

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU  
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



***THESE DE DOCTORAT EN GENIE CIVIL***  
***OPTION : STRUCTURES ET MATERIAUX***

**Présentée par :**

**M<sup>me</sup> MOHELLEBI Samira Née BOUAZIZ**  
**Maître assistante Classe A**

**THEME**

***Caractérisation et Modélisation des  
paramètres physico-hygro-mécaniques d'un  
béton léger à base de granulats composites***

Devant le jury composé de :

BAHAR Ramdane	Professeur,	USTHB	Président
AIT TAHAR Kamal	Professeur,	UMMTO	Rapporteur
MELBOUCI Bachir	Professeur,	UMMTO	Examineur
BIBI Mekki	Professeur,	Univ. Msila	Examineur
MEDDAHI Amer	Professeur,	Univ. Boumerdes	Examineur
DAHMANI Lahlou	Professeur,	UMMTO	Examineur

Soutenue le :

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
------------------------------------	----------

## **CHAPITRE 1 SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

I.1. Introduction.....	
I.2. Bétons légers.....	
I.3. Granulats légers.....	
I.3. 1. Porosité et densité des bétons et granulats légers .....	
I.3. 2. Fabrication des granulats légers.....	
I.3. 3. Absorption d'eau des granulats légers.....	
I.4. Nouveaux granulats.....	
I.4. 1. Le béton bois.....	
I.5. Renforcement du béton léger par les fibres .....	
I.6. Formulation des bétons légers.....	
I.6. 1. Adhérence pâte-granulats légers .....	
I.6. 2. Durcissement du béton léger.....	
I.6. 3. Propriétés mécaniques des bétons légers .....	
I.6. 4. Retrait.....	
I.6. 5. Isolation.....	
I.7. Conclusion .....	

## **CHAPITRE 2 PROCEDURE D'ESSAIS**

II.1. Introduction .....	
II.2. Matériaux utilisés .....	
II.3. Procédure d'élaboration des billes de polypropylène enrobées.....	

II.4. Caractéristiques physiques des matériaux .....	
utilisés pour la réalisation des éprouvettes	
II.5. Analyse granulométrique.....	
II.5.1. La courbe granulométrique .....	
II.5.2. Formulation du béton méthode de DREUX GORISSE.....	
II.6. Détermination des masses et des volumes des .....	
différents constituants des éprouvettes cylindriques	
II.6.1. Eprouvettes cylindriques 15cm*30 cm en béton témoin.....	
II.6.2. Eprouvettes cylindriques en béton avec billes de polypropylène.....	
II.6.3. Eprouvettes cylindriques en béton avec billes de polypropylène enrobées	
II.6.4. Tableau récapitulatif.....	
II.7. Confection des éprouvettes.....	
II.7.1. Matériel utilisé et méthodologie.....	
II.7.2. Gammes d'éprouvettes réalisées.....	
II.8. Conclusion.....	

## **CHAPITRE 3 PRESENTATION DES RESULTATS ET DISCUSSION**

III.1. Introduction .....	
III.2. Présentation des essais.....	
III.2.1. Essai de compression uni axiale.....	
III.2.2. Analyse microstructurale d'un faciès de rupture.....	
III.3. Comportement des éprouvettes cylindriques soumises.....	
à la compression uni axiale	
III.3.2. Eprouvettes de béton léger.....	

III.3.2.1 Modes de rupture.....	.....
III.3.2.2. Résultats des essais de compression.....	.....
uni axiale sur éprouvettes cylindriques	
III.3.2.2.1.Essais avec éprouvettes humides .....	.....
à base de billes non enrobées	
III.3.2.2.2.Essais avec éprouvettes sèches.....	.....
à base de billes non enrobées	
III.3.2.2.3. Essais avec éprouvettes à base.....	.....
de billes enrobées	
III.3.3. Forces et contraintes moyennes de rupture.....	.....
III.3.4.. Analyse graphique des résultats.....	.....
III.3.5.Interprétation des résultats .....	.....
III.4. Analyse microstructurale .....	.....
III.5.Conclusion .....	.....

## **CHAPITRE 4 TECHNIQUES ET MODELES D'HOMOGENEISATION**

IV.1. Introduction .....	.....
IV.2 Approche en déformation .....	.....
IV.3 Approche en contrainte .....	.....
IV4 Comportement homogénéisé d'un composite biphasé.....	.....
IV.5 Différents modèles d'homogénéisation .....	.....
IV.5.1.Borne de Voigt (V) .....	.....
IV.5.2 Borne de Reuss.....	.....
IV.5.3 Modèles combinés (VR, RV) .....	.....

IV.5.4. Bornes de Hashin-Shtrikman.....	.....
IV.6. Modélisation d'un matériau composite à inclusions sphériques .....	.....
IV.6.1. Modèle à inclusions simples .....	.....
VI.6.2. Modèle à inclusions bi-composite .....	.....
IV.7. Conclusion .....	.....

## **CHAPITRE 5 MODELISATION MECANIQUE ET THERMIQUE**

V.1 Introduction.....	.....
V.2. Modélisation mécanique du grain composite .....	.....
par homogénéisation auto cohérente	
V.3. Proposition d'un modèle à l'échelle du VER.....	.....
V.3.1. Rappel de la loi de mélange : Modèle série.....	.....
V.3.2. Présentation du modèle.....	.....
V.4. Généralisation du modèle au béton léger.....	.....
V.5. Présentation des résultats.....	.....
V.6. Modélisation thermique.....	.....
V.6.1. Définition des différents modes de transferts thermiques.....	.....
V.6.2. Modèles de Voigt et Reuss.....	.....
V.6. 3. Détermination de la conductivité thermique réelle du granulat composite....	.....
V.7. Conclusion .....	.....

**CONCLUSION GENERALE.....**

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....**

## Liste des Figures

Figure I.1 Classification des bétons légers

Figure I.2. Représentation schématique des différents types de béton léger, d'après short et kinniburgh

Figure I.3. Absorption d'eau en fonction du temps des granulats d'argile expansés (Arg) et de cendres volantes frittées (Cv), granulats 4/8 mm, densité apparente  $\rho_g$ ; d'après Zhang & Gjordv.

Figure I.4. Sciure de bois et billes de polypropylène

Figure I.5. Grains composites artificiels

Figure I.6. Interface pâte-granulats et mécanismes d'interaction identifiés, d'après Zhang & Gjordv

Figure I.7. Relation entre la résistance à la compression du béton à 28jours (mesurée sur cubes) et le dosage en ciment des bétons ayant un affaissement de (5cm) et confectionnés avec différents types de granulats légers. *A cendres volantes frittées+granulat fin ordinaire, B laitier du haut fourneau+granulat fin ordinaire, C cendres volantes frittées, D schiste fritté, E ardoise expansée, F argile expansé+sable, G laitier expansé*; [Lydon, 1982]

Figure I.8. Retrait endogène en fonction du temps : *déformation libres (a) et contraintes induites par le retrait empêché (b)* ; bétons légers avec granulats saturés (BL-8,9%) et partiellement saturés (BL-5,8%) ; bétons de granulats rigides (BO) ; [Bentur & Coll].

Figure II-1 : Billes de polypropylène

Figure II.2: Etapes d'élaboration des granulats composites : a) grains de PP, b) PP dans un filet pour imprégnation, c) coulis de chaux, d) poudre de céramique, e) et f) grains de PP enrobés.

Figure II.3. Gamme de granulats légers : *billes de polypropylène enrobées*

Figure II.4 : Courbe granulométrique

Figure II.5 : Courbe granulométrique optimale. 10, montrent la réalisation de toutes ces éprouvettes au laboratoire du génie civil.

Figure II-6 : Réalisation des éprouvettes 15\*30 pour l'essai de compression

Figure II.7 : Démoulage des éprouvettes cylindriques

Figure II.8. Conservation des éprouvettes dans les bacs d'eau potable.

Figure II.9. Eprouvettes de béton composite avec billes de polypropylène enrobées.

Figure II.10. Phénomène de remontée des billes polypropylène non enrobées.

Figure III.1: Machines d'essais pour les différents spécimens.

Figure III.2: Microscope électronique à balayage

Fig.III.3 Eléments constitutifs

Figure III.4. Essai de compression axial ( éprouvettes cylindriques 15x300 mm) en béton ordinaire

Figure III.5. Effritement de la partie superficielle d'une éprouvette de béton

Figure III.6. Eprouvette de béton composite avec 40% de billes de polypropylène enrobées après écrasement.

Graphe III.7. Résultats des efforts maximaux de compression uniaxiale pour éprouvettes sèches à base de billes non enrobées.

Graphe III.8. Résultats des contraintes de compression uniaxiale maximales avec éprouvettes sèches à base de billes non enrobées.

Graphe III.9. Masses des différentes éprouvettes sèches à base de billes non enrobées.

Graphe III.10. Résultats des efforts maximaux de compression uniaxiale pour éprouvettes humides et sèches à base de billes non enrobées.

Graphe III.11. Résultats des contraintes maximales de compression uniaxiale pour éprouvettes humides et sèches à base de billes non enrobées.

Graphe III.12. Allure de la courbe de comportement en compression uniaxiale pour éprouvette sèche avec 30% de billes non enrobées.

Graphe III.14. Allure de la courbe de comportement en compression uniaxiale pour éprouvette sèche avec 30% de billes de polypropylène enrobées de poudre de céramique.

Graphe III.15. Résultats des efforts maximaux de compression uniaxiale pour éprouvettes sèches à base de billes de polypropylène enrobées.

Figure III.16. Résultats des contraintes de compression uniaxiale maximales pour éprouvettes sèches à base de billes de polypropylène enrobées.

Figure III.17. Résultats des efforts maximaux de compression uniaxiale pour éprouvettes sèches à base de billes de polypropylène enrobées et non enrobées.

Figure III.18. Résultats des contraintes maximales de compression uniaxiale pour éprouvettes sèches à base de billes de polypropylène enrobées et non enrobées.

Figure III.19. gramme de comparaison des contraintes maximales de compression uniaxiale pour éprouvettes sèches à base de billes de polypropylène enrobées et non enrobées.

Figure III.20. Efforts maximaux de compression uni axiale pour éprouvettes humides et sèches à base de billes non enrobées.

Figure III.21. Variation dimensionnelle des éprouvettes en fonction de la température Figure III.22. Microstructure du béton léger, *a)- arrachement, b) interface, c)- constituants, d) grain de sable*

Figure IV.1 Modèle rhéologique de Voigt (V)

Figure IV.2. Modèle rhéologique de Reuss (R)

Figure IV.3. Modèle rhéologique de Voigt / Reuss (VR)

Figure IV.4. Modèle rhéologique de Reuss / Voigt (RV)

Figure IV.5 . Inclusions simple, bi-composite et tri-composite

Figure IV.6 . Modèle à 3 inclusions sphériques simples

Figure V.1 . Structure du modèle à incluions tri-composite

Figure V.2 . Représentation du VER

Figure V.3 : Représentation des inclusions dans le cylindre de béton léger.

Figure V.4 : Confrontation des valeurs de résistance : Théoriques- expérimentales Figure V.5 . Modèle en série de conduction thermique

Figure V.6 . Modèle parallèle de conduction thermique

## **Liste des Tableaux**

Tableau I.1. Caractéristiques physiques du polypropylène (pp).

Tableau II.1 : Caractéristiques physiques du Polypropylène

Tableau II-2 : Caractéristiques physiques des granulats

Tableau II.3 : Caractéristiques physiques du ciment.

Tableau II.4: Résultats de l'analyse granulométrique du sable (0-3)

Tableau II.5: Résultats de l'analyse granulométrique du gravier (3-8)

Tableau II.6 : résultats de l'analyse granulométrique du gravier (8-15)

Tableau II-7 : Pourcentage des granulats naturels.

Tableau II.8 : Volume des granulats naturels

Tableau II-9 : Dosage pour 1m<sup>3</sup> de béton léger témoin.

Tableau II.10 : Quantités pour 3 éprouvettes de béton témoin.

Tableau II.11 : Quantités de matériaux pour béton léger avec 10% de billes de polypropylène non enrobées.

Tableau II.12 : Quantités de matériaux pour béton léger avec 20% de billes de polypropylène non enrobées.

Tableau II.13 : Quantités de matériaux pour béton léger avec 30% de billes de polypropylène non enrobées.

Tableau II.14: Quantités de matériaux pour béton léger avec 40% de billes de Polypropylène non enrobées.

Tableau II.15: Quantités des matériaux pour béton léger avec 50% de billes de polypropylène non enrobées.

Tableau II.16 : Quantités des matériaux pour béton léger avec 30% de granulats composites

Tableau II-17 : Quantités des matériaux pour béton léger avec 40% de granulats composites

Tableau II.18 : Quantités des matériaux pour béton léger avec 50% de granulats composites

Tableau II.19. Quantités pour 3 éprouvettes identiques de chaque variante

Tableau III.1. Caractéristiques mécaniques (béton ordinaire)

Tableau III.2. Résultat de l'essai sur éprouvette humide de béton composite avec 20% de billes de polypropylène non enrobées ;  $F_{max} = 190,8 \text{ KN}$  ;  $\sigma_{max} = 10,80 \text{ MPa}$

Tableau.III.3. Résultat de l'essai sur éprouvette humide de béton composite avec 30% de billes de polypropylène non enrobées ;  $F_{max} = 256,2 \text{ KN}$  ;  $\sigma_{max} = 14,5$

Tableau.III.4. Résultat de l'essai sur éprouvette humide de béton composite avec 40% de billes de polypropylène non enrobées ;  $F_{max} = 186,9 \text{ KN}$  ;  $\sigma_{max} = 10,58 \text{ MPa}$

Tableau.III.5. Résultat de l'essai sur éprouvette humide de béton composite avec 50% de billes de polypropylène non enrobées ;  $F_{\max} = 153,8 \text{ KN}$  ;  $\sigma_{\max} = 8,70 \text{ MPa}$

Tableau.III.6. Résultat de l'essai sur éprouvette de béton composite sèche avec 30% de billes de polypropylène non enrobées ;  $F_{\max} = 312,9 \text{ KN}$  ;  $\sigma_{\max} = 17,71 \text{ MPa}$

Tableau.III.7. Résultats des essais sur éprouvettes de béton composite avec 30% de billes de polypropylène enrobées de poussière de marbre.

Tableau.III.8. Résultats des essais sur éprouvettes de béton composite avec 30% de billes de polypropylène enrobées de poussière de marbre et de poudre de marbre.

Tableau.III.9. Résultats des essais sur éprouvettes de béton composite avec 30% de billes de polypropylène enrobées de poudre de céramique.

Tableau.III.10. Résultats des essais sur éprouvettes de béton composite avec 40% de billes de polypropylène enrobées.

Tableau.III.11. Résultats des essais sur éprouvettes de béton composite avec 50% de billes de polypropylène enrobées.

Figure III.12. Contraintes maximales de compression uni axiale pour éprouvettes humides et sèches à base de billes non enrobées.

Tableau V.1. Résultats de calcul

Tableau V.2. Valeurs considérées

## Nomenclature

$F$  : effort de compression uni axial en [KN]

$F_{\max}$  : effort de compression uni axial maximal à la rupture en [KN]

$\sigma_{\max}$  : contrainte de compression maximale à la rupture en [MPa]

$\Delta L$  : déplacement longitudinal en [ $\mu\text{m}$ ]

$\lambda$  : Conductivité thermique du matériau (w/m.K)

$T$  : Champ de température ( K )

$\Delta T$  : déplacement transversal en [ $\mu\text{m}$ ]

$P$  : Terme source (w/m<sup>3</sup>)

$C$  : Chaleur massique du solide ( J/Kg.K)

$U$  : Champ de vitesse du solide (m/s)

## Résumé

Cette étude répondant aux exigences du développement durable, consiste à élaborer, caractériser et modéliser un béton composite, obtenu par substitution d'une fraction appropriée, de granulats naturels par des granulats composites nouveaux, élaborés en enrobant des billes de polypropylène avec de la poudre de marbre ou de céramique, issues de la récupération, par un coulis de chaux, pour annihiler le phénomène de remontée de la bille non enrobée, dû à l'absence d'adhérence du polypropylène dans la matrice béton. Le granulat composite ainsi obtenu a fait l'objet d'une modélisation mathématique par la technique d'homogénéisation auto cohérente pour la détermination de ses caractéristiques mécaniques, ainsi que de la conductivité thermique. Le béton composite a fait l'objet d'une caractérisation mécanique qui a permis d'évaluer ses caractéristiques mécaniques et de les comparer au béton ordinaire. Deux nouveaux modèles semi-analytiques sont proposés dans cette étude pour calculer les résistances du granulat composite et du béton composite.

