146, 1970.
- [MCL77] MCLAUGHLIN R., A study of the differential schema for composite materials, International Journal of Engineering Science, 15, pp.237-244, 1977.
- [MIL87] MILOH T., BENVENISTE Y., A generalized self-consistent method for the effective conductivity of composites with ellipsoidal inclusions and cracks bodies, Journal of Applied Physics, 63: 789-796, 1987.
- [MIN03] MINDESS S., YOUNG J. F., DARWIN D., Concrete, 2e edition, Pearson Education, 2003.
- [MOUN91] Mounajed, G., SYMPHONIE, Code de calcul général aux éléments finis, CSTB, France, 1991.
- [MOUN02] Mounajed G., Boussa H., Menou A., « Thermal mechanical damage of concrete exposed to high temperature. » First International Conference on Applications of Porous Media Jerba, Tunisia, June 02-08, 2002.
- [MOUN02] Mounajed,, G.,. Exploitation du nouveau modèle béton numérique dans SYMPHONIE. Cahiers du CSTB, n°3421 septembre 2002.
- [MOUN02-2] MOUNAJED G., UNG QUOC H., MESUREUR B., New tangent formulation of the concrete damage model « MODEV ». Werner Fuchs, Hans-Wolf Reinhardt, Rolf Eligehausen au

- 60ème anniversaire. Geburtstag, ibidem-Verlag, Stuttgart, 2002.
- [MOR06] MORAIS M. V. G., NOUMOWE A., KANEMA M., GALLIAS J.L., CABRILLAC R., Transferts thermo-hydriques dans un élément en béton exposé à une température élevée: Approches numérique et expérimentale. AUGC, La Grande Motte, Juin 2006.
- [MOUN03] Mounajed G., Menou A., Boussa H., Pineaud A., Remond S. & Cabrillac, R. 2003 « Comportement au feu des bétons. Approche multi échelles de l'endommagement thermique et identification expérimentale des paramètres», Revue Française de Génie Civil, 2003 (accepté).
- [MUR87] MURA T., Micromechanics of defects in solids, 2e edition, Martinus Nijhoff Publishers, 1987.
- [MOR73] MORI T., TANAKA K., Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions, Acta Metallurgica, 21: 571-574, 1973.
- [NAD04] NADEAU J.C., FERRARI M., Effective thermal expansion of heterogeneous materials with application to low temperature environments, Mechanics of Materials, 36: 201-214, 2004.
- [NAI05] NAIT-ALI B., Elaboration, caractérisation et modélisation de matériaux poreux : Influence de la structure poreuse sur la conductivité thermique effective. Mémoire de thèse, Université de Limoges, 2005.
- [NAI06] NAIT-ALI B. et al., Thermal conductivity of highly porous zirconia. Journal of the European Ceramic Society, 26: 3567-

3574, 2006.

- [NECH 00] W.Nechnech.,Thèse de Doctorat.Contribution à l'étude numérique du béton et des structures en béton Armé soumises à des sollicitations thermiques et mécaniques couplés : une approche thermo-elasto-plastique endommageable,2000.
- [NEV00] NEVILLE A.,Propriétés des bétons, Eyrolles, 2000.
- [NEW 93] Newman,J.B.,Properties of structural lightweight aggregate concrete.In Clarke,J.I., (Ed).Structural Lightweight Aggregate Concrete .Chapman& Hall.London,UK,pp.19-44,1993.
- [NGU 11] NGUYEN L. H., BEAUCOUR A-L., ORTOLA S., NOUMOWE A., Bétons de structure à propriétés d'isolation thermique améliorées : approche expérimentale, Actes de 29^erencontres AUGC, Tlemcen, Algérie, 29-31 mai 2011.
- [NGU13] NGUYEN L.,Thèse de Doctorat .Bétons de structure à propriétés d'isolation thermique améliorées : Approche expérimentale et modélisation Numérique.Université de Cergy Pontoise,2013.
- [NGU14] NGUYEN L. H., BEAUCOUR A-L., ORTOLA S., NOUMOWE A., Influence of the volume fraction and the nature of fine lightweight aggregates on the thermal and mechanical properties of structural concrete, Construction and Building Materials, 51: 121-132, 2014.
- [NOR85] NORRIS A N., SHENG P., CALLEGARI A J., Effective-medium theories for two-phase dielectric media, Journal of Applied Physics, 57: 1990-1996,1985.

