



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mouloud MAMMERY De Tizi Ouzou  
Faculté de génie de la construction  
Département de génie civil

---

## **Modélisation multi-échelle du comportement des matériaux granulaires non linéaire jusqu'à rupture : application au béton avec des granulats issus de la récupération**

---

Présenter par **DJAMEL FELLAH**

Thèse de doctorat en **CALCUL AVANCÉ DES STRUCTURES DE GÉNIE CIVIL**

04 Juillet 2024

PRÉSIDENT	M. MEHADDENE RACHID	Professeur UMM Tizi-Ouzou
RAPPORTEUR	M. KACHI MOHAND SAID	Professeur UMM Tizi-Ouzou
CO-RAPPORTEUR	JIA LI	Professeur Univ. Paris 13
EXAMINATEUR	M. TAHAKOURT ABDELKADER	Professeur UAM Bejaïa
EXAMINATRICE	MME KHELOUI FATMA	Professeur UMM Tizi-Ouzou
INVITÉE	MME BARBOURA SALMA	Maitre de conférences Univ. Paris 13



# TABLE DES MATIÈRES

<b>Table des matières</b>	<b>iii</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>vii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>ix</b>
<b>Résumé</b>	<b>3</b>
<b>Abstract</b>	<b>5</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>7</b>
<b>1 Chapitre 1</b>	<b>9</b>
1.1 Introduction . . . . .	10
1.2 Recyclage des déchets de la construction et de la démolition . . . . .	10
1.2.1 Avantages environnementaux de l'utilisation des granulats recyclés	13
1.2.2 Fabrication des granulats recyclés . . . . .	13
1.3 Composition des granulats recyclés . . . . .	14
1.4 Propriétés des granulats recyclés . . . . .	14
1.4.1 Granulométrie . . . . .	14
1.4.2 Masse volumique . . . . .	15
1.4.3 Absorption . . . . .	16
1.4.4 Résistance à l'usure . . . . .	17
1.5 Propriétés physiques et mécaniques du béton recyclé . . . . .	17
1.5.1 Résistance à la compression . . . . .	17
1.5.2 Résistance à la flexion . . . . .	19
1.5.3 Module de Young . . . . .	21
1.5.4 Vitesse ultrason . . . . .	22
1.5.5 Masse volumique . . . . .	24
1.6 Microstructure du béton recyclé . . . . .	25
1.7 Modèles numériques pour le béton recyclé . . . . .	26
1.7.1 Modèle de Da Silva pour le béton recyclé en compression . . . . .	26
1.7.2 Modèle de Xiao . . . . .	26
1.7.3 Modèle du Bhikshma et Kishore . . . . .	27
1.7.4 Modèle de Rodrigues pour la flexion . . . . .	28
1.8 Conclusion . . . . .	29
<b>2 Chapitre 2</b>	<b>31</b>
2.1 Introduction . . . . .	32
2.1.1 Estimation des propriétés d'un composite à deux phase . . . . .	32
2.1.2 Effet du rapport d'aspect des renforts sur le comportement global .	33
2.1.3 Combinaison de la variation du rapport d'aspect et de la fraction volumique des renforts . . . . .	34
2.2 Composites multi-phases . . . . .	34
2.2.1 Composite à trois phases renforcé par deux types d'inclusions . . .	34

2.2.2	Composite à renforts alignés . . . . .	35
2.3	Estimation des propriétés élastique du béton recyclé . . . . .	36
2.3.1	Première étape d'homogénéisation . . . . .	38
2.3.2	Modèle GEEE . . . . .	38
2.3.3	Deuxième étape d'homogénéisation . . . . .	39
2.3.4	Troisième étape d'homogénéisation . . . . .	40
2.4	Homogénéisation des granulats recyclés . . . . .	41
2.5	Propriétés linéaires élastiques du béton recyclé . . . . .	41
2.5.1	Module de Young en fonction du taux de remplacement . . . . .	41
2.5.2	Effet de la qualité des granulats recyclés sur le module de Young homogène . . . . .	43
2.6	Conclusion . . . . .	45
<b>3</b>	<b>Chapitre 3</b> . . . . .	<b>47</b>
3.1	Introduction . . . . .	48
3.2	Propriétés effectives des composites multi phases non linéaires . . . . .	48
3.3	Formulation sécante . . . . .	49
3.4	Méthode sécante . . . . .	49
3.5	Généralités sur la formulation sécante . . . . .	49
3.6	Méthode sécante classique : une théorie basée sur la déformation moyenne . . . . .	51
3.6.1	Cas d'un composite isotrope à deux phases . . . . .	51
3.7	Lois de comportement . . . . .	52
3.7.1	Modèle d'endommagement de Mazars . . . . .	52
3.8	Simulation du comportement linéaire endommageable : cas d'un béton ordinaire : . . . . .	55
3.8.1	Comportement du béton ordinaire en compression . . . . .	55
3.8.2	Comportement du béton ordinaire en traction . . . . .	57
3.9	Modélisation du comportement du béton à base d'agrégats recyclés . . . . .	59
3.9.1	Comportement des phases constitutive du béton recyclé . . . . .	60
3.9.2	Algorithme général . . . . .	62
3.10	Conclusion . . . . .	63
<b>4</b>	<b>Chapitre 4</b> . . . . .	<b>65</b>
4.1	Introduction . . . . .	66
4.2	Matériaux du béton . . . . .	66
4.2.1	Le liant hydraulique . . . . .	66
4.2.2	Les granulats . . . . .	67
4.3	Confection du béton au laboratoire . . . . .	70
4.4	Essai sur le béton frais . . . . .	71
4.5	Essai sur le béton durci . . . . .	71
4.5.1	Essai non destructif . . . . .	72
4.5.2	Essai destructif . . . . .	72
4.6	Résultats et discussion . . . . .	74
4.6.1	Béton à l'état frais . . . . .	74
4.6.2	: Béton à l'état durci . . . . .	75
4.7	Conclusion . . . . .	82

---

<b>I</b>	<b>Validation de modèle numérique</b>	<b>85</b>
<b>5</b>	<b>Chapitre05</b>	<b>87</b>
5.1	Exemples de simulation numérique . . . . .	88
5.1.1	Hypothèse pour les granulats naturels et recyclés dans le béton . . . . .	88
5.1.2	Loi Mazars . . . . .	88
5.2	Simulation numérique du béton recyclé . . . . .	90
5.2.1	Propriétés linéaires du béton recyclé . . . . .	90
5.2.2	Simulation d'essais expérimentaux de compression . . . . .	91
5.2.3	Résultats de la simulation avec la littérature Xiao et al [75] . . . . .	94
5.3	Conclusion . . . . .	97
	<b>Bibliographie</b>	<b>104</b>