**Mots clés :** béton léger, polypropylène enrobé, granulat, technique, expérimental, homogénéisation, thermique, analyse, modèle.

## Abstract:

This study meeting the requirements of the sustainable development, consists in developing, in characterizing and in modeling a composite concrete obtained, by substitution of an appropriate fraction, natural aggregates by new composite aggregates elaborate by coating balls of polypropylene with some powder of marble or ceramic, stemming from the recycling) by a lime, in order to annul the phenomenon of rise of the not coated ball, in the absence of adhesion of the polypropylene in the matrix concrete. The composite aggregate so obtained was the object of a mathematical modeling by the technique of homogenization auto coherent for the determination of its mechanical characteristics, as well as the thermal conductivity. The composite concrete was the object of a mechanical characterization which allowed to estimate its mechanical characteristics and to compare them with the ordinary concrete. Two new semi-analytical models are proposed in this study to calculate the resistances of the composite aggregate and the composite concrete.

**Key words :** lightweight, polypropylene coated, aggregate, technique, experiments, homogenization, thermal, analyze, model.

## Introduction Générale

La recherche actuelle dans le domaine des matériaux de construction est orientée vers les granulats légers naturels ou artificiels pour assurer d'une part, la pérennité des granulats naturels conventionnels et l'allègement de certains éléments de construction et d'autre part, une économie d'énergie par la réduction de la conductivité thermique. En effet, le gain de poids, qui peut être plus ou moins important selon le type de béton, entraîne une diminution des sections des éléments structurels assurant la transmission des charges et conduit à des économies de transport des éléments manufacturés et à des gains de productivité à la mise en œuvre.

Une des voies d'allègement et d'amélioration du pouvoir d'isolation envisageables pour le béton est le remplacement d'une fraction des granulats habituels, qui constituent environ les 3/4 de la masse du béton, par des granulats plus légers, naturels ou artificiels.

L'objet de notre travail est de réaliser, caractériser et modéliser un béton léger composite, obtenu en substituant une fraction optimale des granulats naturels par des granulats artificiels. L'utilisation de billes de polypropylène confère aux éprouvettes de béton une structure bi couches due à une remontée des billes de polypropylène, ce qui nous a conduit à proposer leur enrobage avec une couche de poudre de marbre ou de céramique, issues de la récupération, par un coulis de chaux et aboutir ainsi à l'élaboration d'un nouveau granulats composite, qui annihile l'effet de remontée des billes, constaté lors de la vibration des éprouvettes de béton à billes de polypropylène et assure l'homogénéité du béton composite. .

Le travail est réparti sur cinq chapitres :

Dans le premier chapitre sont présentés les travaux intéressant les bétons légers et l'état actuel des connaissances dans le domaine ainsi que notre travail antérieur publié aux annales du bâtiment et portant sur le béton léger à base de sciure de bois.

Le second chapitre est consacré à la procédure d'essai qui consiste à présenter les caractéristiques des matériaux utilisés, l'analyse granulométrique, la technique d'enrobage des billes de polypropylène ainsi que la confection des éprouvettes de béton témoin, de béton comportant des billes de polypropylène non enrobées à l'état humide et sec avec 20,30 ,40 et50% de substitution des granulats naturels par des billes de polypropylène, de béton comportant des billes de polypropylène enrobées de poudre de marbre avec 30 ,40 et50% de substitution et de béton léger avec billes de polypropylène enrobées de poudre de céramique avec 30 ,40 et50% de substitution. Sont également présentés les essais auxquels seront soumises les éprouvettes et le matériel utilisé.

Le troisième chapitre est dédié à la présentation, la discussion et l'interprétation des résultats des différents essais réalisés (compression uni axiale des éprouvettes et analyse microstructurale d'un faciès de rupture). La caractérisation du comportement mécanique a été effectuée par approche expérimentale au niveau du laboratoire pédagogique béton du département de génie civil de l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

Dans le quatrième chapitre, les techniques d'homogénéisation qui assimilent un matériau hétérogène à un matériau homogène fictif équivalent, ainsi que les principaux modèles utilisés sont présentés. L'homogénéisation auto-cohérente qui permet d'accéder directement à une estimation des grandeurs mécaniques du matériau hétérogène est largement développée.

Le cinquième chapitre est consacré à la modélisation du comportement mécanique du granulat composite élaboré, en utilisant le modèle à inclusions développé au chapitre précédent et la modélisation thermique par le calcul de la conductivité thermique du granulat composite.

Deux nouveaux modèles semi analytique permettant de calculer les résistances du granulat composite et du béton composite sont présentés.

La conclusion permet enfin, de récapituler les principaux résultats obtenus lors de l'élaboration, les résultats des essais, ainsi que les solutions et modèles analytiques proposés pour décrire les comportements mécanique et thermique du granulat composite et du béton composite.

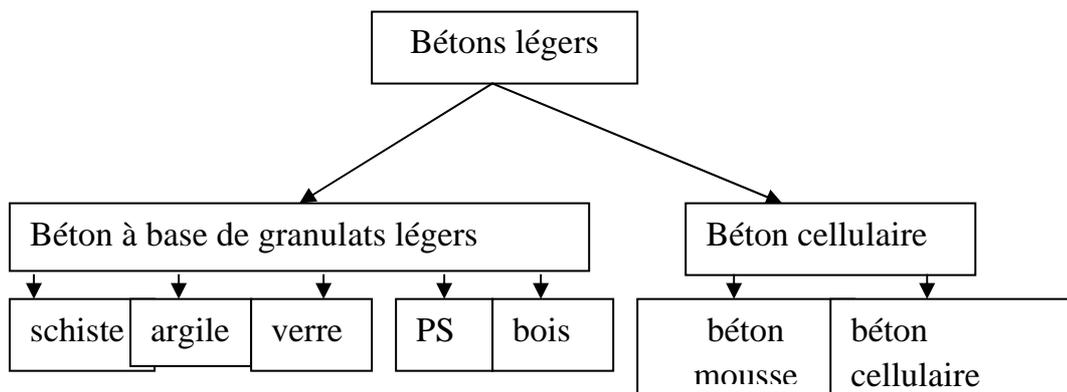
**CHAPITRE : I**  
**SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

## I.1. Introduction

La recherche actuelle dans le domaine des matériaux de construction est orientée vers les granulats légers naturels ou artificiels pour assurer d'une part, la pérennité des granulats naturels conventionnels et l'allègement de certains éléments de construction et d'autre part, une économie d'énergie par la réduction de la conductivité thermique. On retrouve ainsi, le verre expansé [ Tasserie 1991 ] [1], le polystyrène [ Vénuat 1983 ] [2] ou encore les granulats de bois [ Ouadi 1991 ] [3].

## I.2. Bétons légers.

La classification des bétons légers proposée par Lafarge « bétons-granulats légers » est représentée par la figure I.1.:



**Figure I.1** Classification des bétons légers

## I.3. Granulats légers.

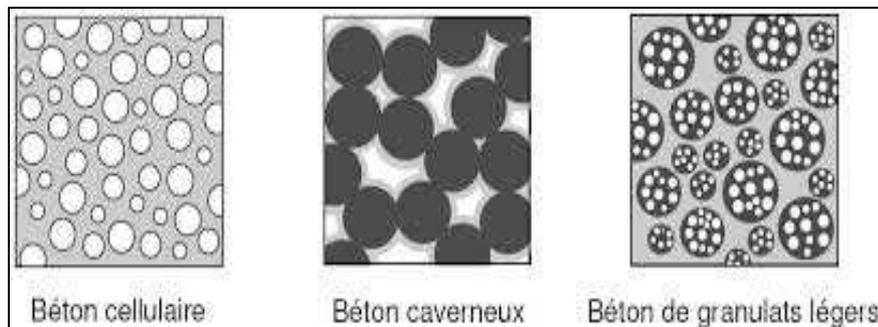
Les bétons de granulats légers sont généralement classés suivant l'origine du granulat utilisé, ainsi on distingue 04 types :

- Les granulats légers naturels : la ponce ou la pouzzolane, matériaux volcaniques naturels de structures très poreuse.

- Les granulats légers ayant subi un traitement thermique : granulats d'argile, de schiste, d'ardoise ou de perlite expansée.
- Les granulats légers de matériaux artificiels : le mâchefer, sous produit de la combustion de charbon ou des ordures ménagères.
- Les granulats légers de matériaux artificiels ayant subi des traitements spéciaux : granulats de nombreux déchets industriels, comme le laitier de haut fourneau que l'on peut expander.

### I.3. 1. Porosité et densité des bétons et granulats légers

On diminue la masse volumique du béton en remplaçant une certaine quantité de matériau solide par de l'air. Les trois endroits possibles pour incorporer de l'air dans le béton sont : dans la matrice (béton cellulaire), entre les gros granulats (béton caverneux ou sans fines, c'ad sans sable) et dans les granulats (bétons de granulats légers). La figure I.2 illustre ces trois types de béton [Short et Kinniburgh, lightweigh concrete, CR books, 1968] [4] .



**Figure I.2.** Représentation schématique des différents types de béton léger, d'après short et kinniburgh

Les granulats allégés par expansion ou frittage, très utilisés dans de nombreux pays comme l'URSS ou les USA, aussi bien dans la France ; ils ont des caractéristiques de résistance, d'isolation et de poids très intéressantes. Les plus usuels sont l'argile ou le schiste expansé (norme NF P18-309) et le laitier expansé (NF P18-307) ; d'une masse

volumique variable entre 400 et 800 kg/m<sup>3</sup> selon le type et la granularité, ils permettent de réaliser aussi bien des bétons de structure que des bétons présentant une bonne isolation thermique. Un gain de poids intéressant puisque les bétons réalisés ont une masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m<sup>3</sup>.

Les granulats très légers sont d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé). Très légers de masse volumique variable entre 20 et 100 kg/m<sup>3</sup> ; ils permettent de réaliser des bétons de 300 à 600 kg/m<sup>3</sup> ; on voit donc leur intérêt pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers : blocs coffrant, blocs de remplissage, dalles ou rechargement sur planchers peu résistants.

### **I.3. 2. Fabrication des granulats légers.**

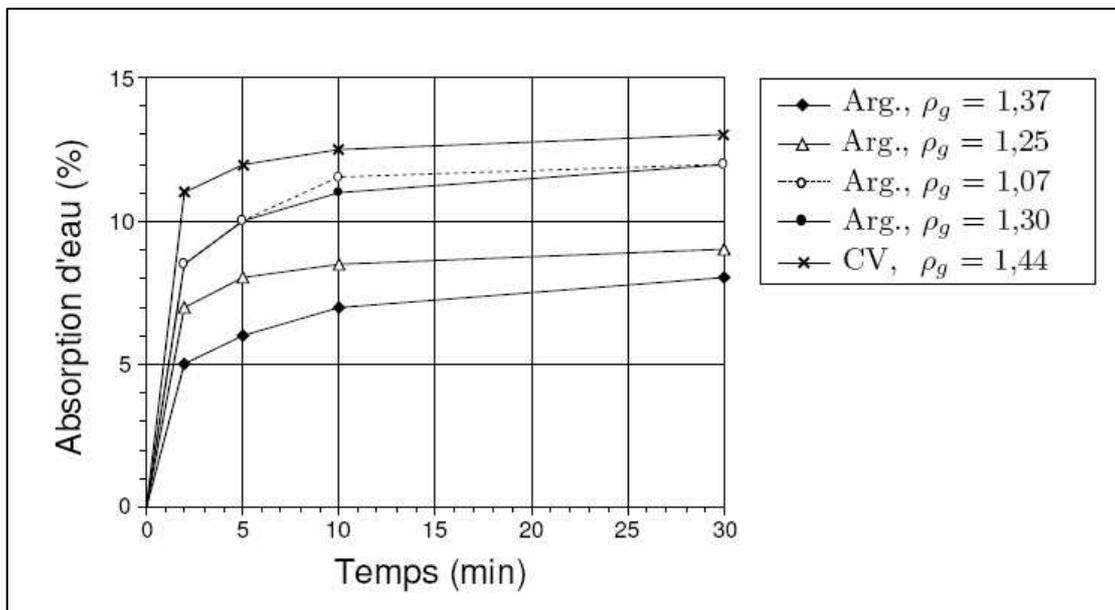
Les procédés de fabrication usuels des granulats légers artificiels à base de matières premières naturelles (argile, schiste, ardoise) ou de sous produits industriels (laitiers, cendres volantes) ; sont l'expansion en four rotatif ou la cuisson sur grilles [Arnould et Virlogeux, granulats et bétons légers, 1986, presses de l'école nationale des ponts et chaussées] [5]. L'expansion est alors générée par la formation d'un gaz à l'intérieur du matériau en fusion (entre 1000 et 1300°C) ; la structure poreuse est alors conservée par le refroidissement rapide du matériau. Ces granulats peuvent être obtenus par le concassage des masses expansées ou par préformage avant l'expansion (moulage et déchiquetage de l'argile, pulvérisation des schistes et de l'ardoise, frittage des cendres volantes). Le moulage et le frittage permettent d'obtenir des granulats de forme sphérique (granulat bouleté ou roulé). Le laitier liquide à 1450°C est fabriqué sans opération de concassage ni préformage ; il est alors projeté dans l'atmosphère au moyen d'un tambour rotatif tandis que des jets d'eau assurent l'expansion des particules en fusion [Malhotra 1989] [6].

Ces granulats manufacturés sont à l'heure actuelle les meilleurs granulats pour la fabrication des bétons légers de structure. On préfère toutefois les granulats roulés aux granulats concassés car leur forme arrondie et leur plus faible absorption d'eau

améliorent les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons légers [Ke , Beaucour ,Ortola , Dumontet, Cabrillac, 2009, comportement mécanique des bétons de granulats légers] [7][8][9].

### I.3. 3. Absorption d'eau des granulats légers :

Les granulats légers sont caractérisés par une très grande porosité (entre 25 et 75% du volume apparent). La taille et la distribution des pores influencent la résistance des granulats, mais déterminent surtout leurs propriétés d'absorption (taux d'absorption et absorption totale). Les données de la littérature montrent que le taux d'absorption d'eau des granulats légers artificiels est très élevé, plus de 50% de l'absorption dès les toutes premières minutes [Zhang & Gjorv ;1990] [10] voir figure I.3 ci-dessous.



**Figure I.3.** Absorption d'eau en fonction du temps des granulats d'argile expansés (Arg) et de cendres volantes frittées (Cv), granulats 4/8 mm, densité apparente  $\rho_g$  ; d'après Zhang & Gjorv.

Par ailleurs, la porosité des granulats légers varie proportionnellement à la taille des grains. Par conséquent, plus la taille des granulats diminue, moins ils sont poreux et plus leur densité apparente augmente. Les cendres volantes frittées, sont les plus absorbantes comparativement à l'argile expansée ; étant donné l'interconnexion plus élevée entre les pores. Le problème qui se pose lorsqu'on fabrique un béton avec des granulats légers est qu'une quantité importante d'eau de gâchage peut être absorbée

par les granulats légers. L'effet sur l'ensemble du matériau peut se traduire par une perte rapide de maniabilité [Arnould et Virlogeux 1986] [5]. Certains moyens tel que le pré mouillage ou l'utilisation d'un traitement de surface visant à réduire l'absorption d'eau des granulats s'avèrent très efficaces pour diminuer la perte de maniabilité des bétons légers [Bederina, Marmoret, Mezreb ,Khenfer, Bali et Quéneudec ; béton bois 2007] [11].

Différents travaux ont été mené pour régler ce problème d'absorption d'eau des granulats légers ; voir la possibilité technique d'introduire des granulats caoutchouteux dans le béton ou bien des polymères, comme le polystyrène expansé ; grâce à leur forme, les perles de polystyrène expansé n'absorbent presque pas l'eau de gâchage ; mais en raison de leur poids très léger et de leur surface hydrophobe, le béton de polystyrène expansé est prédisposé à la ségrégation lors de la mise en coffrage du béton ; une méthode de pré mélange semblable à la technique « enveloppant sable » a été étudiée par [ Bing Chen et Juanyu Liu 2004] [12] ; cette recherche a montré qu'en remplaçant partiellement des granulats ordinaires par les perles de polystyrène expansé, on aboutit à un béton léger de masse volumique comprise entre 800 et 1800 kg/m<sup>3</sup> et une force de compression variant de 10 à 25 MPa.

D'autres recherches dans le domaine des nouveaux matériaux de construction ont montré que l'introduction de particules de caoutchouc issues de l'industrie de récupération (déchetage des tubes inutilisables en PVC) réduit l'absorption d'eau du composite [Benazzouk, Douzane, Langlet, Mezreb, Roucoult Laidoudi et Queneudec 2007et 2008] [13] [14].