- [NOR89] NORRIS A. N., An examination of the Mori-Tanaka effective medium approximation for multiphase composites, *Journal of Applied Mechanics*, 56: 83-88, 1989.
- [OCH08] OCHS F., HEIDEMANN W., MÜLLER-STEINHAGEN H., Effective of thermal conductivity of moistened insulation materials as a function of temperature, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51: 539-552, 2008.
- [OTH11] OTHUMAN M. A, WANG Y. C., Elevated-temperature thermal properties of lightweight formed concrete., *Construction and Building Materials*, 25: 705- 716, 2011.
- [PERS98] PERSSON B., Seven-year study on the effect of silica fume in concrete, *Advanced Cement Based Materials*, 7: 139-155, 1999.
- [PER08] PERTUE A., Etude expérimentale du retrait endogène, du fluage propre et de la fissuration des matrices cimentaires aux jeune et très jeune âges, *Mémoire de thèse, Université de Nantes*, 2008.
- [PHA00] PHAN-THIEN N., PHAM D. C., Differential multiphase models for polydispersed inclusions: thermal conductivity and effective viscosity, *International Journal of Engineering Science*, 38: 73-88, 2000.
- [RAN 03] RANC G., SERCOMBE J., RODRIGUES S., Comportement à haute température du béton de structure - Impact de la fissuration sur les transferts hydriques, *Revue française de génie civil*, vol. 7(4), pp.397-424, 2003.

- [ROB88] ROBERSON E.C., Thermal properties of rocks, Open-file report 88-441, U.S. Department of the Interior, Geological Survey, 1988.
- [ROH98] ROHSENOW W. M., HARTNETT J. P., CHO Y. I., Handbook of heat transfer, 3e edition, McGraw-Hill, 1998.
- [ROS70] ROSEN B. W., HASHIN Z., Effective thermal expansion coefficients and specific heats of composite materials, International Journal of Engineering Science, 8: 157-173, 1970.
- [SAH03] SAHIL R. et al., The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the compressive strength and densities of concrete, Cement and Concrete Research, 33: 1245-1249, 2003.
- [SAR99] R. Sarkar, G. Banerjee, "Effect of compositional variation and fineness on the densification of MgO-Al₂O₃ compacts", J. Eur. Cer. Soc., 19 : p.2893-2899,1999
- [SEN15] Senhadji.Y, G. Escadeillas, A.S. Benosman, M. Mouli, H. Khelafi & S. Ould Kaci Pages 625-640. Effect of incorporating PVC waste as aggregate on the physical, mechanical, and chloride ion penetration behavior of concrete. Journal of Adhesion Science and Technology .; Volume 29, Issue 7,2015.
- [SEVI 1] SEVOSTIANOV. I., On the thermal expansion of composite materials and cross-property connection between thermal expansion and thermal conductivity, Mechanics of Materials, 45: 20-33, 2011.