---

# TABLE DES FIGURES

1.1	Production mondiale des granulats [69] . . . . .	11
1.2	La récupération des déchets de la construction et de la démolition dans certains pays au monde [70]. . . . .	12
1.3	Déchets de la démolition et de laboratoire. . . . .	12
1.4	Image correspondante à un granulats recyclé, granulats naturel entouré de mortier adhérent [43] . . . . .	14
1.5	Résultats d'absorption [54] . . . . .	15
1.6	Résultats d'analyse granulométrique [55] . . . . .	15
1.7	Résultats d'analyse granulométrique [49] . . . . .	16
1.8	Effet des granulats recyclés sur la résistance à la compression à 7 et 28 jours de divers mélanges de béton [54] . . . . .	19
1.9	Effet du remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés sur la résistance à la flexion du béton [71] . . . . .	20
1.10	Courbe force – CMOD [35] . . . . .	20
1.11	Module élastique du béton recyclé [51] . . . . .	21
1.12	: Module de Young en fonction du taux de remplacement [44] . . . . .	22
1.13	développement des VOU [37] . . . . .	23
1.14	développement des VOU en fonction du remplacement des GN par des GR [3] . . . . .	24
1.15	Schéma de la microstructure du béton : (a) béton naturel, (b) béton recyclé [81]. . . . .	25
1.16	Comportement du béton recyclé en compression, expérimentale et numérique [64] . . . . .	27
1.17	Comparaison des courbes contrainte-déformation normalisées. (a) r=30%, (b) r=50%, (c) r=70%, (d) r=100% [75] . . . . .	28
1.18	Courbes contrainte-déformation pour le béton de granulats recyclés [7] . . . . .	29
1.19	Courbes force-flèche des poutres en béton recyclé [57]. . . . .	30
2.1	Comportement macroscopique élastique par différentes approches : Voigt, Hashin sup, Hashin inf, Mori-Tanaka, dilué contrainte, dilué déformation . . . . .	33
2.2	Influence de la géométrie des inclusions (plaquettes) sur le module élastique homogénéisé . . . . .	34
2.3	Estimation de comportement globale en fonction du rapport d'aspect $a_r$ des fibres. Les approches utilisées, MT-DI-EF . . . . .	35
2.4	Module élastique homogénéisé d'un composite renforcé par des inclusions de différentes formes et propriétés mécaniques. Les approches utilisées sont MT-Voigt et MT-Reuss et MT-MT . . . . .	36
2.5	Microstructure d'un béton recycle . . . . .	37
2.6	Présentation du premier niveau d'homogénéisation. . . . .	38
2.7	Présentation de la deuxième étape d'homogénéisation. . . . .	39
2.8	Troisième étape d'homogénéisation . . . . .	40
2.9	Module de Young du granulats recyclé équivalent avec les modèles de Voigt,Reuss, GEE, MT, PCW. Trois rapports d'aspect du vieux mortier $a_{VM} = 0.8, 1, 1.25$ . . . . .	42
2.10	Estimation de module de Young effectif du béton recyclé à l'âge de 28 et 90 jours, comparaison avec l'expérimental [2]. . . . .	43
2.11	Module de Young effectif du béton recyclé. . . . .	44

---

2.12	Effet de l'interface sur le Module de Young effectif du béton recyclé. . . . .	45
3.1	Comportement en compression selon la loi de Mazars, contrainte équivalente $\sigma_{eq}$ en fonction de la déformation équivalente $\varepsilon_{eq}$ . . . . .	55
3.2	Comportement en traction selon la loi de Mazars, contrainte équivalente $\sigma_{eq}$ en fonction de la déformation équivalente $\varepsilon_{eq}$ . . . . .	55
3.3	Évolution de l'endommagement en compression $D_c$ , en fonction de la déformation équivalente $\varepsilon_{eq}$ . . . . .	56
3.4	Évolution de l'endommagement en compression $D_t$ , en fonction de la déformation équivalente $\varepsilon_{eq}$ . . . . .	56
3.5	Comportement du béton ordinaire en compression par l'homogénéisation sécante : comparaison avec les résultats de Wriggers [74] et de Cordes [25].	57
3.6	Modélisation du comportement du béton en traction : comparaison avec l'expérimental [1]. . . . .	58
4.1	Courbe granulométrique du sable naturel (0/3mm). . . . .	67
4.2	Courbe granulométrique du gravier naturel et recyclé (3/8mm). . . . .	68
4.3	Courbe granulométrique du gravier naturel et recyclé (8/15mm). . . . .	68
4.4	Matériaux du béton. . . . .	70
4.5	Conservation des éprouvettes. . . . .	71
4.6	Description d'essai d'affaissement. . . . .	72
4.7	Essai de compression uni axial. . . . .	73
4.8	Dispositif d'essai de flexion quatre points . . . . .	74
4.9	Affaissement au cône d'Abrams. . . . .	75
4.10	Résultats de la compression . . . . .	76
4.11	Comportement des échantillons du béton BN, BR25, BR50, BR75 en compression uni axial. Contrainte en fonction de la déformation. . . . .	77
4.12	Déformation au pic du chargement en fonction de taux de remplacement des granulats naturels GN par des granulats recyclés GR. . . . .	77
4.13	Propagation des fissures suivant le sens de compression BN. . . . .	78
4.14	Propagation des fissures suivant le sens de compression BR25. . . . .	78
4.15	Propagation des fissures suivant le sens de compression BR50. . . . .	78
4.16	Propagation des fissures suivant le sens de compression BR75. . . . .	78
4.17	Module de Young en fonction de taux de remplacement des GN par des GR. . . . .	79
4.18	Module de Young en fonction de taux de remplacement des GN par des GR. . . . .	80
4.19	Masse volumique des échantillons du béton (BN, BR25, BR50, BR75). . . . .	81
4.20	Résistance à la flexion quatre points des poutres avec entaille . . . . .	81
4.21	Résistance à la flexion quatre points des poutres sans entaille. . . . .	81
4.22	Courbe force flèche des poutres avec entaille. . . . .	82
4.23	Résistance à la flexion quatre points des poutres sans entaille. . . . .	82
5.1	Module de Young normalisé en fonction du rapport d'aspect. . . . .	89
5.2	Modélisation du comportement du béton naturel NC par rapport au comportement expérimental. . . . .	89
5.3	Modélisation numérique et comportement expérimental [75]. . . . .	91
5.4	Module de Young effectif du béton recyclé . . . . .	92

---

5.5	Modélisation du comportement du béton recyclé BR25 par rapport aux résultats expérimentaux. . . . .	92
5.6	Modélisation du comportement du béton recyclé BR50 par rapport aux résultats expérimentaux. . . . .	93
5.7	Modélisation du comportement du béton recyclé BR75 par rapport aux résultats expérimentaux. . . . .	93
5.8	Modélisation du comportement du béton recyclé BR30, comparaison avec l'expérimental [75]. . . . .	95
5.9	Modélisation du comportement du béton recyclé BR50, comparaison avec l'expérimental [75]. . . . .	95
5.10	Modélisation du comportement du béton recyclé BR70, comparaison avec l'expérimental [75]. . . . .	96
5.11	Modélisation du comportement du béton recyclé BR100, comparaison avec l'expérimental [75]. . . . .	96