#### **I.4. Nouveaux granulats.**

Beaucoup d'auteurs ont travaillé sur un nouveau matériau ou granulat composite issu de la récupération des déchets ; qu'est la granulation de caoutchouc tirée des pneus usés et jetés dans des chantiers de dépôt illégaux [Paki Turgut et Bulent Yesilata ; 2008] [15]. L'utilisation potentielle de ce type de béton à base de miettes de pneus usés, s'avère très intéressante en termes de gain de poids et d'économie d'énergie. Le

gain de poids entraîne une diminution des sections des éléments structurels assurant la transmission des charges. La diminution de poids conduit à des économies de transport des éléments manufacturés et à des gains de productivité à la mise en œuvre.

Plusieurs applications constructives ont été proposées par [Merino, Astorqui et Cortina ; 2007] [16] sur ce type de béton caoutchouteux, par exemple : la fabrication des briques composites servant de cloisons légères et isolantes ; l'utilisation du béton caoutchouteux pour la forme de pente des terrasses inaccessibles minimise les dommages causés par l'action de gel-dégel ; donc ces particules de caoutchouc limitent les fissures dans le béton ; il est aussi utilisé pour les dalles flottantes comme obstacle pour les remontées capillaires. Ces granulats en caoutchouc sont particulièrement employés pour la fabrication d'agglomérés, pour les bétons banchés non porteurs ou faiblement chargés comme (le dallage de couvertures, revêtements de façades et de plafonds, corniches de ponts.....etc.) et pour des bétons isolants. D'autre part, l'utilisation des fibres végétales, organiques ou minérales dans les bétons légers intéressent beaucoup de chercheurs dans le domaine des matériaux composites.

#### **I.4. 1. Le béton bois :**

La sciure de bois issue des produits de récupération constitue un élément d'importance croissante dans l'exécution des projets de construction car le bois est une source renouvelable et inépuisable. Le béton bois est un matériau composite, généralement composé d'une matrice cimentaire et des charges végétales de formes granulaires, et qui peut être adjuvanté [Benmalek, Bouguerra, Ledhem, Dheilley et Queneudec ; 1999] [17]. Ces différents chercheurs ont étudié les caractéristiques physiques mécaniques et thermiques des bétons légers à base de sciures de bois. Dans le même contexte, d'autres auteurs ont travaillé sur l'influence du pourcentage de la sciure du bois sur les performances du béton composite à base de bois [Al Rim, Ledhem, Douzane, Dheilley et Queneudec ; 1999] [18].

La sciure de bois contient des matières qui nuisent à la prise du béton ; différents traitements sont alors appliqués pour éliminer les risques d'agressions biologiques du

bois dus aux champignons lignivores et aux insectes xylophages et neutraliser les effets négatifs de la cellulose sur la prise du ciment, car la proportion de la cellulose dans les divers bois feuillus et résineux est de 40 à 45% [Bederina, Laidoudi, Goullieux, Khenfer, Bali et Queneudec ; 2009] [19]. Avant de pouvoir servir à la fabrication du béton léger à base de sciure de bois, cette dernière doit être pré-trempée pour éliminer toute matière soluble comme les sèves végétales.

Cependant, les bétons légers à base de granulats de bois, présentent des inconvénients tels que le risque de ségrégation, la sensibilité à l'eau, la faible résistance au feu et la mauvaise durabilité.

Plusieurs solutions ont été proposées, comme l'utilisation d'une matrice argileuse [Houssais, Benmalek, Ledhem et Queneudec 2000] [20], ou bien envelopper la sciure de bois par un matériau qui ne brûle pas mais qui goûte « le polypropylène » [AIT TAHAR et BOUAZIZ ; Août 2010 ; Annales du BTP] [21].

Notre étude a consisté à élaborer un nouveau type de granulats artificiels à base de mélange copeaux - sciure de bois et du polypropylène, qui sont destinés à la confection d'un béton léger. Une étude expérimentale a été menée dans le but de comparer le comportement mécanique et physique de deux types de bétons composites obtenus, par la substitution en volume apparent équivalent, de la fraction granulaire 3-8 pour le béton de type BCI et par la substitution des deux fractions 3-8 et 8-15 pour le béton de type BCII, avec un béton léger témoin à base de granulats ordinaires.

Le mélange copeaux - sciure de bois issu de l'industrie de récupération à utiliser pour la confection du béton léger, provient des différentes essences de bois (résineux ou feuillu). Les copeaux et la sciure de bois que nous avons récupéré (déchets de menuiseries) proviennent de sciage, rabotage et usinage de troncs de bois de différentes essences généralement (pin, épicéa, sapin...). Les mélanges copeaux - sciure de bois présentent des dimensions variées.

Les granulats composites produits à base de mélange copeaux - sciure de bois et de polypropylène sont assimilables à des granulats spéciaux de bonne résistance à la traction.

D'une manière générale, l'incorporation de granulats composites produits à base de copeaux - sciure et de polypropylène dans une matrice cimentaire transforme totalement le comportement mécanique, créant ainsi un nouveau matériau dont la rupture peut être qualifiée de ductile.

Le mélange copeaux – sciure de bois et le polypropylène sont illustrés par la figure I.4.



**Figure I.4.** Sciure de bois et billes de polypropylène

Le polypropylène appartient à la famille des matériaux thermoplastiques. Parmi les caractéristiques et les propriétés, on peut citer : rigidité et dureté élevées (conserve sa rigidité jusqu'à plus de 100°C), poids spécifique faible, résistance à l'abrasion et aux agents chimiques remarquables.

Le polypropylène utilisé nous a été livré par l'entreprise de production d'emballages souples « Tizi Plast » de Thala Athmane(Tizi-Ouzou) dans un sac de 25kg sous forme granulée (couleur :transparent) ,de marque Basell Polyoléfinés ;ses caractéristiques physiques sont données par le tableau I.1.

**Tableau I.1.** Caractéristiques physiques du polypropylène (pp).

PPC <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	$\rho_{\text{absolue}}$ (gr/ml)	T° fusion (°C)	Absorption d'humidité (%)	Retrait (%)
	0.90-0.91	168-169	0	1 à 2.5

La figure I.5 illustre les grains composites élaborés.



**Figure I.5.** Grains composites artificiels

### **I.5. Renforcement du béton léger par les fibres :**

Les fibres de polypropylène réduisent l'effritement du béton exposé au feu ; l'une des théories les plus répandues à ce propos veut qu'en fondant à température relativement basse de 170°C, les fibres de polypropylène créent des canaux permettant à la pression de vapeur de s'échapper du béton empêchant ainsi les petites explosions qui provoquent l'éclatement ou l'effritement du béton [Kodur ; 1999] [22]. Les fibres de polypropylène augmentent nettement la ténacité du béton mais ont peu d'effet sur sa résistance en traction [Beaudoin, béton renforcé de fibres] [23] ; elles améliorent nettement les caractéristiques du béton à savoir la prévention de l'apparition des fissures dans le béton, la diminution de la porosité et la perméabilité du béton , augmentation de la ductilité, amélioration de la résistance à l'impact, décoffrage plus rapide suite à une cohésion améliorée, augmentation de l'étanchéité et amélioration de

la résistance gel-dégel du béton. Les fibres noyées dans le béton permettent d'arrêter le développement de la fissuration.

Parmi les fibres les plus utilisées, citons les fibres d'acier utilisées par beaucoup de chercheurs pour améliorer les caractéristiques mécaniques du béton léger [Bing Chen et Juanyu Liu ; 2008] [24] ; les fibres de verres aussi sont très utilisées dans le béton léger [Tassew et Lubell ; 2014] [25] pour améliorer la ténacité et la résistance à la flexion du béton.

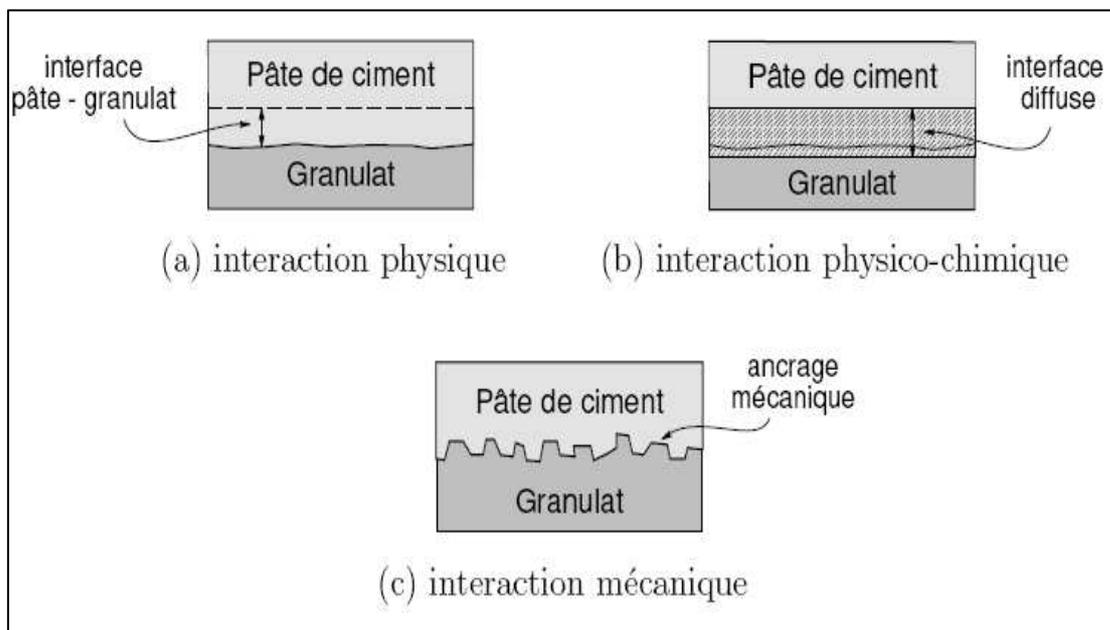
Les innovations constructives, qui font souvent appel à de nouveaux matériaux, ont rendu les bétons renforcés de fibres très populaires ; ainsi la possibilité d'améliorer la résistance à la traction et aux chocs ; la réduction du poids du composite et la diminution de l'épaisseur des éléments porteurs et non-porteurs du béton. Il faudra donc s'en remettre à l'expérience et au jugement des fabricants de fibres. Il incombe donc aux concepteurs de connaître les limites que présentent certains matériaux composites, particulièrement leur durabilité.

#### **I.6. Formulation des bétons légers :**

A l'exception des granulats légers, les constituants et les méthodes de formulation utilisées sont les mêmes que pour les bétons de granulats rigides. Une attention très particulière est portée à la densité apparente et à l'absorption de l'eau des granulats légers. Les dosages en ciment et en eau sont généralement déterminés en fonction de la résistance à la compression du béton et de l'affaissement spécifiés. Grâce aux adjuvants modernes, le rapport eau/ciment peut maintenant se situer entre 0.25 et 0.5 contrairement aux rapports supérieurs à 0.5 traditionnellement utilisés pour contrer l'absorption des granulats. Le choix des granulats a par ailleurs un effet important sur les propriétés du béton. Le degré de saturation initial des granulats légers doit être déterminé par essai d'absorption et être pris en considération pour déterminer la quantité d'eau de gâchage du béton léger. Les granulats fins peuvent être du sable léger ou du sable naturel. Le sable léger a toutefois le désavantage d'être absorbant et on l'associe plutôt aux bétons légers de résistance modérée, qui ne sont pas des bétons de structures [Arnould et Virlogeux ; granulats et bétons légers][5].

### I.6. 1. Adhérence pâte-granulats légers :

La qualité des interfaces pâte-granulats légers est généralement supérieure à celle des bétons de granulats rigides. Des mécanismes d'interaction physico-chimique et mécanique ont été identifiés par [Zhang et Gjorv] [26] voir figure I.6 ci-dessous ; la pâte de ciment peut venir se loger entre les rugosités et les pores à la surface des granulats légers. Cet ancrage mécanique qui améliore l'adhérence des granulats à la matrice cimentaire, dépend de la texture des granulats, de la taille des grains et de la viscosité de la matrice.



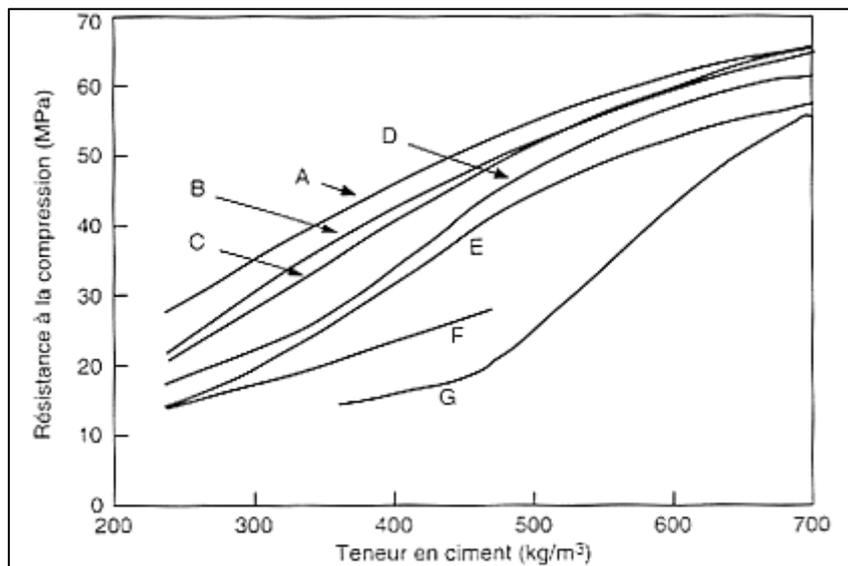
**Figure I.6.** Interface pâte-granulats et mécanismes d'interaction identifiés, d'après Zhang & Gjorv

### I.6. 2. Durcissement du béton léger.

Lors du durcissement et selon la chaleur dégagée par l'hydratation du ciment, les bétons légers peuvent être soumis à une plus forte augmentation de température que les bétons de granulats rigides. De plus, étant donné leur meilleure capacité d'isolation, cette élévation peut s'étendre sur une plus longue période et par conséquent favoriser les gradients thermiques.

### I.6. 3. Propriétés mécaniques des bétons légers :

Les différentes propriétés des granulats légers et des bétons légers ont été largement étudiées par plusieurs chercheurs. La principale distinction des bétons de granulats légers par rapport aux bétons de granulats rigides est la plus faible masse volumique qui diminue à la fois le module élastique et la résistance du béton. Bien que l'on observe un plafond de résistance ; des bétons légers à haute performance d'une résistance en compression supérieure à 60 MPa pour une masse volumique inférieure à 1900 kg/m<sup>3</sup> ont été réalisés. Les mécanismes qui permettent d'expliquer un tel niveau de performance ne sont pas encore bien expliqués. On peut citer la relation entre la résistance mécanique à la compression du béton et le dosage en ciment [Lydon ; 1982] [27] pour différents bétons légers voir figure I.7 ci-dessous.



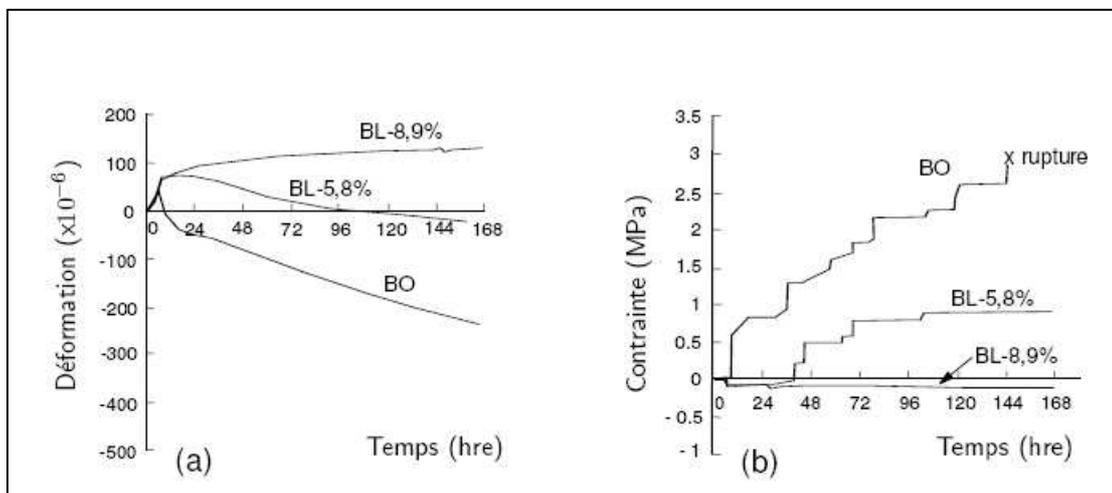
**Figure I.7.** Relation entre la résistance à la compression du béton à 28 jours (mesurée sur cubes) et le dosage en ciment des bétons ayant un affaissement de (5cm) et confectionnés avec différents types de granulats légers. *A cendres volantes frittées+granulat fin ordinaire, B laitier du haut fourneau+granulat fin ordinaire, C cendres volantes frittées, D schiste fritté, E ardoise expansée, F argile expansé+sable, G laitier expansé ;[Lydon, 1982]*

Les bétons de granulats légers sont des matériaux constitués de granulats flexibles noyés dans une matrice plus ou moins rigide et continue ( $E_g < E_m$ ). Leur comportement mécanique est alors intimement lié à la différence de module élastique entre ces deux phases mais également à leurs proportions volumiques respectives.