- [Stab00] Stabler, J. & Baker, G. 2000 On the form of free energy and specific heat in coupled thermo-elasticity with isotropic damage. *International Journal of Solids and Structures*, 37:4691-4713,2000.
- [SIB91] SIBONI G., BENVENISTE Y., A micromechanics model for the effective thermomechanical behaviour of multiphase composite media, *Mechanics of Materials*, 11: 107-122, 1991.
- [SIN85] SING K. S. W. et al., Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity, *Pure and Applied Chemistry*, 57: 603-619, 1985.
- [SOUAL15] Hamza Soualhi, El-Hadj Kadri, Tien-Tung Ngo, Adrien Bouvet, François Cussigh & Benchaa Benabed. Rheology of ordinary and low-impact environmental concretes, *Journal of Adhesion Science and Technology* ; 29:20, 2160-2175,2015.
- [STE85] STEPHAN K., LAESECKE A.,The thermal conductivity of fluid air, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 14: 227-234, 1985.
- [Sullivan71] Sullivan, P. J. E., Poucher, M. P. ,The influence of temperature on the physical properties of concrete and mortar in the range 20 to 400°C. *Temperature & Concrete*, ACI Publication SP 25, PP 103- 135, 1971.
- [TON09] TONG F., JING L., ZIMMERMAN R. W., An effective thermal conductivity model of geological porous media for coupled thermo-hydro-mechanical systems with multiphase

- flow, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46: 1358-1369, 2009.
- [TOPO8] TOPCU I. B., ISIKDAG B., Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete, Journal of Materials Processing Technology, 204: 34-38, 2008.
- [ULM99] ULM F.J., ACKER P., LEVY M., Chunnel fire. II: Analysis of concrete damage, Journal of Engineering Mechanics, 125(3): 283-289, 1999.
- [UYS04] UYSAL H. et al., The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete, Cement and Concrete Research, 34: 845-848, 2004.
- [VAQ76] A.Vaquier., Thèse de Doctorat. Influence de la cinétique de remplissage et de vidange des pores légers sur les propriétés des bétons., Université Paul Sabatier de Toulouse, 1976.
- [VIJ13] Vijayalakshmi.M, Sekar.A.S.S., Ganesh Prabhur.G., Strength and durability properties of concrete made granite industry waste, 2013.
- [WAS96] WASSERMAN R., BENTUR A., Interfacial interactions in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength, Cement and Concrete Composites, 18: 67-76, 1996.
- [WEN04] WEN C.E. et al. Compressibility of porous magnesium foam: dependency on porosity and pore size, Materials Letters, 58: 357, 2004.

- [XU00] XU Y., CHUNG D. D. L., Cement of high specific heat and high thermal conductivity, obtained by using silane and silica fume as admixtures, *Cement and Concrete Research*, 30 (7): 1175-1178,2000.
- [YAS04] YASAR E., ERDOGAN Y., KILIC A., Effect of limestone aggregate type and water-cement ratio on concrete strength, *Materials Letter*, 58: 772-777, 2004.
- [ZA098] ZAOUI A., *Matériaux hétérogènes et composites*, Editions de l'Ecole Polytechnique, 1998.
- [ZHA90] ZHANG M. H., GJORV O. E., Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste, *Cement and Concrete Research*, 20: 610-618, 1990.
- [ZHA91-1] ZHANG M. H., GJORV O. E. ,Characteristics of lightweight aggregates of high-strength concrete, *ACI Materials Journal*, 88: 150-158, 1991.
- [ZHA91-2] ZHANG M. H.,GJORV O. E., Mechanical properties of high-strength lightweight concrete, *ACI Materials Journal*, 88: 240-247, 1991.
- [ZHU04] ZHUTOVSKY S., KOVLER K., BENTUR A., Influence of cement paste matrix properties on the autogenous curing of high-performance concrete, *Cement and Concrete Composites*, 26: 499-507, 2004.
- [ZIM89] ZIMMERMAN R. W., Thermal conductivity of fluid-saturated rocks, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 3: 219-227, 1989.

- [Ziv09] Zivica V. Effects of the very low water cement ratio. *Construction and Building Materials* , 23 :3579-3582,2009.
- [ZR10] ZRI A., Thèse de Doctorat « Mise en place d'une nouvelle approche de formulation d'une matrice cimentaire à base de sable de dragage : application aux bétons de sables et granulats »,2010.
- [ZIV09] ZIVICA V., Effects of the very low water cement ratio, *Construction and Building Materials*, 23: 3579-3582, 2009.