# LISTE DES TABLEAUX

1.1	Masse volumique du sable et du gravier recyclé [kg/m <sup>3</sup> ]	16
2.1	Propriétés de la matrice époxy et de l'inclusion silice	32
2.2	Module de Young $E$ et module de cisaillement $\mu$ obtenus par différents schémas d'homogénéisation.	33
2.3	Composante du tenseur élastique homogénéisé $\mathbb{C}^{hom}$ d'un composite à trois phases, obtenu par l'homogénéisation à deux étapes, les composantes sont en [GPa]	35
2.4	propriétés élastiques du granulat d'origine et du vieux mortier[2]	41
2.5	propriétés élastiques du granulat d'origine et du vieux mortier[2].	42
2.6	propriétés mécaniques des différents types de mortier[57]	44
2.7	Propriétés des interfaces [57]	44
3.1	Paramètres des constituants du béton ordinaire.	57
3.2	Paramètres des constituants du béton.	58
4.1	Composants du liant hydraulique.	66
4.2	Propriétés des granulats naturels (GN) et des granulats recyclés (GR).	68
4.3	Formulations des échantillons (BN, BR25, BR50, BR75).	69
5.1	Propriétés mécaniques et paramètres de Mazars des différentes phases (NM, NA).	90
5.2	Propriétés mécaniques et paramètres de Mazars des phases constitutives du béton recyclé	90
5.3	Propriétés mécaniques des constituants du BR.	91
5.4	Contraintes et déformations numériques et expérimentales	94
5.5	Contraintes et déformations numériques et expérimentales.	94



## **Remerciements**

J'aimerais tout d'abord remercier mes directeurs de thèse, KACHI Mohand Said et LI Jia, pour leurs accompagnements durant ces années de travail, qui m'ont conseillé et guidé pendant toutes ces années de recherche. Leurs disponibilités et leurs observations avisées m'ont été précieuses dans la réalisation du présent travail. Je vous remercie de toute l'aide et le soutien que vous m'avez apporté quant à l'établissement de ma thèse, sans quoi cette étude ne serait pas allée loin.

A madame BARBOURA salma, maitre de conférence à l'université Sorbonne Paris Nord, veuillez trouver dans ce travaille l'expression de mes remerciements les plus sincères, et de ma reconnaissance pour le savoir et les valeurs que vous m'avez transmis durant mon séjour au LSPM.

A monsieur BENYAHY Karim, veuillez trouver ici l'expression de ma plus sincère reconnaissance quant votre disponibilité et conseille pendant ces années de travail.

Je remercie vivement monsieur MEHADDENE Rachid, professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou , d'avoir présidé le jury, et d'avoir pris de temps de lire et de juger ce travail. Je suis vraiment reconnaissant pour les commentaires et les suggestions que vous m'avez donnés.

Je remercie vivement monsieur Tahakourt Abdekader, professeur à l'université Abderahmane Mira de Bejaia, d'avoir bien voulue participé à ce jury, et d'avoir pris de temps de lire et de juger ce travail. Je suis vraiment reconnaissant pour les commentaires et les suggestions que vous m'avez donnés.

Je remercie vivement madame Mme KHELOUI Fatma, professeur à UMM Tizi-Ouzou, d'avoir bien voulue participé à ce jury, et d'avoir pris de temps de lire et de juger ce travail. Je suis vraiment reconnaissant pour les commentaires et les suggestions que vous m'avez donnés.

Je tiens à remercier le personelle du laboratoire de génie civil, monsieur BOUHRAOUA Rachi et madame BENAHMED Fadhila et madame BABACI Amina, pour leurs soutien et leurs accompagnements durant notre compagne expérimentale.

Je tiens à adresser mes remerciement aux personelles de laboratoire des sciences des procédés et des matériaux LSPM de l'université Sorbonne Paris Nord. Je suis très reconnaissant pour votre soutien et votre collaboration.

## **Dédicaces**

A mes chers parents,  
Pour votre amour inconditionnel, votre soutien constant et votre sagesse infinie, merci pour tous ce que vous avez fait et continuez de faire pour moi. Ce travail est dédié à vous, avec toute ma gratitude et mon affection.

A mes chers frères et sœurs,  
Farida, Nacir, Louiza, Zohra, Fatma, Nadia, Mohand. Vous avez été mes premiers amis, mes complices et mes soutiens infailible. Ce travail est dédié à vous, avec tout mon cœur et ma reconnaissance.

A mes chers neveux,  
Amel, Amine, Idris, Yasmine, Mohamed. Pour vos sourires, votre énergie débordante et votre curiosité sans fin. Vous apportez tant de joie et d'inspiration dans ma vie. Ce travail est dédié à vous, avec tout mon amour et mes meilleurs vœux pour un avenir radieux.

A ma chère fiancée Lydia,  
Pour ton amour sans faille, ta patience infinie et ta présence réconfortante. Tu es mon inspiration, mon soutien et mon partenaire de vie. Ce travail est dédié à toi, avec toute ma gratitude et tout mon cœur.

A mes chers amis,  
Toufik, Djamel, Lotfi, Massi, Thileli, Yacine, pour les moments de rires partagés, les conseils avisés et le soutien indéfectible. Vous avez enrichi ma vie de tant de façons et rendu chaque jour plus lumineux. Ce travail est dédié à vous, avec toute mon amitié et ma gratitude.

# RÉSUMÉ

L'ingénieur de génie civil fait un usage avancé de la simulation numérique pour modéliser une grande variété de phénomènes, tels que le calcul statique, dynamique ou la stabilité des structures etc. Cependant, la prise en compte des matériaux à des échelles plus fines reste encore du domaine de la recherche et n'est pas encore transférée dans les codes de calcul. Les raisons principales sont liées à des difficultés théoriques et numériques associées au passage d'une description à l'échelle microscopique, où les phénomènes tels que la microfissuration ou le transport de l'humidité à travers les pores peuvent être observés et modélisés, et à l'échelle de la structure, où les dimensions caractéristiques vont de quelques centimètres à des dizaines de mètres. Les progrès dans ce domaine, appelé "micromécanique", ou plus récemment mécanique multi-échelles sont cependant nombreux et ont permis des avancées spectaculaires ces dernières années. Plusieurs travaux ont été effectués en micromécanique portant notamment sur l'homogénéisation, plusieurs outils mathématiques ont été proposés et ont permis de définir des évaluations des comportements effectifs pour des matériaux hétérogènes, principalement dans le cas linéaire. Le comportement du béton, tel que formulé dans le domaine du génie civil, a fait l'objet de plusieurs études qui ont permis de montrer que l'intégration de nouveaux granulats, issus des déchets de la construction, peut modifier considérablement bien des aspects de son comportement ceci d'une part. D'autre part, l'incorporation dans le mélange ainsi obtenu de capsules de matériau à changement de phase est également susceptible de modifier bien des aspects du comportement du mélange notamment ces caractéristiques mécaniques mais surtout sa capacité dans le domaine du transfert thermique. L'objectif de cette thèse est de contribuer à cet enjeu environnemental, en offrant un débouché fiable aux déchets de la construction qui constituent un défi environnemental majeur, en proposant des formulations d'ensemble capables de conférer à ce matériau une capacité à assurer des caractéristiques mécaniques afin de rendre possible son intégration dans le domaine des structures. Et ceci, en se basant sur l'homogénéisation linéaire des matériaux élastoplastiques, et sur le calcul des structures composées de ces matériaux non linéaire hétérogènes.

## **Mots clés**

Béton recyclé, homogénéisation sécante, modélisation non linéaire, endommagement.