#### I.6. 4. Retrait :

Les bétons légers présentent pour la plupart, un retrait plus important que les bétons traditionnels et également plus tardif, car l'eau absorbée par les granulats légers se trouve progressivement restituée par la matrice, retardant ainsi la déshydratation du mortier, cause principale du retrait. Le retrait est évalué en valeur finale selon le dosage en ciment, en eau et la nature des granulats légers utilisés.

La figure I.8 reproduit quelques résultats de [Bentur & Coll] [28] sur l'efficacité des granulats légers à prévenir les dommages dus au retrait endogène en comparant la déformation d'un béton ordinaire et de deux bétons saturés et partiellement saturés.



**Figure I.8.** Retrait endogène en fonction du temps : *déformation libres (a) et contraintes induites par le retrait empêché (b) ; bétons légers avec granulats saturés (BL-8,9%) et partiellement saturés (BL-5,8%) ; bétons de granulats rigides (BO) ; [Bentur & Coll].*

Le retrait endogène est une diminution de volume de la pâte liante provoquée par son assèchement interne du fait de la consommation de l'eau pour l'hydratation ; on dit aussi retrait d'auto-dessiccation ou retrait d'hydratation

### **I.6. 5. Isolation**

Une des propriétés intéressante des bétons de granulats légers est leur pouvoir d'isolation thermique dû aux nombreuses bulles d'air interposées dans l'épaisseur du béton. Le béton parfaitement sec est plus isolant que le béton humide. Ces bétons légers constituent aussi de bons isolants phoniques.

La corrélation entre la masse et le coefficient de conductivité thermique se traduit par des performances en matière d'isolation thermique, d'autant plus sensible que la densité diminue [ Nguyen, Beaucour, Ortola, Noumowé ;2011] [29].

Grâce à leur conductivité thermique et à leur coefficient de dilatation plus faibles, les bétons légers présentent une résistance au feu meilleure que celle des bétons courants, à condition que les granulats soient d'origine minérale.

La structure cellulaire des bétons légers leur assure une bonne imperméabilité à l'eau, tout en favorisant les échanges de vapeur, ce sont aussi des matériaux résistant au gel.

## **I.7. Conclusion**

Cette synthèse bibliographique a permis d'une part de situer l'état actuel de la recherche dans le domaine des matériaux composites utilisés dans la construction et la mise en évidence du recours aux produits issus de la récupération des déchets ; d'autre part situer notre travail de recherche sur l'élaboration de nouveaux granulats légers composites artificiels.

En effet, cette nouvelle technique qui consiste à élaborer des granulats légers composites a connue un essor considérable mais néanmoins demeure un vaste domaine d'investigation de la part la multitude des déchets susceptibles d'être recyclés.

Au terme de cette étude bibliographique susceptible d'être enrichie, nous confirmons l'originalité de notre travail consistant à caractériser et modéliser les paramètres physico-hygro-mécaniques d'un béton léger à base de granulats composites et ce par un choix judicieux des différents matériaux constituant le granulat, par la mise en œuvre d'une nouvelle technique de réalisation de ces granulats et la pertinence de la technique de modélisation adoptée.

**CHAPITRE : II**  
**ELABORATION DES GRANULATS**  
**COMPOSITES ET PROCEDURE**  
**D'ESSAIS**

## **II.1. Introduction :**

Le gain de poids, qui peut être plus ou moins important selon le type de béton, entraîne une diminution des sections des éléments structurels assurant la transmission des charges. La diminution de poids conduit à des économies de transport des éléments manufacturés et à des gains de productivité à la mise en œuvre.

Une des propriétés intéressantes des bétons de granulats légers est leur pouvoir d'isolation thermique dû aux nombreuses bulles d'air interposées dans l'épaisseur du béton, le béton parfaitement sec se trouve plus isolant que le béton humide. Ces bétons légers constituent aussi de bons isolants phoniques.

Les résultats expérimentaux de différents chercheurs ont montré la possibilité technique de concevoir des bétons de bois légers possédant des performances mécaniques intéressantes sans consommation importante d'énergie qui peuvent être utilisés pour la fabrication des couvertures en voile mince ainsi que de éléments préfabriqués. Une des voies d'allégement envisageables pour le béton est le remplacement des granulats habituels, qui constituent environ les 3/4 de la masse du béton, par des granulats plus légers, naturels ou artificiels.

Ce chapitre est consacré essentiellement à la présentation, de la technique d'élaboration du nouveau granulats composite , ainsi que la confection, des éprouvettes cylindriques, de béton témoin, de béton comportant des billes de polypropylène non enrobées à l'état humide et sec avec 20,30 ,40 et50% de substitution des granulats naturels par des billes de polypropylène, de béton comportant des billes de polypropylène enrobées de poudre de marbre avec 30 ,40 et50% de substitution et de béton léger avec billes de polypropylène enrobées de poudre de céramique avec 30 ,40 et50% de substitution.

Les caractéristiques des matériaux utilisés sont présentées de manière détaillée ainsi que l'analyse granulométrique.

Les principaux essais auxquels seront soumis les éprouvettes ainsi que le matériel utilisé sont également présentés.

## II.2. Matériaux utilisés :

### a- Les fines :

Les fines poudres que nous avons récupérées (déchets de marbriers) proviennent de sciage et usinage de panneaux de marbres et céramiques.

### b- Polypropylène PP :

Nous avons utilisé du polypropylène qui nous a été livré par l'entreprise de production et reproduction d'emballages souples « TIZI PLAST » de Thala Athmane(Tizi-Ouzou) dans un sac de 25Kg sous forme granulée ( fig II-1) ,de marque BASELL polyoléfines dont les caractéristiques physiques sont données par le tableau II-1.



**Figure II-1** : Billes de polypropylène

**Tableau II.1** : Caractéristiques physiques du Polypropylène

	Masse volumique absolue (g/ml)	Masse volumique apparente (g/ml)	Température de fusion	Absorption d'humidité (%)	Retrait (%)
PP (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )	0.90-0.91		168-169	0	1 à 2.5

## II.3. Procédure d'élaboration des billes de polypropylène enrobées

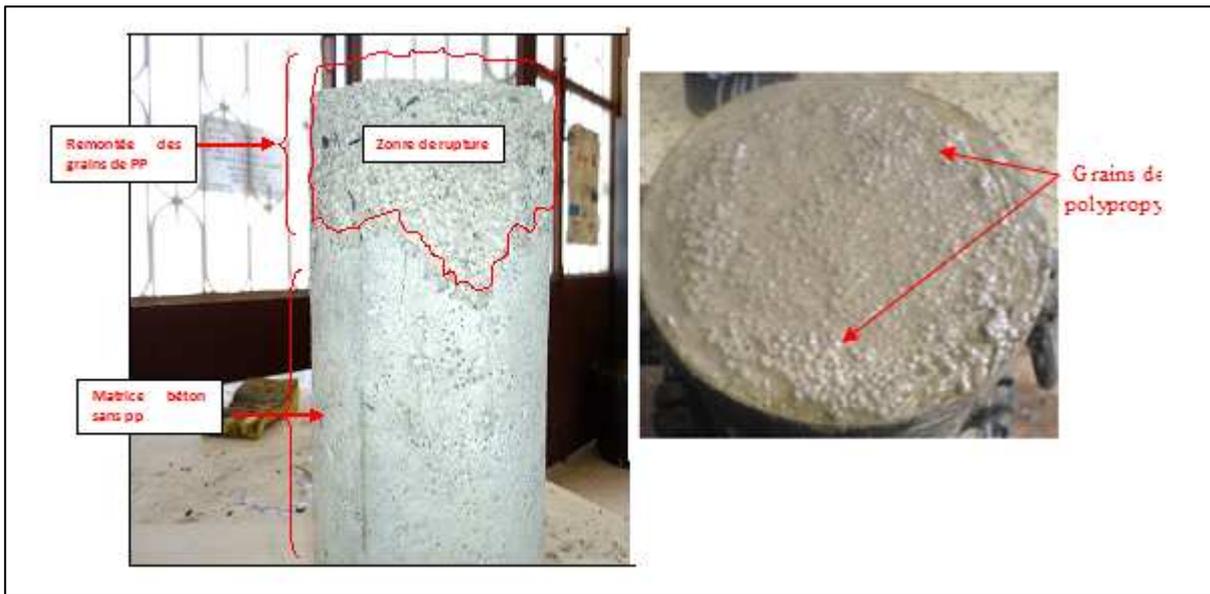
La première approche est de tenter d'enrober les billes de polypropylène avec une très fine couche d'huile de vidange qui en séchant puisse se transformer en colle puis rouler

les billes sur les fines poudres de marbre et céramique, après un temps de séchage nous avons constaté que la coquille se détache facilement de la bille de polypropylène. Problème d'adhérence entre la bille et l'enveloppe extérieure.

Dans une seconde approche, nous avons opté pour un coulis de ciment qui a servi de colle entre la bille et la poudre, après un temps de prise, nous avons remarqué que la coquille d'enrobage de la bille peut s'effriter facilement avec un petit effort de compression sur la bille.

Dans une troisième approche, les billes sont introduites dans un coulis de chaux à travers un filet (imprégnation), puis nous avons roulé les billes sur des fines poudres de marbre et céramique, après un très petit temps de prise (durcissement à l'air libre) nous avons constaté que la coquille d'enrobage s'adhère remarquablement sur les billes de polypropylène.

La figure II.2, illustre les différentes étapes à réaliser pour les étapes d'élaboration des billes de polypropylène enrobées de fines couches de céramique ou/et de marbre.



**Figure II.10.** Phénomène de remontée des billes polypropylène non enrobées.

La figure II.10 met en évidence le phénomène de remontée des billes non enrobées à la partie supérieure de l'éprouvette, phénomène non observé pour les éprouvettes avec billes enrobées (Figure II.9).

















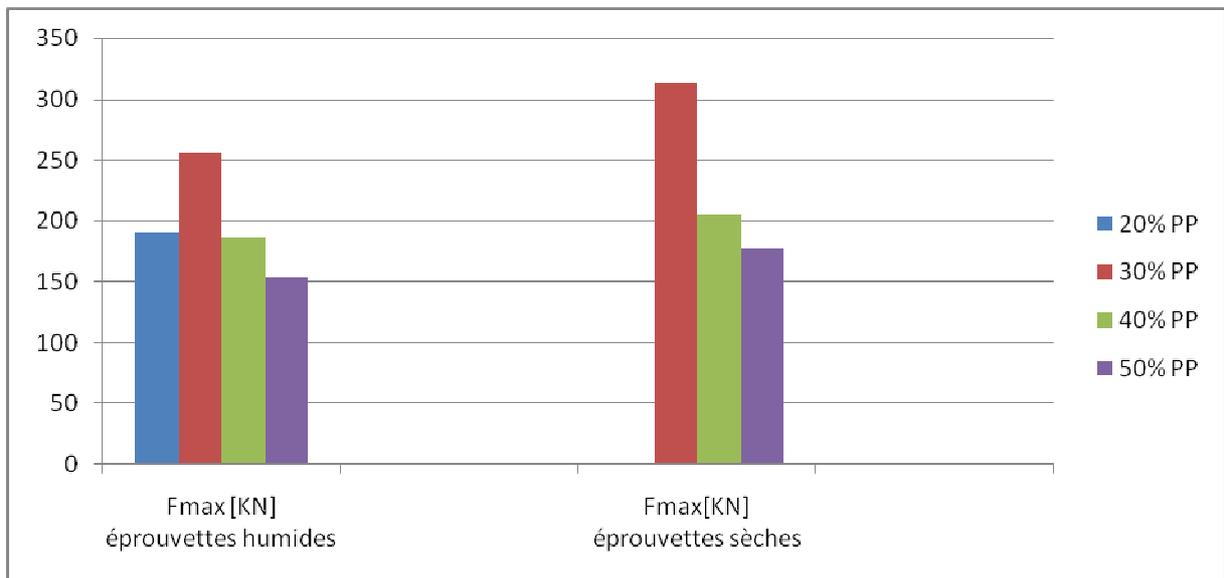


# Chapitre III.....Présentation des résultats et discussion

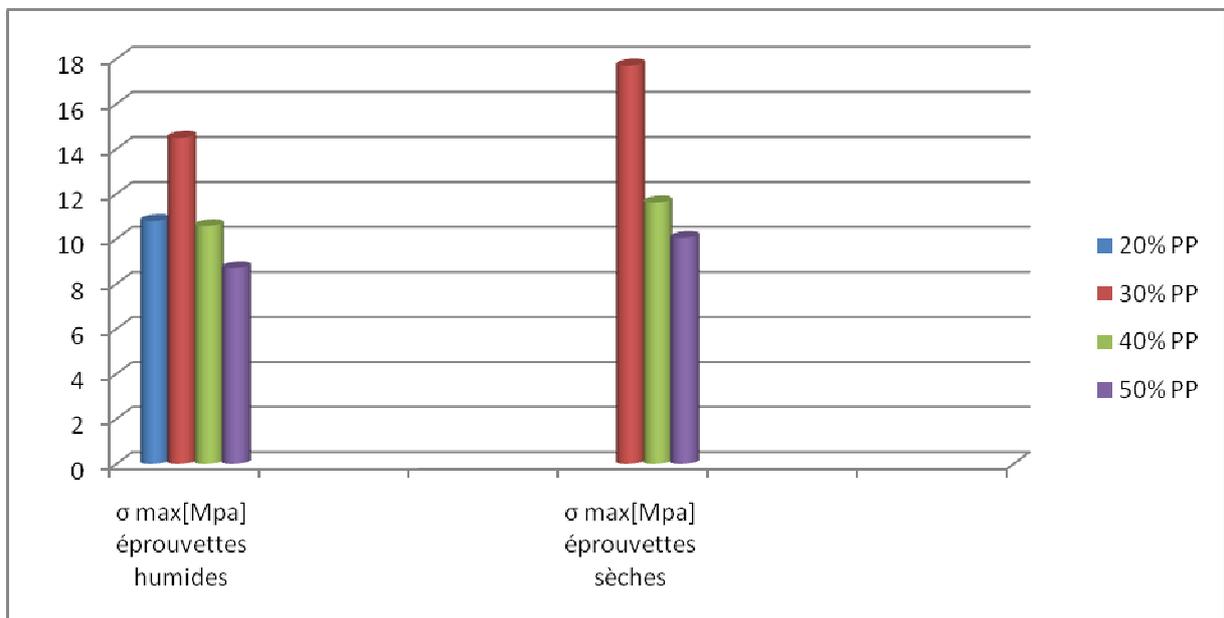
### **III.1. Introduction :**

Dans ce chapitre, on présente les différents essais réalisés ainsi que les résultats obtenus pour les différentes éprouvettes décrites au chapitre précédent.

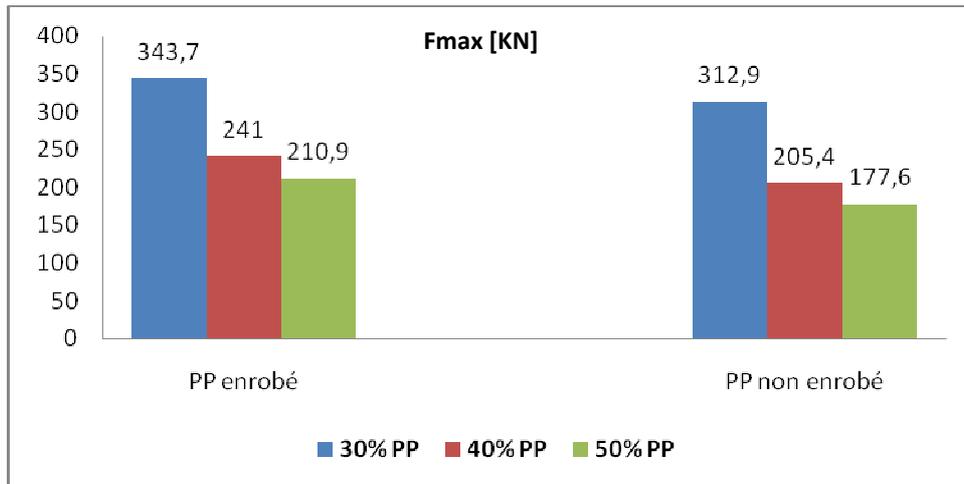
La caractérisation du comportement mécanique a été effectuée par approche expérimentale au niveau du laboratoire pédagogique béton du département de génie civil de l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou. Les résultats des essais sont présentés sous forme de tableaux et de courbes.



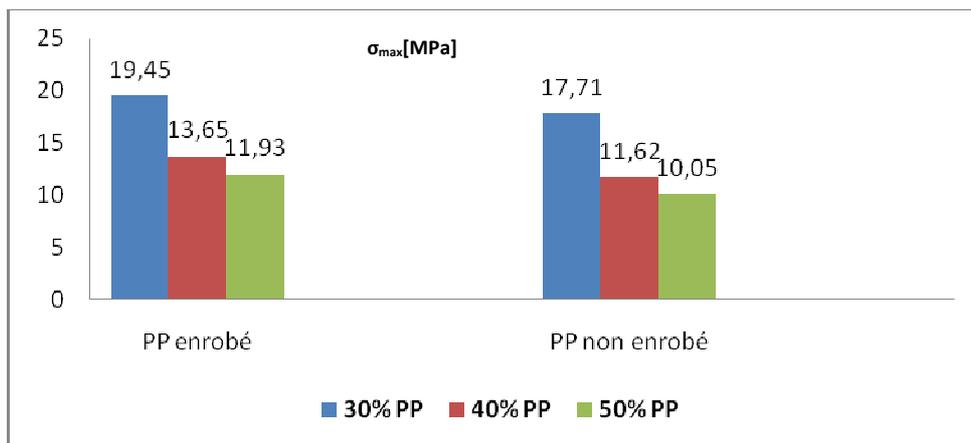
**Figure III.10.** Résultats des efforts maximaux de compression uniaxiale pour éprouvettes humides et sèches à base de billes non enrobées.



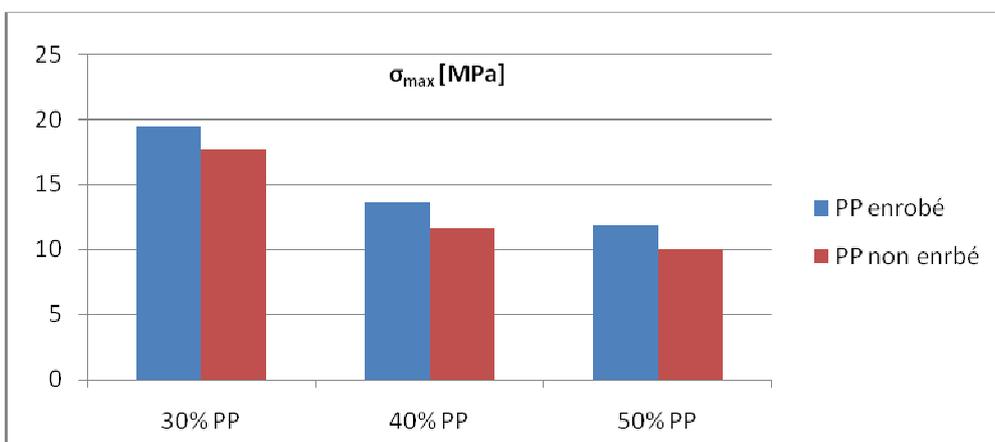
**Figure III.11.** Résultats des contraintes maximales de compression uniaxiale pour éprouvettes humides et sèches à base de billes non enrobées.



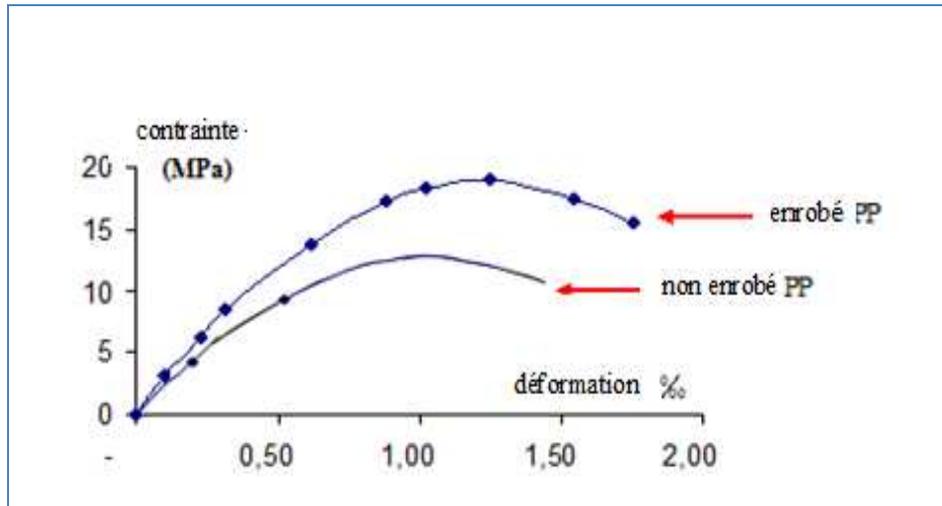
**Figure III.16.** Résultats des efforts maximaux de compression uniaxiale pour éprouvettes sèches à base de billes de polypropylène enrobées et non enrobées.



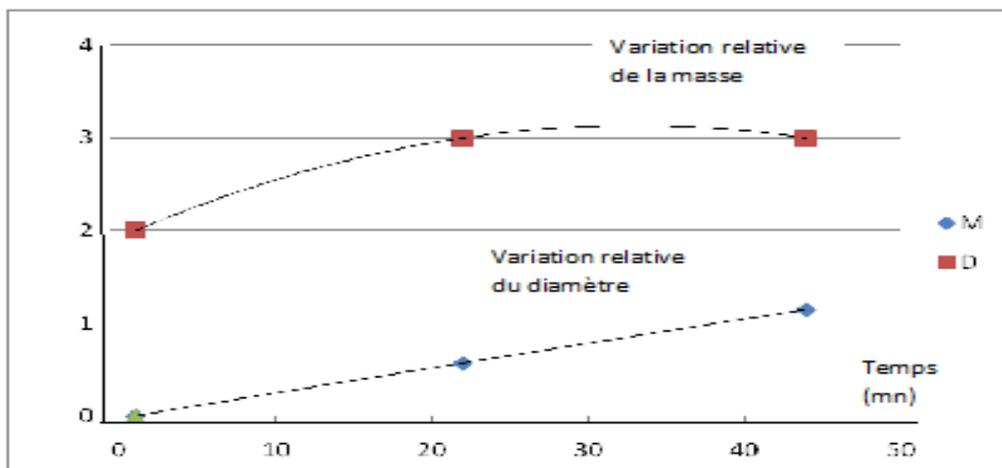
**Figure III.17.** Résultats des contraintes maximales de compression uniaxiale pour éprouvettes sèches à base de billes de polypropylène enrobées et non enrobées.



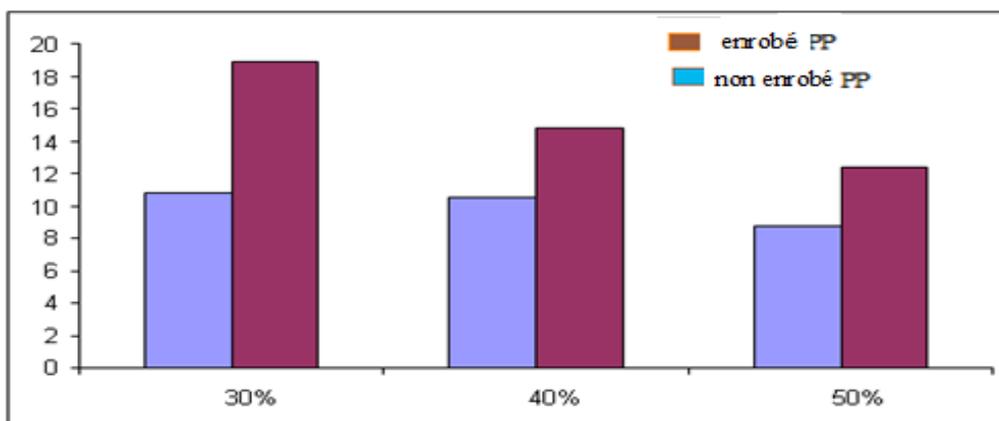
**Figure III.18.** Histogramme de comparaison des contraintes maximales de compression uniaxiale pour éprouvettes sèches à base de billes de polypropylène enrobées et non enrobées.



**Figure III.19.** Courbe de contrainte – déformation pour les cylindres en béton léger ; [Bouaziz .s & Ait tahar .k] [32]: a) billes enrobées, b) billes non enrobées



**Figure III.20.** Variation dimensionnelle des éprouvettes en fonction de la température



**Figure III.21.** Variation de la valeur de la contrainte en fonction du % de billes de polypropylène pour les deux approches.[32]

### III.3.5. Interprétation des résultats

Il est clair que l'enduit des billes de polypropylène par la poudre de céramique ou de marbre permet d'obtenir un béton léger homogène dont la résistance en compression est meilleure comparée au béton léger lorsque les billes sont introduites directement dans la matrice béton. Pour une teneur de 30%, 40% et 50% de granulats légers en billes de polypropylène enrobées d'une enveloppe de céramique, on augmente les résistances respectivement de 74.6%, de 41.14 et de 41.7% par rapport aux résistances obtenues en écrasant des éprouvettes identiques mais les billes ne sont pas enrobées.

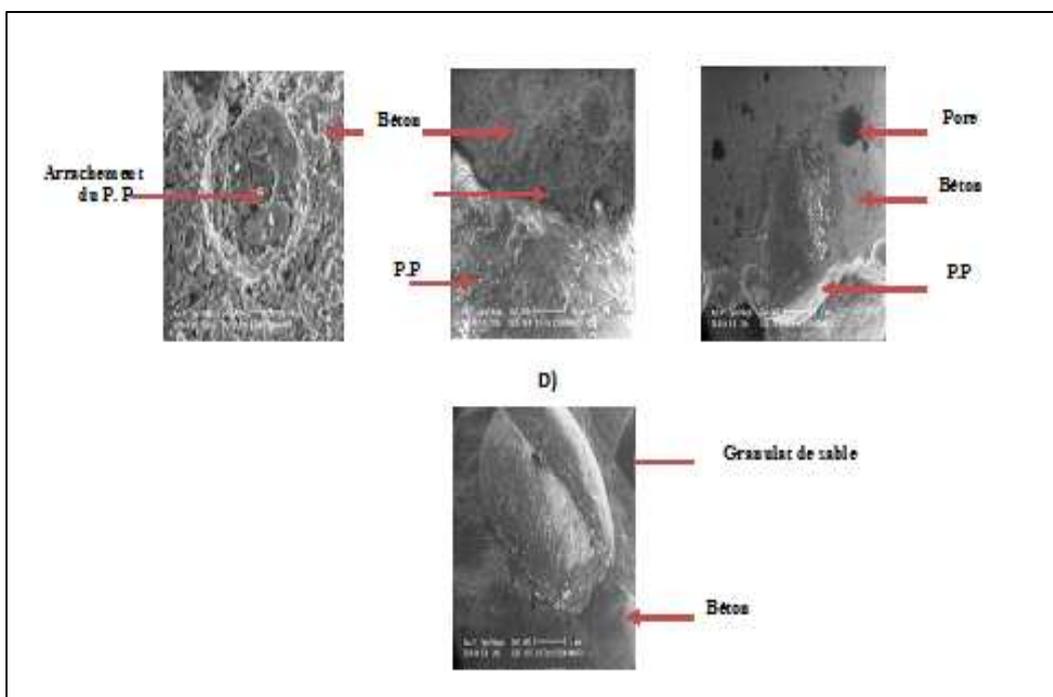
- L'élaboration de granulats légers artificiels à base de polypropylène enrobée par des fines de marbre ou de céramique permet sans aucun doute de substituer les granulats naturels, d'où un impact environnemental très conséquent.
- Une technique de mécanisation du procédé d'élaboration en série peut être mise en place aisément, avec un rendement approprié,
- Les essais mécaniques réalisés sur les différentes séries de béton composite ; montrent que le pourcentage de substitution des granulats naturels par des granulats artificiels à base de polypropylène enrobés et non enrobés de fines a un effet important sur les propriétés mécaniques du béton élaboré, l'analyse des résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

- La chute de la résistance à la rupture en compression uni axiale est respectivement pour le béton léger à base de grains en polypropylène enrobés et non enrobés est de l'ordre de 32,80% 36,27 pour le béton composite avec 30% de billes de polypropylène enrobées, de 52,54% et 58,24 avec 40% et de 59% et 63,82 avec 50% par rapport au béton ordinaire.

- Le remplacement des granulats ordinaires par des granulats légers artificiels, permet de réduire la masse volumique. La variation de cette masse volumique des bétons légers composites avec billes de polypropylène par rapport au béton témoin est de l'ordre de 16% .
- A cause de la rugosité superficielle des granulats composites à base de polypropylène enrobés de fines de marbre ou de céramique ; une meilleure adhérence à l'interface Pâte / granulats est obtenue, ce qui permet de réduire la micro fissuration et d'améliorer le comportement hygrométrique

### III.4. Analyse microstructurale

Les résultats de l'analyse microstructurale par le biais d'un microscope électronique à balayage de type PHILIPS ESEMXL30 à filament de W sur des éprouvettes soumises à des essais de compression, prient en mode d'électrons secondaires (GSE) sont illustrés par la figure III.22



**Figure III.22.** Microstructure du béton léger, a)- arrachement, b) interface, c)- constituants, d) grain de sable

➤ **Interprétation des résultats :**

L'analyse des résultats permet d'observer que le béton apparaît sur les microstructures en couleur sombre par contre les billes de polypropylène apparaissent en couleur blanchâtre. On tient à signaler l'existence des pores avec une couleur très sombre dus probablement à l'inclusion de l'air lors du remplissage des éprouvettes, on révèle aussi l'interface entre le béton les billes du polypropylène de morphologie compact ce qui témoigne d'une bonne adhérence. La dernière micrographie révèle un grain de sable de morphologie elliptique fissuré sur le plan supérieure.













### **III.5. Conclusion du chapitre**

Le phénomène de migration des grains légers est totalement occulté dans les différents travaux antérieurs nonobstant les chutes de résistances dues à ce phénomène. A cet effet, l'enrobage des billes de polypropylène par une fine couche de poudre céramique ou de marbre permet de maintenir les grains répartis uniformément dans la matrice béton après la vibration, par conséquent la réponse mécanique est améliorée.

Cette étude a mis en évidence ce phénomène à travers l'analyse des différentes valeurs des résistances obtenues par écrasement des cylindres. En effet, pour la même teneur de substitution, on a remarqué que la résistance varie selon la nature de ces billes de polypropylène (enrobées ou non enrobées). Aussi, à travers l'étude de l'état de surface des éprouvettes, où l'on a observé que les billes non enrobées remontent vers la surface et on obtient des spécimens cylindriques en bicouche. D'où, le mode de rupture est largement affecté. Des chutes de résistances importantes sont observées lorsque la teneur, en billes de polypropylène non enrobées, augmente.

Enfin, cette technique permet d'autre part d'assurer l'homogénéité de la matrice béton et d'augmenter ainsi les résistances mécaniques.

Les résultats obtenus mettent en exergue les avantages de cette technique qui répondent aux exigences du développement durable.

Une étude expérimentale a été menée dans le but de comparer le comportement mécanique et physique de deux types de béton composites avec un béton léger témoin à base de granulats ordinaires.

Dans le chapitre suivant, les techniques d'homogénéisation seront développées afin de modéliser les comportements mécanique et thermique du granulat composite ainsi élaboré.

## **CHAPITRE IV**

# **TECHNIQUES ET MODELES D'HOMOGENEISATION**

#### **IV.1. Introduction :**

L'homogénéisation est une technique de modélisation qui assimile un matériau hétérogène à un matériau homogène fictif équivalent, dont on doit déterminer la caractéristique. Ce matériau homogène doit avoir le même comportement mécanique global, répondre aux mêmes conditions aux limites que le milieu hétérogène et respecter le principe de conservation de l'énergie entre le milieu hétérogène et le milieu homogénéisé. La mise en œuvre des techniques d'homogénéisation nécessite deux éléments [AURIAULT,91] [33], à savoir : un Volume Élémentaire Représentatif (VER) et le respect de la condition de séparation d'échelle.