# ABSTRACT

The civil engineer makes advanced use of numerical simulation to model a wide variety of phenomena, such as static, dynamic calculation or the stability of structures. However, taking into account materials at finer scales still remains in the field of research and has not yet been transferred to computer codes. The main reasons are linked to theoretical and numerical difficulties associated with moving from a description to the microscopic scale, where phenomena such as microcracking or moisture transport through pores can be observed and modeled, and at the scale of the structure, where the characteristic dimensions range from a few centimeters to tens of meters. However, progress in this field, called “micromechanics”, or more recently multi-scale mechanics, is numerous and has enabled spectacular advances in recent years. Several works have been carried out in micromechanics relating in particular to homogenization, several mathematical tools have been proposed and made it possible to define evaluations of effective behavior for heterogeneous materials, mainly in the linear case. The behavior of concrete, as formulated in the field of civil engineering, has been the subject of several studies which have shown that the integration of new aggregates, from waste from the construction, can considerably modify many aspects of its behavior on the one hand. On the other hand, the incorporation into the mixture thus obtained of capsules of phase change material is also likely to modify many aspects of the behavior of the mixture in particular its mechanical characteristics but especially its capacity in the field of heat transfer. The objective of this thesis is to contribute to this environmental issue, by offering a reliable outlet for construction waste which constitutes a major environmental challenge, by proposing overall formulations capable of giving this material an ability to ensure characteristics mechanical in order to make its integration possible in the field of structures. And this, based on the linear homogenization of damaging elastic materials, and on the calculation of structures composed of these heterogeneous nonlinear materials.

## **Keywords**

Recycled concrete, secant homogenization, nonlinear modelling, endommagement.



# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les matériaux granulaires sont des composites solides constitués de différentes phases, ils sont le résultat de la combinaison d'une matrice avec un ou plusieurs renforts, de caractéristiques mécaniques et géométriques différentes. La prédiction du comportement effectif du matériau granulaire fait intervenir les propriétés de chaque phase. L'homogénéisation est un outil crucial qui permet d'avoir les propriétés effectives de ce genre de matériau.

Dans le cadre de cette thèse on s'intéresse à l'estimation du comportement des matériaux hétérogènes, dont les différentes phases présentent des propriétés différentes. Le matériau hétérogène est composé d'une matrice dans laquelle se trouvent des inclusions ou des renforts, leur géométrie peut être représentée par des sphères, ellipsoïdes, et des cylindres. Dans un premier temps nous déterminons les propriétés homogénéisées des composites à deux phases, en variant deux paramètres, pour déterminer leur effet sur le comportement global, le premier paramètre est la fraction volumique des inclusions, le deuxième est le rapport d'aspect. Un modèle d'homogénéisation des propriétés linéaires élastiques du béton recyclé est proposé dans cette étude, le béton recyclé est un matériau granulaire composé de trois phases, mortier naturel, granulat naturel, granulat recyclé, ce dernier est composé d'un granulat d'origine naturel entouré d'une couche de vieux mortier, ce modèle est composé de trois étapes d'homogénéisation. La première étape a pour objectif de déterminer les propriétés effectives du granulat recyclé (GR) avec le modèle GEEE, modèle adapté pour estimer les propriétés élastiques des granulats recyclés équivalents ( $GR_{eq}$ ) assimilés à des composites multicouches. La deuxième étape consiste à décomposer le VER du béton recyclé en deux grains à 2 phases contenant une famille d'inclusion (GN ou  $GR_{eq}$ ) d'orientation aléatoire. Chaque grain est homogénéisé par une approche d'homogénéisation, dans notre cas, par le modèle Mori-Tanaka, ce qui permet de transformer le VER hétérogène en deux grains homogènes. Dans la troisième et dernière étape, le comportement élastique effectif du béton recyclé est déterminé par la moyenne de Voigt.

Dans la présente étude, nous proposons, d'une part, une approche micromécanique basée sur l'homogénéisation à champs moyens pour prédire le comportement non linéaire, le problème non linéaire est alors décomposé en une succession de problèmes linéaires, à chaque pas de chargement, par une linéarisation sécante entre les champs moyens locaux. Le comportement élastique endommageable du béton recyclé est estimé par l'extension du modèle d'homogénéisation à trois phases pour prédire le comportement élastique endommageable. Les résultats de la simulation numérique du comportement non linéaire des composites (élastique endommageable) données par l'homogénéisation non linéaire sont comparés aux résultats expérimentaux et à d'autres résultats issus de la littérature.

D'autre part, une campagne expérimentale est réalisée au niveau du laboratoire, qui a comme but la caractérisation des propriétés physiques et mécaniques des granulats recyclés ou granulats issus des déchets de la construction, ainsi que celle du béton recyclé. Cela fait appel à plusieurs essais d'identification. L'effet de l'ajout des granulats recyclés sur les

propriétés du béton recyclé est étudié, des essais à l'état frais et à l'état durci du béton sont réalisés.

Cette thèse est décomposée en plusieurs chapitres. Le premier chapitre présente un état de l'art sur les granulats issus de la récupération et le béton recyclé. Les propriétés des granulats recyclés sont présentées en s'appuyant sur des études antérieures, à savoir les propriétés physiques et mécaniques. De plus l'effet de l'ajout des granulats issus de la récupération sur les propriétés des bétons recyclés. Des modèles de simulation du comportement du béton recyclé sont aussi présentés.

Le deuxième chapitre décrit la modélisation du comportement linéaire élastique des composites, en utilisant les techniques d'homogénéisation à champs moyens appliquées à des composites à deux phases. Un modèle d'homogénéisation en deux étapes est également proposé pour simuler les propriétés homogénéisées des composites multi phases, dont les inclusions sont de différentes propriétés mécaniques et de différentes formes géométriques. Enfin un modèle d'homogénéisation à trois étapes est développé pour estimer le comportement effectif du béton recyclé, en tenant compte de la fraction volumique des différents composants.

Le troisième chapitre décrit la simulation du comportement élastique endommageable. D'abord, pour prédire le comportement non linéaire, une approche micromécanique basée sur l'homogénéisation à champs moyens est proposée. Ensuite, des lois de comportement sont utilisées pour décrire le comportement des phases, la loi de Mazars permet de décrire le comportement des phases linéaires endommageables. Enfin le modèle, à trois étapes, développé pour estimer le comportement du béton recyclé est étendu au domaine non linéaire, pour décrire le comportement élastique endommageable du béton recyclé.

Le quatrième chapitre, décrit la partie expérimentale réalisée au niveau du laboratoire, les différents matériaux utilisés sont caractérisés. D'abord les résultats des essais de caractérisation physique et mécanique des granulats naturels et recyclés utilisés dans cette étude sont présentés et traités. Ensuite, la composition des échantillons et la fabrication du béton au niveau du laboratoire sont présentés, de plus, les essais sur le béton à l'état frais et durci, qui permettent de mesurer toutes les grandeurs physiques mécaniques (affaissement, Poids, compression, . . .) sont expliquées. Enfin les résultats obtenus, à l'état frais et durci, par les essais mentionnés précédemment sont présentés et analysés, à savoir l'affaissement et le comportement en compression et en flexion.

Dans le cinquième chapitre, le modèle d'homogénéisation proposée est utilisé pour simuler les résultats obtenus dans le chapitre quatre. Le comportement du béton recyclé en compression uni axiale est modélisé numériquement. Ensuite les résultats de la simulation avec ce modèle sont comparés à d'autres résultats tiré de la littérature, afin d'évaluer et d'analyser la validation de l'approche proposée de cette étude.

Enfin, nous terminons avec une conclusion générale.

# CHAPITRE 1

---

1.1	Introduction . . . . .	10
1.2	Recyclage des déchets de la construction et de la démolition . . . . .	10
1.2.1	Avantages environnementaux de l'utilisation des granulats recyclés . . . . .	13
1.2.2	Fabrication des granulats recyclés . . . . .	13
1.3	Composition des granulats recyclés . . . . .	14
1.4	Propriétés des granulats recyclés . . . . .	14
1.4.1	Granulométrie . . . . .	14
1.4.2	Masse volumique . . . . .	15
1.4.3	Absorption . . . . .	16
1.4.4	Résistance à l'usure . . . . .	17
1.5	Propriétés physiques et mécaniques du béton recyclé . . . . .	17
1.5.1	Résistance à la compression . . . . .	17
1.5.2	Résistance à la flexion . . . . .	19
1.5.3	Module de Young . . . . .	21
1.5.4	Vitesse ultrason . . . . .	22
1.5.5	Masse volumique . . . . .	24
1.6	Microstructure du béton recyclé . . . . .	25
1.7	Modèles numériques pour le béton recyclé . . . . .	26
1.7.1	Modèle de Da Silva pour le béton recyclé en compression . . . . .	26
1.7.2	Modèle de Xiao . . . . .	26
1.7.3	Modèle du Bhikshma et Kishore . . . . .	27
1.7.4	Modèle de Rodrigues pour la flexion . . . . .	28
1.8	Conclusion . . . . .	29

---

## 1.1 Introduction

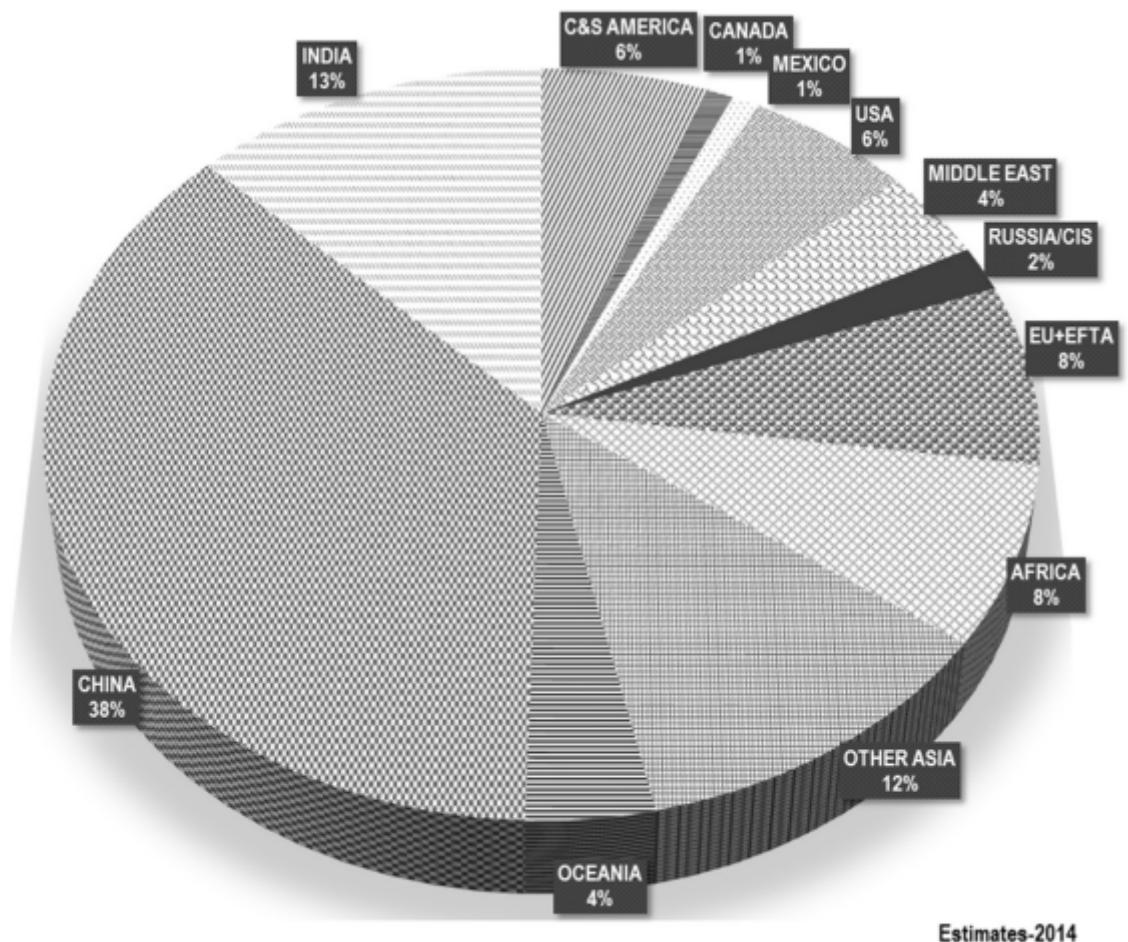
Le développement de l'industrie de la construction dans le monde, comme la réalisation des différents types de bâtiments et de divers projets d'infrastructures, est l'un des secteurs économiques qui affecte le plus les ressources naturelles et l'environnement, car la forte demande de ce secteur en matériau béton engendre l'extraction de ressources naturelles non renouvelables, et la consommation des énergies, et l'émission des gaz à effet de serre, et aussi la production de grandes quantités de déchets. Alors l'assurance d'un développement durable entre l'industrie de la construction et la préservation des ressources naturelles et la protection de l'écosystème planétaire, sont devenues une préoccupation majeure à l'échelle planétaire. D'autre part, les travaux de construction cités précédemment et aussi les travaux de préfabrication et de démolition des vieux bâtiments, produisent de grandes quantités de déchets de béton qui sont mis en dépôt au niveau des décharges et occupent de grandes surfaces. Ainsi, afin de protéger l'environnement et les ressources naturelles, et aussi de trouver un débouché pour les déchets de béton, le recyclage des déchets de la construction et de la démolition est proposé comme un meilleur moyen qui peut garantir d'atteindre l'objectif, qui est le développement durable.

Le broyage des déchets de béton permet d'obtenir des granulats recyclés (GR), qui seront des substitues aux granulats naturels (GN) lors de la confection des bétons, ce qui permet d'avoir un béton écologique ou un béton vert [77], ce qui a motivé plusieurs chercheurs à conduire des études scientifiques et des campagnes expérimentales, afin de savoir plus sur les granulats du béton recyclé, car une nouvelle source vient (déchets de construction et de démolition) d'être utilisées pour produire des granulats, la composition et la structure des granulats recyclés est différentes de celles des granulats naturels, les GR sont des composites à deux phases, un granulats naturel et un mortier adhérent, les caractéristiques mécaniques et physiques des GR dépendent essentiellement de la qualité du béton source (déchet broyer). La substitution des granulats naturels par des granulats recyclés permet d'obtenir un béton qui s'appelle béton recyclé, alors l'incorporation des GR rend les propriétés du béton recyclé différentes de celles du béton naturel préparé uniquement avec des GN, cependant, les propriétés du béton recyclé sont influencées par la qualité et le taux des GR dans le béton [79].