Le VER est un motif élémentaire qui permet de reconstituer le matériau, lorsqu'on le duplique dans les trois directions de l'espace. Ce VER est choisi en fonction des informations disponibles sur la microstructure du matériau. La condition de séparation d'échelle permet de vérifier que la sollicitation (grandeur macroscopique) est grande devant la taille des constituants (grandeur macroscopique). Ainsi, le matériau hétérogène est vu comme un matériau homogène au niveau macroscopique. Diverses techniques d'homogénéisation existent.

L'homogénéisation périodique, basée sur une hypothèse de périodicité de la structure, permet de définir la loi de comportement suivie par le matériau au niveau macroscopique à partir des lois de comportement de chaque constituant. On détermine de manière exacte tous les coefficients de la loi, ainsi qu'un domaine de validité pour la modélisation. Toutefois, cette démarche nécessite des simulations numériques pour déterminer les paramètres macroscopiques.

L'homogénéisation auto-cohérente permet d'accéder directement à une estimation des grandeurs mécaniques du matériau hétérogène. L'hypothèse fondamentale est de considérer que le matériau au niveau macroscopique et les constituants suivent la même loi de comportement. Les calculs quasi-analytiques conduisent à exprimer les grandeurs macroscopiques comme une fonction explicite des caractéristiques de chaque constituant et de leurs concentrations volumiques.

Deux approches sont utilisées, par déformations ou par contraintes selon que l'on impose un champ de déplacement ou un champ de contraintes.

## IV.2 Approche en déformation

Soit  $V$  est le volume du VER,  $E$  est le tenseur de déformations homogène pris à l'échelle macroscopique, symétrique et imposé.  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  et  $u$  sont les champs locaux des contraintes, déformations et déplacement résultant à l'échelle microscopique.

Supposons que le comportement des différentes phases soit élastique linéaire et que ces phases sont parfaitement collées entre elles, les champs satisferont le problème dit cellulaire suivant :

$$\nabla \cdot \sigma(\mathbf{y}) = \mathbf{0} \quad \forall \mathbf{y} \in V \quad (\text{IV.1})$$

$$\sigma(\mathbf{y}) = \mathcal{C}(\mathbf{y}) : \varepsilon(\mathbf{y}) \quad \forall \mathbf{y} \in V \quad (\text{IV.2})$$

$$\varepsilon(\mathbf{y}) = \frac{1}{2} \{ \nabla u(\mathbf{y}) + [\nabla u(\mathbf{y})]^T \} \quad \forall \mathbf{y} \in V \quad (\text{IV.3})$$

$$[[u]] = [[\sigma \cdot n]] = \mathbf{0} \quad \text{sur } \Gamma \quad (\text{IV.4})$$

$$\langle \varepsilon(\mathbf{y}) \rangle = \frac{1}{|V|} \int_V \varepsilon(\mathbf{y}) d\mathbf{y} = E \quad (\text{IV.5})$$

$\mathcal{C}(\mathbf{y})$ : tenseur de rigidité des différentes phases du VER

$\nabla$  : représente le gradient : Cette notation est utilisée pour le produit doublement contracté entre le tenseur du 4ème ordre et le 2ème ordre.

$\Gamma$  : désigne l'interface entre les phases.

Le tenseur de rigidité  $\mathcal{C}(\mathbf{y})$  est dépendant de la déformation afin de symboliser le comportement non linéaire des différentes phases.

Le comportement homogénéisé peut être définie par la relation :

$$= \frac{1}{|V|} \int_V \sigma(y) dy = C^* : E = C^* : \langle \varepsilon(y) \rangle \quad (IV.6)$$

Avec :

$\sigma(y)$  et  $\varepsilon(y)$  : représentent les solutions du problème cellulaire.

**$C^*$  : désigne le tenseur homogénéisé de rigidité.**

Dans le cas où les différentes phases sont homogènes

$$\langle \sigma(y) \rangle = \langle C(y) : \varepsilon(y) \rangle = \sum_{k=1}^N C_k C^{(k)} : \varepsilon^{-(k)} \quad (IV.7)$$

N : représente le nombre de phases distinguées.

$C^{(k)}$  désigne le tenseur de rigidité de la phase k,  $\varepsilon^{(k)}$  est la déformation de la phase k

$C_k$  : indique la fraction volumique de la phase k et le symbole k est le volume occupé par la phase k. le tenseur de localisation  $A^{(k)}(y)$  définie dans chacune des phases k est donné par :

$$\varepsilon^{(k)}(y) = A^{(k)}(y) : E \quad (IV.8)$$

Ce qui implique que :

$$\langle \sigma(y) \rangle = \sum_{k=1}^N C_k C^{(k)} : \bar{A}^{(k)} : E = C^* : E \quad (IV.9)$$

Où

$$S^* = \sum_{k=1}^N C_k C^{(k)} : \bar{A}^{(k)} \quad (IV.10)$$

Le comportement équivalent  $C^*$  est obtenu par une résolution de l'équation (IV.5). La résolution peut se faire suivant plusieurs méthodes d'homogénéisation, qui se distingue en particulier dans le choix du volume représentatif de telle façon à imposer

le chargement. De ce fait, la méthode d'homogénéisation des modules effectifs consiste l'imposition des conditions aux limites sur le bord  $\partial V$  du volume.

$$\mathbf{u}(\mathbf{y}) = \mathbf{E} \cdot \mathbf{y}, \text{ sur } \mathbf{y} \in \partial \mathbf{y} \quad (\text{IV.11})$$

Pour les milieux périodiques, la méthode d'homogénéisation consiste à imposer des conditions de déformations périodiques, puis prendre une condition de base de la microstructure périodique comme VER. Le problème cellulaire devient alors un problème élastique, qui peut être résolu numériquement par la méthode des éléments finis ou analytiquement en simplifiant les hypothèses de la géométrie du VER et des phases.

Les comportements homogénéisés peuvent être effectués aussi par des approches énergétiques, établis sur des théorèmes énergétiques et de la construction des champs cinématiquement admissibles. Du fait, on peut conclure lors de la minimisation de l'énergie potentielle, que  $\mathbf{u}$  est la solution du problème (IV.2), (IV.4), (IV.11) vérifie [BOR] [34].

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{u} \in U_{ad} = \{ \mathbf{v}(\mathbf{y}) \text{ régulier sur } \mathbf{V} \text{ tels que } \mathbf{v}(\mathbf{y}) = \mathbf{E} \cdot \mathbf{y} \text{ sur } \partial \mathbf{y} \} \\ \langle \boldsymbol{\varepsilon}^T(\mathbf{u}) : \mathbf{C}(\mathbf{y}) : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) \rangle \leq \langle \boldsymbol{\varepsilon}^T(\mathbf{v}) : \mathbf{C}(\mathbf{y}) : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{v}) \rangle, \forall \mathbf{v} \in U_{ad} \end{array} \right. \quad (\text{IV.12})$$

Par ailleurs, on peut établir le résultat suivant :

$$\langle \boldsymbol{\varepsilon}^T(\mathbf{u}) : \mathbf{C}(\mathbf{y}) : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) \rangle = \langle \boldsymbol{\varepsilon}^T(\mathbf{u}) : \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}) \rangle = \langle \boldsymbol{\varepsilon}^T(\mathbf{u}) \rangle : \langle \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}) \rangle \quad (\text{IV.14})$$

Avec :  $\mathbf{u}$  = solution du problème d'homogénéisation

La définition d'un comportement homogénéisé, nous donne :

$$\mathbf{E}^T : \mathbf{C}^* : \mathbf{E} \leq \langle \boldsymbol{\varepsilon}^T(\mathbf{v}) : \mathbf{C}(\mathbf{y}) : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{v}) \rangle \quad (\text{IV.15})$$

En établissant des champs cinématiquement admissibles, on peut avoir une borne supérieure du tenseur de rigidité équivalente  $\mathbf{C}^*$ .

### II.3 Approche en contrainte

Le VER peut être soumis à un chargement en contraintes imposé, le problème cellulaire dual s'écrit :

$$\nabla \sigma(\mathbf{y}) = \mathbf{0} \quad \forall \mathbf{y} \in \mathcal{V} \quad (\text{IV.16})$$

$$\varepsilon(\mathbf{y}) = \mathcal{S}(\mathbf{y}) : \sigma(\mathbf{y}) \quad \forall \mathbf{y} \in \mathcal{V} \quad (\text{IV.17})$$

$$\varepsilon(\mathbf{y}) = \frac{1}{2} \{ \nabla u(\mathbf{y}) + [\nabla u(\mathbf{y})]^T \} \quad \forall \mathbf{y} \in \mathcal{V} \quad (\text{IV.18})$$

$$[[u]] = [[\sigma \cdot n]] = \mathbf{0} \quad \text{sur } \Gamma \quad (\text{IV.19})$$

$$\langle \sigma(\mathbf{y}) \rangle = \frac{1}{|\mathcal{V}|} \int_{\mathcal{V}} \sigma(\mathbf{y}) \, d\mathbf{y} = \Sigma \quad (\text{IV.20})$$

$\mathcal{S}(\mathbf{y})$ : tenseur de souplesse des différentes phases

$\Sigma$ : Chargement homogène et symétrique des contraintes imposées

Le comportement homogène équivalent peut s'écrire comme suit :

$$\langle \sigma(\mathbf{y}) \rangle = \frac{1}{|\mathcal{V}|} \int_{\mathcal{V}} \sigma(\mathbf{y}) \, d\mathbf{y} = \mathcal{S}^* : \Sigma = \mathcal{S}^* : \langle \sigma(\mathbf{y}) \rangle \quad (\text{IV.21})$$

$\mathcal{S}^*$  : tenseur de souplesse homogénéisé

$\sigma(\mathbf{y})$  et  $\varepsilon(\mathbf{y})$  : Solutions cellulaires des équations (VI.15) et (VI.19).

Pour N phases élastiques et homogènes, on aura

$$\langle \varepsilon(\mathbf{y}) \rangle = \mathcal{S}^* : \langle \sigma(\mathbf{y}) \rangle = \sum_{k=1}^N C_k \mathcal{S}^{(k)} : \bar{B}^{(k)} : \Sigma = \mathcal{S}^* : \Sigma \quad (\text{IV.22})$$

$B(\mathbf{y})$  : représente les tenseurs de concentration des différentes phases k , qui sont définis par :

$$\sigma^{(k)}(y) = B^{(k)}(y) : \Sigma$$

$\sigma^{(k)}(y)$  : tenseur des contraintes dans la phase k

Par linéarité on obtient aussi :

$$S^* = \sum_{k=1}^N C_k S^k : \bar{B}^{(k)}$$

(IV.23)

La méthode des modules effectifs en approche aux contraintes consiste à changer la condition (VI.20) en condition en efforts imposés sur les bords du VER, soit :

$$\sigma(y) \cdot n = \Sigma \cdot n \quad \forall y \in V \quad (IV.24)$$

Où n est la normale unitaire au bord du VER

Le problème à résoudre ainsi, est un problème cellulaire constitué des équations (IV.16) (IV.19) et (IV.24). Le comportement équivalent  $S^*$  peut être déduit de la définition (IV. 23). Le problème ainsi posé est un problème admettant une solution unique en contrainte et en déformation

On peut montrer pour l'approche en déformation, par le théorème de minimisation de l'énergie complémentaire, que  $\sigma$  est solution du problème pour (VI.16), (VI. 19), et (VI. 24).

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma \varepsilon = \sum_{ad} \tau(y) \end{array} \right. \quad (IV.25)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \langle \sigma^T : S(y) : \sigma \rangle \leq \langle \tau^T : S(y) : \tau \rangle \quad \forall \tau \in \Sigma_{ad} \end{array} \right. \quad (IV.26)$$

$$\langle \sigma^T(u) : S(y) : \sigma(u) \rangle = \langle \sigma(u) : \varepsilon(u) \rangle = \langle \sigma(u) \rangle : \langle \varepsilon(u) \rangle \quad (IV.27)$$

Nous avons :

$$\Sigma^T : S^* : \Sigma \leq \langle \tau^T : S(y) : \tau \rangle \quad \forall \tau \in \Sigma_{ad} \quad (IV.28)$$

En général, le comportement obtenu par l'approche en déformation n'est pas toujours l'inverse de celui obtenu par l'approche en contraintes. Ce qui nous amène à écrire :

$$C^* \neq (S^*)^{-1} \quad (IV.29)$$

#### VI.4 Comportement homogénéisé d'un composite biphasé

Les lois de comportement homogénéisé définie précédemment (approche en déformations, et approche en contraintes) peuvent être développées sous d'autres formes d'expressions applicables pour un matériau constitué de deux phases homogènes.

$$\langle \varepsilon \rangle = C_1 \bar{\varepsilon}^{(1)} + C_2 \bar{\varepsilon}^{(2)} \quad (IV.30)$$

$$\langle \sigma \rangle = C_1 \bar{\sigma}^{(1)} + C_2 \bar{\sigma}^{(2)} \quad (IV.31)$$

En injectant ces expressions dans la définition du comportement équivalent en rigidité (IV.7), on aura :

$$C^* = C^{(1)} + C_2 (C^{(2)} - C^{(1)}) : \bar{A}^{(2)} \quad (IV.32)$$

On constate que la seule inconnue dans l'expression précédente (IV.32) est la moyenne du tenseur de localisation sur la IIème phase  $A^{(2)} \cdot S_a$  ( solution qui s'obtient par la résolution du problème cellulaire (VI.4), (VI.11) et elle est fonction du choix établi sur le volume élémentaire représentatif.

En supposant que les comportements des phases sont isotropes, le tenseur de rigidité  $C^*$  est défini par les deux constantes élastiques, le module de Young équivalent  $E^*$  ainsi que le coefficient de Poisson équivalent  $\nu^*$ .

$$E = \frac{1}{3} \text{tr} \cdot E \cdot I + E^d \quad (\text{IV.33})$$

Avec

$$K^* \text{tr} E = K^{(1)} \text{tr} E + C_2 (K^{(2)} - K^{(1)}) \overline{\text{tr} \varepsilon^{(2)}} \quad (\text{IV.34})$$

$$\mu^* E^d = \mu^{(1)} E^d + C_2 (\mu^{(2)} - \mu^{(1)}) \overline{\varepsilon^{(2)d}} \quad (\text{IV.35})$$

En appliquant la linéarité du comportement homogénéisé par rapport au chargement  $E$  :

$$K^* = K^{(1)} + c_2 (K^{(2)} - K^{(1)}) \frac{\overline{\text{tr} \varepsilon^{(2)}}}{3} \quad (\text{IV.36})$$

$\varepsilon^{(2)}$ : Champ local induit par le chargement macroscopique hydrostatique unitaire

$E = I$  dans le système cartésien (x, y, z)

$$E = \begin{pmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{pmatrix} \quad (\text{IV.37})$$

et

$$\mu^* = \mu^{(1)} + C_2 (\mu^{(2)} - \mu^{(1)}) \overline{\varepsilon_{11}^{(2)d}} \quad (\text{IV.38})$$

$\varepsilon^d$ : Partie déviatorique du Champ local induit par le chargement macroscopique du cisaillement simple unitaire dans le système cartésien (x, y, z).

$$E = \begin{pmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & -I & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (IV.39)$$

$$E^* = 9K^* \frac{\mu^*}{\mu^* + 3K^*} \quad \text{et} \quad \nu^* = \frac{3K^* - 2\mu^*}{6K^* + 2\mu^*} \quad (IV.40)$$

Les relations définies précédemment avec une approche d'homogénéisation en déformations peuvent être écrite dans une approche en contraintes.

Le comportement équivalent en souplesse s'écrit :

$$S^* : \langle \sigma \rangle = S^{(1)} : \langle \sigma \rangle + c_2 (S^{(2)} - S^{(1)}) : \bar{\sigma}^{(2)} \quad (IV.41)$$

Où :

$$S^* = S^{(1)} + c_2 (S^{(2)} - S^{(1)}) : B^{(2)} \quad (IV.42)$$

Comme précédemment, la seule inconnue dans l'expression précédente 42 est la moyenne du tenseur de la IIème phase ( $\bar{B}^{(2)}$ ). Sa solution s'obtient par la résolution du problème cellulaire (IV.16),(IV.19),(IV.24) et elle dépend du choix établi sur le volume élémentaire représentatif.

En supposant que le comportement des phases, et le comportement homogénéisé sont isotropes, le comportement équivalent en souplesse, tenseur de rigidité  $C^*$  est entièrement défini par les deux constantes élastiques, le module de Young équivalent  $E^*$ , ainsi que le coefficient de Poisson équivalent  $\nu^*$ .