## 1.2 Recyclage des déchets de la construction et de la démolition

Chaque activité humaine a un impact sur la nature. Ces impacts peuvent détériorer l'environnement à un niveau plus ou moins élevé. L'industrie de la construction est l'un des secteurs économiques qui ont un impact environnemental important, qui se traduit par une forte consommation des énergies, et une hausse de la demande des ressources naturelles non renouvelables, ainsi que la production des gazes polluant qui provoquent l'effet de serre. Le secteur de la construction est un grand consommateur de ressources naturelles, et la production mondiale de granulats a presque doublé de 21 milliards de tonnes en 2007 à 40 milliards de tonnes en 2014, cela est une indication des vastes projets de développement

qui se concrétisent dans le monde entier.



### GLOBAL AGGREGATE PRODUCTION -- 40 BILLION TONS

FIGURE 1.1 – Production mondiale des granulats [69]

Le béton est le matériau de construction le plus important sur la planète, en termes de volume et de chiffre d'affaires. Son succès provient, entre autres, de son extraordinaire polyvalence et de sa disponibilité pratiquement partout sur terre, aussi il est considéré comme le matériaux le plus utilisé dans le domaine de la construction, à savoir les ouvrages de génie civil, comprenant les barrages, les ponts, les tunnels, les bâtiments et les routes, sa consommation ne cesse de croître, la fabrication du béton nécessite des granulats naturels, comme le sable et le gravier. On estime que l'émission de dioxyde de carbone provenant de la production de béton est environ 1.35 milliard de tonnes par an, soit environ 7 % du total des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. De plus, le domaine de la construction produit d'énormes quantités de déchets qui sont mises en dépôt et occupent de grandes surfaces, ainsi le stockage de ces déchets détruit aussi sa part l'environnement. Ces déchets proviennent de la construction neuve, des travaux de réhabilitation et des démolitions. Selon une étude du CSI (CSI.2009), l'estimation des déchets de la construction et de la démolition attribue une large portion au béton.

Afin de réduire l'impact sur l'environnement, la construction durable est devenue l'objectif

Country	Total C&DW (Mt)	Total C&DW Recovery (Mt)	% C&DW Recovery
Australia <sup>15</sup>	14	8	57
Belgium <sup>16</sup>	14	12	86
Canada <sup>17</sup>	N/A	8 (recycled concrete)	N/A
Czech Republic <sup>18</sup>	9 (incl. 3 of concrete)	1 (recycled concrete)	45 (concrete)
England <sup>19</sup>	90	46	50 – 90
France <sup>20</sup>	309	195	63
Germany <sup>21</sup>	201	179	89
Ireland <sup>22</sup>	17	13	80
Japan <sup>23</sup>	77	62	80
Netherlands <sup>24</sup>	26	25	95
Norway <sup>25</sup>	N/A	N/A	50 – 70
Portugal	4	Minimal	Minimal
Spain <sup>26</sup>	39	4	10
Switzerland <sup>27</sup>	7 (incl. 2 of concrete)	2	Near 100
Taiwan <sup>28</sup>	63	58	91
Thailand <sup>29</sup>	10	N/A	N/A
US <sup>30</sup>	317 (incl. 155 of concrete)	127 (recycled concrete)	82

FIGURE 1.2 – La récupération des déchets de la construction et de la démolition dans certains pays au monde [70].

de plusieurs pays, où la consommation des ressources naturelles est plus élevée, donc la recherche des alternatives aux matières premières est importante. L'une des solutions les plus efficaces d'un point de vue économique, environnemental et technique est le recyclage des déchets de la construction et de la démolition pour produire des granulats recyclés. Afin de valoriser les déchets issus de la construction et de la démolition, et aussi pour limiter l'utilisation des ressources naturelles, le recyclage de ces déchets semble être une solution prometteuse. Il permet de répondre aux problèmes concernant la pénurie en ressources naturelles et de réduire leur impact environnemental. Par ailleurs, le coût de la mise en décharge après déconstruction devient de plus en plus élevé.



FIGURE 1.3 – Déchets de la démolition et de laboratoire.

### 1.2.1 Avantages environnementaux de l'utilisation des granulats recyclés

Le domaine de la construction est confronté à un défi le plus difficile dans son histoire, comment conserver la continuité de ce domaine face à la pénurie croissante des ressources non renouvelables [39]. Le recyclage des déchets de la construction et de la démolition doit donc être développé [61], pour plusieurs raisons principales :

1. Bien que les ressources minérales naturelles qui servent à produire le béton soient quasi inépuisables comme le calcaire, les argiles et les roches dures, l'ouverture de nouvelles carrières pour produire des granulats à distance raisonnable des villes est devenue un réel défi dans de nombreux pays [29, 71].
2. La mise en décharge des déchets de destruction et de démolition est de plus en plus prohibée dans plusieurs pays dans le monde.
3. Il existe une pression sociale pour réduire les distances de transport des matériaux depuis les sites de production jusqu'aux sites d'utilisation, afin de limiter les émissions de CO<sub>2</sub> et l'impact du trafic des camions sur la population. Comme les matériaux de démolition sont principalement générés dans les villes, là où de nouveaux chantiers de construction ont besoin d'être alimentés, l'utilisation des déchets de la construction et de la démolition dans une nouvelle construction a alors un avantage, elle réduit, à l'échelle de la zone urbaine, les transports générés à la fois par l'évacuation et par l'approvisionnement des matériaux.
4. Le béton doit rattraper les autres matériaux (acier, bitume, etc.) pour lesquels les procédés et les circuits de recyclage existent depuis des années.

### 1.2.2 Fabrication des granulats recyclés

Les granulats recyclés produits industriellement proviennent généralement d'ouvrages démolis [68, 69]. Ils contiennent de ce fait une large variété de bétons de composition et de propriétés différentes associées à une plus ou moins grande proportion de corps étrangers (par exemple, de la brique en terre cuite, des enrobés bitumineux, du verre, du plâtre, etc.). La plupart des granulats recyclés contiennent donc une variété de composants minéraux (pierre, mortier, brique, plâtre. . . et autres matériaux de médiocre qualité). Pour pouvoir valoriser au mieux les GR (granulats recyclés), il est alors nécessaire d'améliorer leur uniformité et de réduire au maximum les contaminants. Toutefois, le niveau d'homogénéité et de pureté requis dépend directement de leur réutilisation. En revanche, pour être réutilisés dans de nouveaux bétons, la présence de mortier adhérent aux granulats, de débris de briques, et d'autres éléments tels le verre ou le bois doit être réduit. C'est pourquoi la composition des GR destinés à être recyclés dans le béton a été précisée par les normes. Ainsi, ils doivent contenir au moins 90 à 95% de béton ou de granulats naturels, et avoir un taux de contaminant généralement inférieur à 1 % de la masse totale du produit.

Les déchets de la construction et de la démolition sont transportés vers une plateforme de recyclage, à l'entrée, les déchets sont inspectés et réceptionnés visuellement, triés puis stockés sur des aires appropriées distinctes, les gros blocs de béton sont réduits à l'aide de matériels dédiés, les matériaux sont ensuite scalper et concassé, Les matériaux obtenus sont criblés en plusieurs coupures afin d'obtenir des granulats recyclés.