On peut définir deux chargements macroscopiques élémentaires dans le système cartésien (x, y, z) :

- Un chargement de type hydrostatique.

$$\Sigma = \langle \sigma \rangle = \begin{pmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{pmatrix} \quad (\text{IV.43})$$

Un chargement de type cisaillement :

$$\Sigma = \langle \sigma \rangle = \begin{pmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & -I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{pmatrix} \quad (\text{IV.44})$$

Le module de compressibilité homogénéisé  $K^*$  définie à partir de (II.41) est directement fournit par le premier chargement hydrostatique.

$$\frac{1}{K^*} = \frac{1}{K^{(1)}} + c_2 \left( \frac{1}{K^{(2)}} - \frac{1}{K^{(1)}} \right) \frac{\overline{\text{tr} \sigma^{(2)}}}{3} \quad (\text{IV.45})$$

$\sigma^{(2)}$  : désigne local induit dans la II phase par chargement macroscopique hydrostatique unitaire (IV.43).

$$\frac{1}{\mu^*} = \frac{1}{\mu^{(1)}} + c_2 \left( \frac{1}{\mu^{(2)}} - \frac{1}{\mu^{(1)}} \right) \overline{\sigma_{11}^{(2)\bar{d}}} \quad (\text{IV.46})$$

$\sigma^{\bar{d}}$  : représente la partie déviatorique du champ local induit par le chargement de cisaillement unitaire (IV.44).

***Chapitre V.***  
***Modélisation mécanique et***  
***thermique***

---

## **V.1 Introduction**

La modélisation mécanique est conduite dans une première étape en utilisant les modèles établis dans le chapitre précédent, par la technique d'homogénéisation cohérente, tenant compte de la géométrie sphérique du granulats composite.

Dans une seconde étape, un modèle semi analytique est proposé pour calculer la résistance du granulats et élargit par suite au béton composite.

La modélisation thermique du composite conduit à l'établissement de la relation de la conductivité thermique du granulats composite et est menée en résolvant l'équation de Laplace en coordonnées sphériques, régissant les transferts de chaleur tenant compte de certaines hypothèses simplificatrices.

La valeur de la conductivité thermique est calculée tenant compte des caractéristiques géométriques et des propriétés physiques du polypropylène et du marbre.

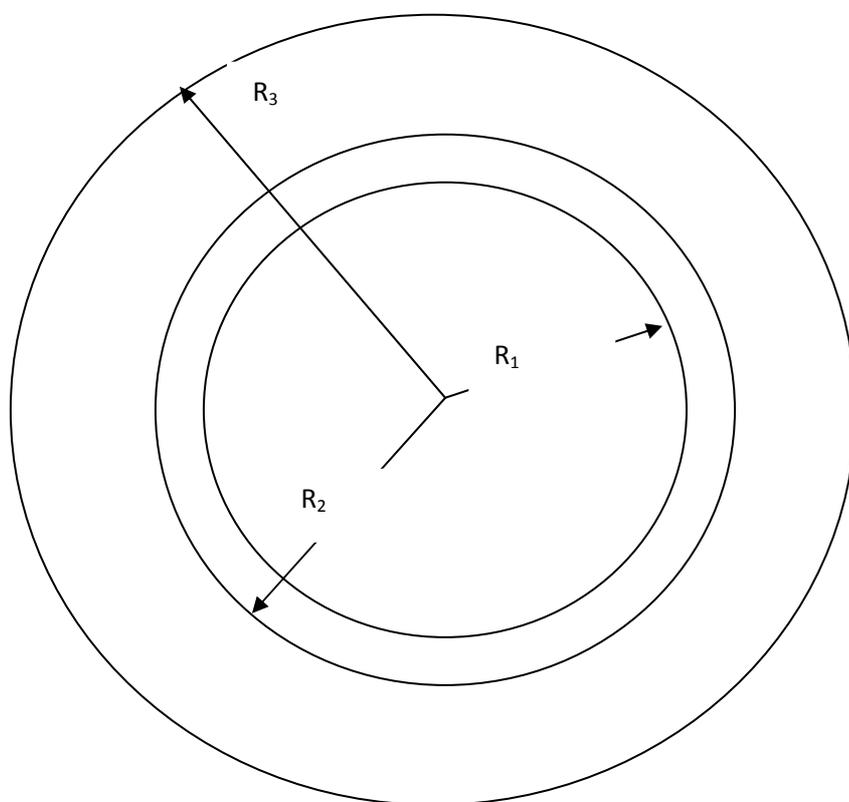
## **V.2. Modélisation mécanique du grain composite par homogénéisation auto cohérente**

Dans le cadre de cette étude, un motif élémentaire constitué de trois phases est utilisé.

La phase 1 correspond au polypropylène de paramètres  $(K_1, \mu_1, R_1)$ .

La phase 2 contient la fine couche de chaux utilisée comme liant de paramètre  $(K_2, \mu_2, R_2)$ .

La phase 3 est constituée de la couche d'enrobage soit la poudre de céramique ou celle du marbre de paramètres  $(K_3, \mu_3, R_3)$ .



**Figure V.1** . Structure du modèle à inclusions tri-composite

La résolution analytique est faite d'une manière similaire à celle employée dans le cadre d'inclusions bi-composite. On écrit la continuité et des déformations aux frontières entre les différents milieux est on obtient un système de 12 équations à 11, inconnues, qui n'a de solution que si le système est lié. On pose les conventions d'écriture suivantes :

$$N_i = 1 / (1-2v_i) \quad (\text{V.1})$$

$$N_{i-1} = 2v_i / (1-2v_i) \quad (\text{V.2})$$

$$3 N_{i-1} = 2(1+ v_i) / (1-2v_i) \quad (\text{V.3})$$

$$3 N_{i+2} = (5- 4 v_i) / (1-2v_i) \quad (\text{V.4})$$

$$5 N_{i+2} = (7- 4 v_i) / (1-2v_i) \quad (\text{V.5})$$

$$8 N_{i-1} = (7+2 v_i) / (1-2v_i) \quad (\text{V.6})$$

$$\lambda_i/\mu_i = 2v_i / (1-2v_i) = N_{i-1} \quad (\text{V.7})$$

$$\tau_{ij} = \mu_i / \mu_j \quad (\text{V.8})$$

$$\lambda_i/\mu_j = (N_{i-1}) \tau_{ij} \quad (\text{V.9})$$

$$\theta_1 = (R_1/R_2)^3 \quad (\text{V.10})$$

$$\theta_2 = (R_2/R_3)^3 \quad (\text{V.11})$$

$$\chi = \mu / \mu_3 \quad (\text{V.12})$$

On écrit le système sous la forme d'une matrice carrée de taille 12\*12, on obtient M (Fig .V.1) . Les lignes 1,2,5,6,9,10 de la matrice correspondent aux équations de continuité de déplacement en  $r = R_1 , R_2$  et  $R_3$ . Les autre équations correspondent à la continuité des contraintes en  $R_1 , R_2$  et  $R_3$ . La nullité du déterminant de M conduit à une équation du second degré en  $x$ , dont la résolution permet de déduire le coefficient de cisaillement  $\mu$  du milieu équivalent. A partir de  $\mu$  et de  $K$ , on déduit le module d'élasticité  $E$  du matériau homogénéisé.

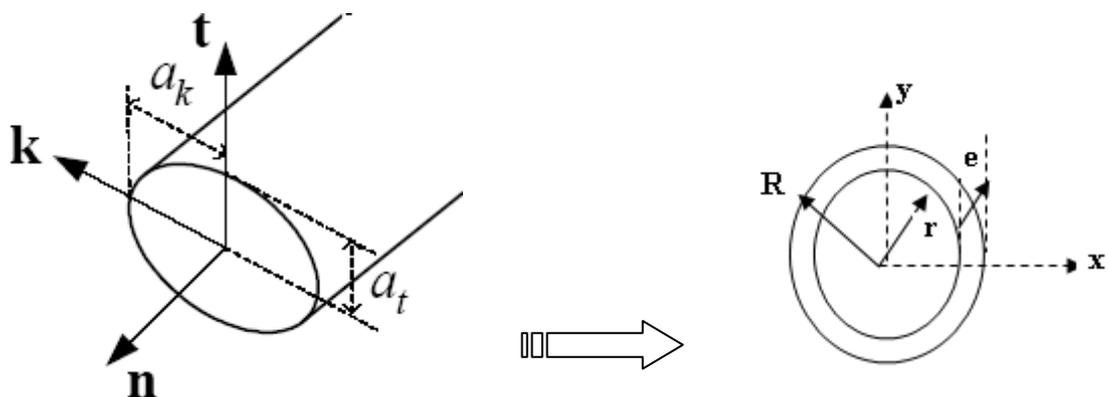
Le coefficient de compressibilité  $K$  se détermine simplement car le bi-composite constitué des milieux 1et 2 peut être remplacé par un milieu dont la compressibilité  $K_{12}$  est celle du bi-composite 12 homogénéisé, sans modifier le champ de contrainte élastique dans le matériau 3. Ce milieu de compressibilité  $K_{12}$  peut être homogénéisé avec le milieu 3 par un procédé itératif

$$K_{12} = K_2 + [ \theta_1(K_1-K_2) / [1+(1-\theta_1)(K_1 - K_2)/(K_2 - 4\mu_2/3)] ] \quad (\text{V.13})$$

$$K = K_3 + [ \theta_2(K_{12} - K_3) / [1+(1-\theta_2)(K_{12} - K_3)/(K_3 - 4\mu_3/3)] ] \quad (V.14)$$

### V.3.3. Présentation du modèle

On considère que le V.E.R. (de volume  $V$ ) du composite est un biphasé constitué d'une matrice homogène isotrope correspondant à la bille de polypropylène (phase m) et de charges homogènes (phase f). La démarche est à ce niveau strictement identique à celle du modèle de base, la seule modification se situant au niveau des propriétés de la matrice. Les fibres ne présentent pas au sein du composite une section parfaitement circulaire. On peut effectivement envisager qu'elles aient été plus ou moins écrasées lors du procédé de réalisation des billes de polypropylène dans la filière de production, ce qui leur confère finalement une forme beaucoup plus complexe et proche de la forme ellipsoïdale. Par mesure de simplification, on considère que le grain composé de bille de polypropylène renforcée par une enveloppe de céramique présente une forme circulaire, en effet, même si on considère que les grains composites ont des formes ellipsoïdales, l'erreur commise est négligeable étant donné les petites épaisseurs considérées .



**Figure V.2 .** Représentation du VER

Lors du comportement linéaire, l'adhérence entre les fibres de renfort et la matrice béton est parfaite, la résistance du grain composite est donnée par la relation suivante :

$$R_{GC} = R_m + R_f = \Psi \cdot \mu_m \cdot R_m + \varphi \cdot \mu_f \cdot R_f \quad (V.23)$$

Avec :

$R_f$  et  $R_m$ : représentent respectivement la résistance de l'enveloppe céramique et la résistance de la bille en polypropylène?

$\varphi$  ,  $\Psi$  : représentent le transfert de charges respectivement de l'enveloppe céramique et de la matrice ( bille de polypropylène), au stade linéaire, on a :  $\varphi = \Psi = 1$ .

## **V.6. Modélisation thermique**

### **V.6.1. Définition des différents modes de transferts thermiques :**

Selon l'énoncé de Clausius, la chaleur passe d'elle-même du corps ou milieu chaud vers le corps ou milieux froid. Il existe trois modes de transfert de chaleur

- La conduction qui a lieu dans un solide ou entre deux solides en contact et se traduit par des chocs moléculaires .
- La convection qui a lieu entre un solide et un fluide, lorsqu'il existe des différences de température entre les deux et qui se traduit par un mouvement du fluide , soit forcé, soit résultant de la différence de densité de ses différentes particules sous l'effet de la température. Selon l'origine du mouvement du fluide , la convection est dite naturelle ou forcée et dans la plupart des applications celle-ci est mixte.
- Le rayonnement qui ne nécessite aucun support matériel, du fait que la chaleur se transmet par ondes électromagnétique.

### **V.6.2. Modèles de Voigt et Reuss**

La quantité de chaleur traversant par conduction un corps quelconque de surface unitaire, sous une différence de température de 1°C pendant une seconde est appelé conductivité thermique du matériau composant le corps.

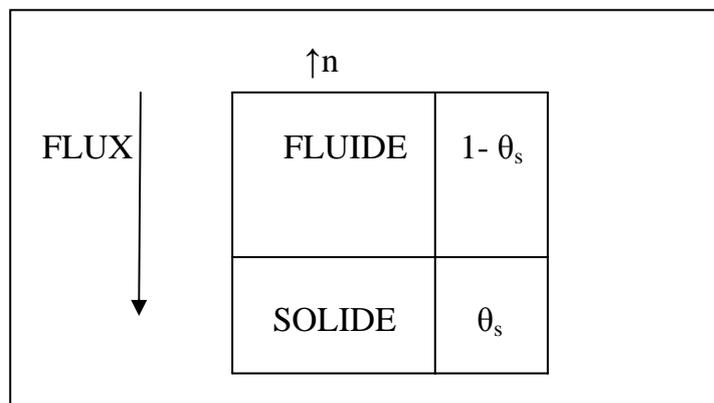
Deux modèles simples, l'un en série et l'autre en parallèle, encadrent la conductivité thermique du milieu. Ce sont les bornes de Voigt et Reuss développés au chapitre précédent.

Ainsi en notant par  $\theta_i$  la concentration volumique de la phase  $i$ , occupant un volume  $V_i$  dans un matériau de volume total  $V$  :

$$\Theta_i = V_i/V \quad (V.31)$$

**a) Modèle en série :**

Le modèle en série correspond au cas de figure V.5 où le flux de chaleur traverse les deux phases de manière parallèle à la normale  $n$  à leur surface de contact.



**Figure V.5 .** Modèle en série de conduction thermique

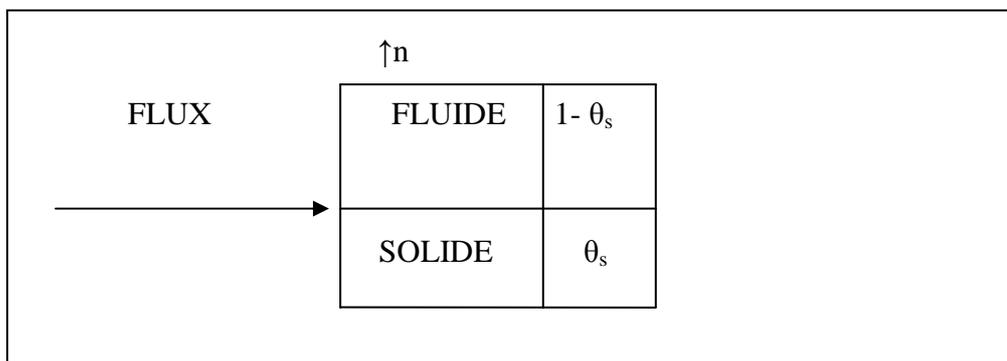
La conductivité thermique  $\lambda_{série}$  correspondante est :

$$\lambda_{série} = \frac{1}{\frac{\theta_s}{\lambda_s} + \frac{1-\theta_s}{\lambda_f}} \quad (V.32)$$

Dans le cas où la conductivité du fluide  $\lambda_f$  tend vers 0, la conductivité totale  $\lambda$  tend aussi vers 0. La couche de fluide isole le matériau global et crée une rupture dans le chemin de propagation de la chaleur. Ce schéma fait jouer un rôle prépondérant à l'air qui va imposer la conductivité globale du matériau.

**b) Modèle en parallèle :**

Le modèle parallèle correspond au cas de figure où le flux de chaleur traverse les deux faces de manière perpendiculaire à la normale  $n$  à leur point de contact.



**Figure V.6.** Modèle parallèle de conduction thermique

La conductivité thermique  $\lambda_{\text{parallèle}}$  correspondante est :

$$\lambda_{\text{parallèle}} = \theta_s \lambda_s + (1 - \theta_s) \lambda_f \quad (\text{V.33})$$

Lorsque la conductivité du fluide devient négligeable devant celle du solide ( $\lambda_f \ll \lambda_s$ ), la phase solide impose la conductivité totale et  $\lambda$  tend vers  $\theta_s \lambda_s$ .