## 1.3 Composition des granulats recyclés

Un granulat recyclé (GR) est un matériau composite constitué de deux phases distinctes, la première phase est constituée d'un granulat naturel GN, et la deuxième est constituée d'une pâte cimentaire généralement adhérente au granulat naturel, elle peut enrober le granulat naturel totalement ou partiellement, alors le taux de chaque phase est en fonction de la composition du béton initial, la différence entre un granulat naturel et un granulat recyclé se présente au niveau de la pâte cimentaire, le granulat naturel est monophasique, tandis que le granulat recyclé est bi phasique, les propriétés physiques et mécaniques des GR dépendent essentiellement des propriétés des deux phases (GN et pâte cimentaire) qui constitue le GR, la pâte cimentaire adhérente présente une porosité élevée, ce qui modifie les caractéristiques des GR et les rend différentes de celles des GN.



FIGURE 1.4 – Image correspondante à un granulat recyclé, granulat naturel entouré de mortier adhérent [43]

## 1.4 Propriétés des granulats recyclés

### 1.4.1 Granulométrie

L'analyse granulométrique a comme but de déterminer la distribution en poids des particules d'un matériau suivant leurs dimensions, d'après les études antérieures la granulométrie des granulats recyclés est presque identique à celle des granulats naturels, car la procédure de fabrication (concassage, broyage) des granulats recyclés est la même avec celle utilisée pour obtenir les granulats naturels.

D'après Kou et al [54], la granulométrie du sable recyclé s'approche de celle du sable naturel, le module de finesse (MF) du sable naturel est de 3.09 alors il est conforme avec ASTM C33 qui recommande que le MF doit être entre 2.3 et 3.1, tandis que le MF du sable recyclé est de 3.49, il dépasse la limite recommandée, le coefficient d'uniformité (Cu) du sable naturel et du sable recyclé sont de 8.8 et 6.42 respectivement, tandis que les valeurs du coefficient de courbure (Cc) sont de 1.47 et 1.61, respectivement.

Rahal et al [55] a fait l'analyse granulométrique des granulats naturels et recyclés de trois grades, 9.5 mm et 12.5 mm et 19 mm, ils ont observé que les granulats recyclés sont fins par rapport aux granulats naturels.

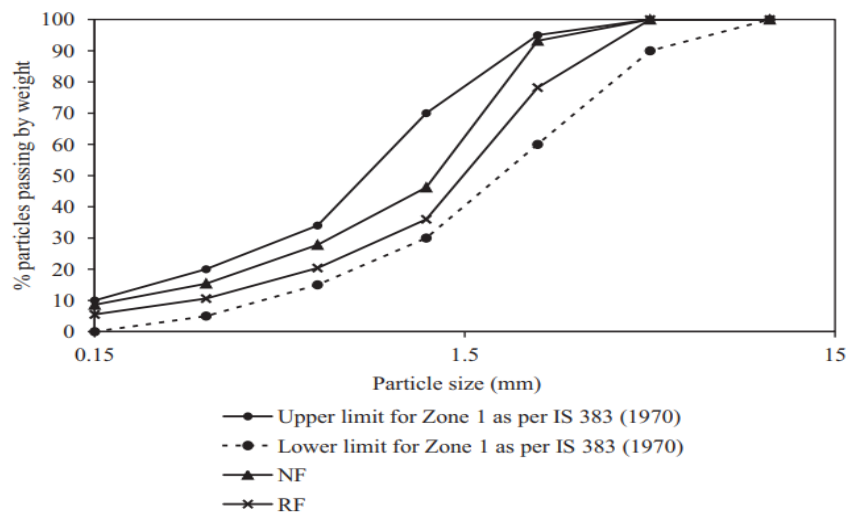


FIGURE 1.5 – Résultats d’absorption [54]

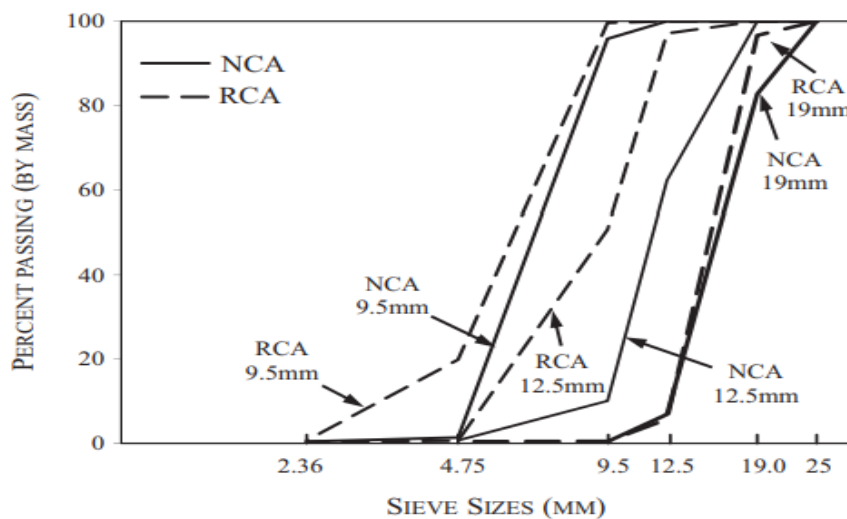


FIGURE 1.6 – Résultats d’analyse granulométrique [55]

### 1.4.2 Masse volumique

La masse volumique apparente est la masse du matériau occupant un volume en prenant en compte les vides entre les grains, tandis que la masse volumique absolue est la masse du matériau occupant un volume sans tenir compte du volume des vides qui se situent entre les grains.

La masse volumique des granulats recyclés est inférieure à celle des granulats naturels, et cette diminution de la masse volumique est due à la présence de la pâte cimentaire autour du granulat recyclé, car cette pâte contient des vides et des pores qui induisent une diminution de la densité [34, 56].

TABLE 1.1 – Masse volumique du sable et du gravier recyclé [kg/m<sup>3</sup>]

Référence	Sable naturel	Sabla recyclé	Gravier naturel	Gravier recyclé
Puthussery et al [54]	2560	2010	2640	2580
Puthussery et al [34]	/	/	2440	2360
Rangel et al [56]	/	/	2639,5	271,2
Xiao et al [75]	/	/	2634	2620

### 1.4.3 Absorption

La capacité d'absorption des granulats est un paramètre important pour la confection du béton [5], les investigations scientifiques antérieures ont montré que l'absorption des granulats recyclés est supérieure à celle des granulats naturels [3], ce qui s'explique par la présence de la pâte cimentaire autour du granulat naturel qui contient des vides qui absorbent de l'eau.

D'après Arezoumandi et al [12], la capacité d'absorption du sable naturel et du sable recyclé est de 0,28% et 9,2%, respectivement, et celle du gravier naturel et du gravier recyclé est de 0,37% et 4,92%, respectivement.

Katkhuda et al [49] ont mesuré l'absorption de différents types de granulats naturels et recyclés pour une durée supérieure à 24H, d'après la figure suivante, on remarque que l'absorption des granulats naturels est comprise entre 0,8% et 1,7%, et celle des granulats recyclés est entre 6,4% et 8,2%.