La conductivité thermique réelle du milieu est bornée par ces deux modèles. Ceux-ci permettent donc de déterminer une zone dans laquelle la conductivité se situe obligatoirement quel que soit le matériau considéré :

$$\lambda_{\text{série}} < \lambda < \lambda_{\text{parallèle}} \quad (\text{V.34})$$

D'autres auteurs comme [JACKSON & BLACK , 46] , [LAURENT , 47] et [LOUKOU ,48] se sont intéressés à des modèles mixtes qui couplaient les modèles en séries et en parallèles. Ces modèles reposaient sur l'hypothèse que la microstructure du matériau ne variait pas lorsque sa masse volumique changeait (pas de réarrangement du squelette sous l'effet du compactage) et que la répartition de l'air dans le matériau était uniforme.

### V.6.3. Détermination de la conductivité thermique réelle du granulat composite

L'équation générale de conservation d'énergie dans un solide isotrope s'écrit :

$$\lambda \Delta T + \text{grad}T \cdot \text{grad}\lambda + p = \rho C \left( \frac{\partial T}{\partial t} + U \cdot \text{grad}T \right) \quad (\text{V.35})$$

Tenant compte des hypothèses suivantes :

\*Le régime est permanent :  $\frac{\partial}{\partial t} = 0$

\*La conductivité thermique est constante et indépendante de la température  
 $\text{grad}\lambda = 0$

\*Il n'y a pas de production interne de chaleur  $p=0$

\*Le solide est immobile  $U=0$

L'équation V.28 se réduit à l'équation de Laplace, soit :

$$\Delta T = 0 \quad (\text{V.36})$$

La solution générale de l'équation de Laplace (V.36), est donnée par :

$$T = \left( A_i r + \frac{B_i}{r^2} \right) \cos \theta \quad \text{avec } i=1,2,3, \quad (\text{V.37})$$

L'indice  $i$  représente successivement, le polypropylène, l'interface chaud et l'enrobage de marbre.

Les conditions aux limites associées au problème sont :

-  $r=0$ ,  $T$  est finie donc  $B_1 = 0$

-  $r \rightarrow \infty$ ,  $(gradT)_{eq} = 1$  soit  $A_{eq} = 1$

-  $r = R_1$ ,  $T$  est continue, donc  $A_1 R_1 = \frac{B_2}{R_1^2} + A_2 R_1$

-  $r = R_1$ , le flux est continu, donc  $\lambda_1 A_1 = \lambda_2 \left( A_2 - \frac{2B_2}{R_1^3} \right)$

-  $r = R_2$ ,  $T$  est continue, donc  $A_2 R_2 + \frac{B_2}{R_2^2} = A_3 R_2 + \frac{B_3}{R_2^3}$

-  $r = R_2$ , le flux est continu, donc  $\lambda_2 \left( A_2 - \frac{2B_2}{R_2^3} \right) = \lambda_3 \left( A_3 - \frac{2B_3}{R_3^3} \right)$

-  $r = R_3$ ,  $T$  est continue, donc  $A_3 R_3 + \frac{B_3}{R_3^2} = R_3 + \frac{B_{eq}}{R_3^3}$

-  $r = R_3$ , le flux est continu, donc  $\lambda_3 \left( A_3 - \frac{2B_3}{R_3^3} \right) = \lambda_{eq} \left( 1 - \frac{2B_{eq}}{R_3^3} \right)$

L'égalité des gradients de température dans le milieu homogène équivalent et le composite impose  $B_{eq} = 0$

Ce système de six équations à cinq inconnues est résolu par [BOUTIN 44], en considérant son déterminant nul et aboutit à l'expression de la conductivité thermique

avec (V. ), en posant :  $\alpha = \left( \frac{R_2}{R_3} \right)^3$  et  $\beta = 1 - \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^3$

$$\lambda_{composite} = \lambda_{eq} = \lambda_{mar} \left[ 1 + \frac{\alpha}{\frac{1-\alpha}{3} + \frac{\beta \left( \frac{\lambda_{pp}}{\lambda_{ch}} - 1 \right) \left( \frac{2\lambda_{ch}}{\lambda_{mar}} + 1 \right)}{\lambda_{pp} - 1 - \frac{\beta \left( \frac{\lambda_{pp}}{\lambda_{ch}} - 1 \right)}{3}}} \right] \quad (V.38)$$

### b)- Application numérique

Les données de calcul sont résumées dans le tableau V.2

**Tableau V.2** : Valeurs considérées

Données	R <sub>i</sub> (mm)			λ (w/m.°c)	
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	λ <sub>pp</sub>	λ <sub>powder</sub>
	1,5	1,55	1,55- 3	0,35	0,50

R<sub>3</sub> Varie entre 1.55 mm et 3mm pour décrire la variété de granulats élaborée.

Le calcul de la conductivité thermique donne une valeur de  $\lambda_{granulatcomposite} = 0.43w/m.^{\circ}c$ ,

# CONCLUSION GENERALE

Les mécanismes locaux de rupture des bétons de granulats légers peuvent être expliqués par une analyse des valeurs de résistance données par le modèle proposé, à condition de prendre en considération le développement des déformations correspondantes aux valeurs des résistances au pic. L'exploitation d'autres critères adaptés pourrait ensuite permettre d'analyser en profondeur le comportement de ces types de bétons.

L'analyse des différents résultats nous permet de conclure que, la substitution d'une fraction des granulats naturels par des billes de polypropylène non enrobées de fines avec un dosage de 30% donne un résultat satisfaisant comparé aux autres pourcentages considérés.

La perte en termes de résistance et de masse comparativement au béton témoin est respectivement de l'ordre de 38% et 8,5%. Concernant la variante équivalente avec une teneur de 30% en grains de polypropylène enrobés par une enveloppe de poudres fines de céramique, cette perte est réduite, elle est de l'ordre de 30% pour la même masse de l'éprouvette. Cette amélioration de la résistance évaluée à 8% peut être expliquée par le fait que les billes de polypropylène se maintient dans leur espace volumique, d'où une bonne homogénéisation de la matrice béton léger.

Il est clair que l'enduit des billes de polypropylène par la poudre de céramique ou de marbre permet d'obtenir un béton léger homogène dont la résistance en compression est meilleure comparée au béton léger lorsque les billes sont introduites

directement dans la matrice béton. Pour une teneur de 30%, 40% et 50% de granulats légers en billes de polypropylène enrobées d'une enveloppe de céramique, on augmente les résistances respectivement de 74.6%, de 41.14 et de 41.7% par rapport aux résistances obtenues en écrasant des éprouvettes identiques mais les billes ne sont pas enrobées.

- L'élaboration de granulats légers artificiels à base de polypropylène enrobée par des fines de marbre ou de céramique permet sans aucun doute de substituer les granulats naturels, d'où un impact environnemental très conséquent.
- Une technique de mécanisation du procédé d'élaboration en série peut être mise en place aisément, avec un rendement approprié.
- Les essais mécaniques réalisés sur les différentes séries de béton composite ; montrent que le pourcentage de substitution des granulats naturels par des granulats artificiels à base de polypropylène enrobés et non enrobés de fines a un effet important sur les propriétés mécaniques du béton élaboré, l'analyse des résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

- La chute de la résistance à la rupture en compression uni axiale est respectivement pour le béton léger à base de grains en polypropylène enrobés et non enrobés est de l'ordre de 32,80% 36,27 pour le béton composite avec 30% de billes de polypropylène enrobées, de 52,54% et 58,24 avec 40% et de 59% et 63,82 avec 50% par rapport au béton ordinaire.

- Le remplacement des granulats ordinaires par des granulats légers artificiels, permet de réduire la masse volumique. La variation de cette masse volumique des bétons légers composites avec billes de polypropylène par rapport au béton témoin est de l'ordre de 16% .

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Tasserie .M ; Bideau .D ; Optimisation Physicochimique d'un matériau expansé ; Université de Rennes 1, Rennes, France ; thèse de doctorat ; sciences des matériaux ; 1991.

[2] Venuat. M; Du béton mousse au béton de polystyrène ; 1983

[3] Ouadi R. ; Conception d'un panneau sandwich isolant-porteur ; Thèse de doctorat en Sciences appliquées ; 1991, Villeurbanne, INSA

[4] Short A , Kinniburgh W; Lightweigh concrete; CR books; 1968.

[5] Arnould .M Et Virlogeux .M. « Granulats et bétons légers » Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 1986

[6] Malhotra .V ; Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton ; centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie ; Ottawa 1989.

[7] Ke .Y, Beaucour .Al, Ortola .S, Dumontet .H , Cabrillac .R ; Comportement mécanique des bétons de granulats légers : étude expérimentale et modélisation ; 24ème rencontre AUGC Montpellier ; juin 2006.

[8] Ke .Y, Beaucour .Al, Ortola .S, Dumontet .H; « Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregate concrete on the mechanical properties of concrete », Construction and Building Materials, vol. 23, 2009, p. 2821-2828.

[9] Ke .Y, Ortola .S, Beaucour .Al, Dumontet .H, « Identification of microstructural characteristics in lightweight aggregate concretes by micromechanical modeling including the

interfacial transition zone (ITZ) », *Cement and Concrete Research*, vol. 40, 2010, p. 1590-1600.

[10] Zhang .M-H & Gjørsv .O-E; Characteristics of lightweight aggregates for high-strength concrete, *ACI Materials Journal*; 88(2):150-158 ; 1990.

[11] Bederina .M , Marmoret .L , Mezreb .K , Khenfer .M-M, Bali .A Et Queneudec .M ; Effect of the addition of wood shavings on the thermal conductivity of sand concretes : experimental study and modeling ; *construction and building materials* ; 21:662-668 ; 2007.

[12] CHEN B Et LIU J ; Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber ; *cement and concrete research* ; vol34 : N°12 , P59-63 ; 2004 .

[13] Benazzouk .A, Douzane .O, Langlet .T, Mezreb .K, Roucoult .J-M Et Queneudec .M ; Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes ; *cement and concrete composites research* ; vol29 : N°10 , P732-740 ; 2007 .

[14] Benazzouk .A, Douzane .O, Mezreb .K, Laidoudi .B Et Queneudec .M ; Thermal conductivity of cement composites containing rubber wastes particles : experimental study and modeling ; *construction and building materials* ; vol22, P573-579 ; 2008.

[15] TURGUT P Et YESILATA B; Physico-mechanical and thermal performances of newly developed rubber added bricks ; *Energy and Buildings*, Volume 40, Issue 5, Pages 679-688 ; 2008.

[16] Merino, Astorqui et Cortina; Viability analysis and constructive applications of lightened mortar (rubber cement mortar) ; *Construction and Building Materials*, Volume21, Issue 8, Pages 1785-1791, August 2007.

[17] Benmalek .Ml, Bouguerra .A, Ledhem .A, Dheilily .Rm Et Queneudec .M ; Caractéristiques de bétons légers à base de résidus d'exploitation de carrières et de bois » Article : *canadian journal of civil engineering*, pp374 -377 ; 1999.

[18] Al Rim .K, Ledhem .A, Douzane .O, Dheilily .Rm Et Queneudec .M ; Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites ; *Cement and Concrete Composites* ; volume 21, Issue 4, Pages 269–276 , August 1999.

[19] Bederina .M, Laidoudi .B, Goullieux .A, Khenfer .Mm, Bali .A Et Queneudec .M ; Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes ; *Construction and Building Materials* ;Volume 23, Issue 3, Pages 1311–1315 , March 2009.

[20] Houssais .L, Benmalek .Ml, Ledhem .A Et Queneudec .M ; Matériaux à faible impact environnemental « Le comportement à hautes températures du béton de bois à matrice argileuse » revue materials &composites ; 2000.

[21] Bouaziz .S, Ait Tahar. K ; Béton léger à base de granulats composites artificiels ; Annales du BTP ; N°4 :pages 16-22 ; Août 2010.

[22] Kodur .V.K.R « Tenue au feu des éléments de structure en béton haute résistance »

Conseil national de recherches du Canada, 1999.

[23] Beaudoin J.J., Hand book of fiber reinforced concrete; principles properties, developments and applications, Noyes publication, USA, 1990.

[24] Chen B Et Liu J, « Experimental application of mineral admixtures in lightweight concrete with high strength and workability », Construction and Building Materials, vol. 22, p. 655-659,2008.

[25] Tassew .St Et Lubell .As; Mechanical properties of glass fiber reinforced ceramic concrete ;Construction and Building Materials, Volume 51, 31 January 2014, Pages 215-224

[26] Zhang M-H Et Gjorv O-E; Penetration of cement paste in to lightweight aggregate; Cement and Concrete Research; 22(1):47-55; 1992.

[27] Lydon ; Résistance à la compression du béton avec granulats légers en fonction du dosage en ciment;1982.

[28] Bentur .A; Prevention of autogenous shrink-age in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates; Cement and Concrete Research, 31:1587-1591; 2001.

[29] Nguyen .L-H, Beaucour .A-L, Ortola .S, Noumowé .A; Béton de structure à propriétés d'isolation thermique améliorées : approche expérimentale ;Université de Cergy-Pontoise ;XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil ; Mai 2011.

[30] Dreux G, Festa J; « Nouveau guide du béton et de ses constituants » Editions Eyrolles, Paris, 1995.

[31] Lanchon .R ; Cours de laboratoire « granulats, bétons, sols » tome I et II. Editions Casteilla, Paris, 1989.

[32] Auriault .Jl ; Modelling of hot compaction of metal powder by homogenization; Mechanics of Materials, Volume 13, Issue 3, July 1992, Pages 247–255.

[33] Bor H ; Local properties of factored Fourier series ; Applied Mathematics and Computation, Volume 212, Issue 1, 1 June 2009, Pages 82-85.

[34] Cerezo V ; Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique ; thèse de l'INSA de Lyon 2005

[35] Hashin, Z. Analysis of Composite Materials – A survey. Journal of Applied Mechanics, 1983, pp.481-505.

[36] Hashin .Z. The elastic Modulus of heterogeneous Materials. Journal of Applied Mechanics, 1962 , pp.143-150.

[37] Christensen, R.M.And Lo, K.L. Solutions for effective shear properties in three phase sphere and cylinder models. J. Mech. Phys. Solids . 1979, vol.27, pp.315-330.

[38] Kerner, H.E. The Elastic and thermo-elastic Properties of composite Media. Proc.Phys.Soc., 1956, vol.69, pp.808-813.

[39] Eshelby, J.D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems. Proceedings of The Royal Society, London, England, series A, 1957, vol.241, pp.376-396.

[40] Hill, R. A self-consistent mechanics of composite materials. J.Mech. Phys. Solids, 1965, vol.13, pp.213-222.

[41] Christensen, R.M. And Lo, K.L. Solutions for effective shear properties in three phase sphere and cylinder models. J. Mech. Phys. Solids, 1979, vol.27, pp.315-330

[42] Herve, E. And Zaoui, A. Modelling the effective behaviour of non-linear matrix-inclusion composites. European Journal of Mechanics. A/Solids, 1990, vol.6, pp.505-515.

[43] Boutin, Conductivité thermique du béton cellulaire auto-clavé modélisation par méthode auto-cohérente ; Matériaux et Constructions, 1996, vol.29 pp.609-615

[44] Hashin, Z. And Monteiro, P.J.M. An inverse method to determine the elastic properties of the inter phase between the aggregate and the cement paste. Cement and Concrete Research, 2002, vol.32, pp.1291-1300

[45] Jackson, K.W.And Black, W.Z. A unit cell model for predicting the thermal conductivity of a granular medium containing an adhesive binder. Int. J. Heat Mass Transfer., 1983, vol.26, pp.87-99.

[46] Laurent, J.P. La conductivité à sec des bétons cellulaires auto-clavés : un modèle conceptuel. Matériaux et Constructions, 1991, vol.24, pp.221-226.

[47] Loukou, K. Etude expérimentale des caractéristiques acoustiques et thermo physiques de bétons de terre stabilisée au ciment. Thèse de thermique et d'énergétique (acoustique). Lyon: Université Claude Bernard (Lyon 1), 1994, 305 p.

[48] Bouaziz .S, Ait Tahar. K . Behavior of the Composite Lightweight Concrete, - Applied Mechanics and Materials Vol. 146 (2012) pp 39-50, Trans Tech Publications, Switzerland, ISSN: 1662-9795. [www.scientific.net/](http://www.scientific.net/)

[49] Dehmous H, Welmane H, Karama.M, Ait tahar.k, ,,,“ Reliability approach for fibre-reinforced composite design” ,International Journal for simulation and multidisciplinary design optimization, IJSMDO/2008/ISI/02, vol 2 p1-9 Ed. EDP, ISSN (Print Edition) : 1779-627X- 2008 [www. IJSMDO .com](http://www. IJSMDO .com).

[50] Dehmous H, ‘Fiabilité et micromécanique des matériaux composites application à la passerelle de Laroin ’. These de Doctorat, Enit (France), 2007.