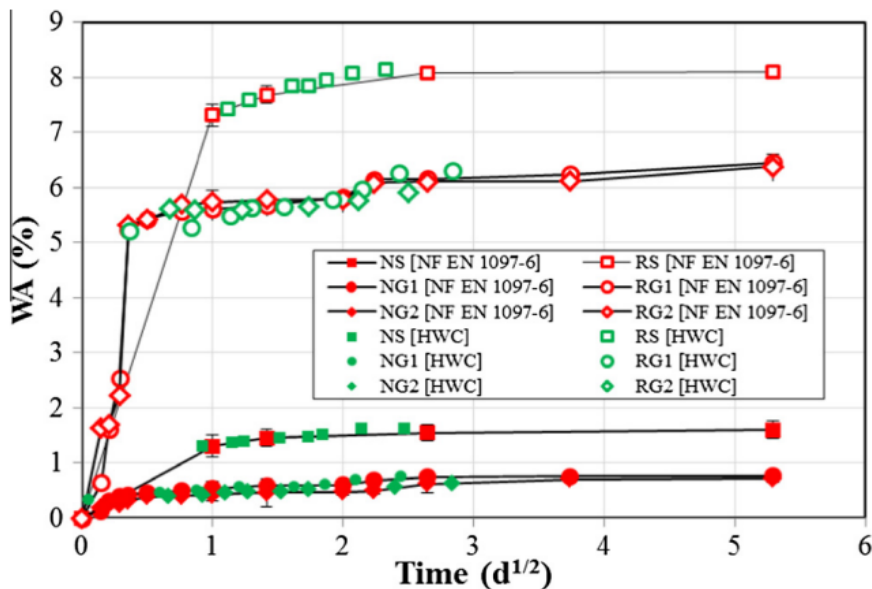


FIGURE 1.7 – Résultats d'analyse granulométrique [49]

### 1.4.4 Résistance à l'usure

L'objectif est de déterminer les résistances combinées à la fragmentation par le choc et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat, le teste fréquemment utilisé est le teste Los Angeles (ASTM C.131.55) qui donne le coefficient  $C_{LA}$ , sachant qu'une valeur élevée du coefficient  $C_{LA}$  indique une perte de matière élevée, ce qui montre que le granulat présente une faible résistance à l'usure (abrasion). Shen et al [63] rapportent que le coefficient  $C_{LA}$  des granulats naturels sont de 20,2% et celui des granulats recyclés est de 40,8%, et d'après Andreu et al [3] le coefficient  $C_{LA}$  des granulats naturels est de 19,1% tandis que celui des granulats recyclés est de 24,31%.

On constate que les granulats recyclés présentent une faible résistance à l'usure par rapport aux granulats naturels, cela est dû à la présence de la pâte cimentaire dans le granulat recyclé, car cette pâte contient des vides qui induisent des désintégrations importantes.

## 1.5 Propriétés physiques et mécaniques du béton recyclé

La fabrication du béton nécessite l'utilisation d'un liant hydraulique (ciment) et des granulats naturels comme le sable et le gravier, les différents constituants du béton sont obtenus à partir des ressources naturelles. La forte demande de béton induit la détérioration de l'environnement via l'exploitation de plus en plus accrue des ressources naturelles et la consommation de l'énergie [72].

Alors afin de trouver un compromis entre l'industrie du béton et la pénurie des ressources naturelles, plusieurs chercheurs ont proposé l'utilisation des granulats issus de la récupération comme alternative à l'utilisation des granulats naturels [47, 41], ainsi, les études précédentes ont montré que les propriétés du béton recyclé sont inférieures à celles du béton naturel, la qualité des granulats recyclés et le taux de substitution des granulats naturels par ceux recyclés influent considérablement sur les propriétés du béton recyclé [55].

### 1.5.1 Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton est liée aux propriétés mécaniques des phases qui le constituent [76], dans le cas du béton recyclé (BR), plusieurs études décrivent l'influence de la substitution des granulats naturels par des granulats recyclés (GR)[51, 3], où la résistance à la compression du béton recyclé (BR) est comparée à celle du béton naturel (béton à base de granulats naturels) [82].

Raha et al [55], Younis et al [78], ont utilisé, dans leur étude, des granulats recyclés issus des déchets de la démolition des vieilles maisons et des vieux bâtiments, ils ont remarqué que l'augmentation du taux de remplacement des granulats naturels par des granulats du

béton recyclé diminue la résistance à la compression à l'âge de 28 jours, la résistance à la compression du béton naturel est de 35,8 MPa, tandis que celle du béton recyclé (le remplacement égale est à 100%) est de 31 MPa, alors la diminution de la résistance est de 13%, et pour un pourcentage de substitution de 20 et 50% la diminution de la résistance est de 4,8 et 3,9%, respectivement.

Francesconi et al [20] ont, de leur part, remarquent que la résistance à la compression du béton, pour un taux de remplacement de 100% la résistance à la compression diminué de 29%.

Puthussery et al [54] ont étudié l'effet de l'incorporation des granulats recyclés fins et grossiers sur les propriétés du béton, Ngo et al [47] ont étudié l'effet de l'ajout du sable et du gravier recyclé sur les propriétés du béton, ils ont constaté que la résistance à la compression du béton recyclé est plus faible que celle du béton à base de granulats naturels, plus le taux de substitution est élevé plus la résistance est faible.

Pedro et al [51] ont évalué l'effet de l'incorporation des granulats du béton recyclé (GR) obtenu à partir de différentes sources, la première source est un béton de résistance faible (20MPa), la deuxième est un béton moyen de résistance (45 MPa), la troisième est un béton de haute résistance (65 MPa), la diminution de la résistance à la compression du béton recyclé est en fonction de la source (béton de résistance faible, moyenne, haute), l'incorporation des GR issus du béton de faible résistance induit une diminution comprise entre 9 et 17.7% , tandis que la diminution observée lors de l'utilisation des GR issus du béton de résistance moyenne et de haute résistance, est comprise entre 3.2-7.6% et 3-8.1%, respectivement, on remarque que la grande diminution de la résistance à la compression est donnée par le béton recyclé à base de GR obtenu à partir du béton de faible résistance, cela est dû à l'utilisation des GR de qualités inférieures, cette diminution de résistance semble être causée par les fissures qui se produisent entre le granulats naturels et la pâte de ciment aussi dans la pâte de ciment elle-même. Le comportement du béton est aussi influencé par l'incorporation des GR. La forme de la courbe contrainte déformation du béton naturel ne sera pas la même que celle du béton recyclé, Munir et al [46] ont observé un changement de comportement lorsque les granulats naturels sont remplacés par des granulats de béton recyclé, la forme de la courbe contrainte déformation change avec l'augmentation du taux de substitution des granulats naturels par ceux recyclés, la courbe de comportement en compression du béton recyclé présente une réduction de la pente au niveau de la branche descendante (phase post pic), et aussi une réduction de la contrainte au pic, d'après les informations disponibles dans le travail de XIAO et al [75], sous une compression uni axial, la déformation au pic des contraintes augmente avec l'augmentation du taux du remplacement des GN par des GR, la cause principale de l'augmentation de la déformation au pic des contraintes est le faible module élastique du béton recyclé par rapport à celui du béton naturel, et la Figure 3 dans le travail de XIAO et al [75] montre que la phase post pic du béton recyclé est différente de celle du béton naturel, la diminution de la pente de la courbe traduit la rupture fragile du béton recyclé.

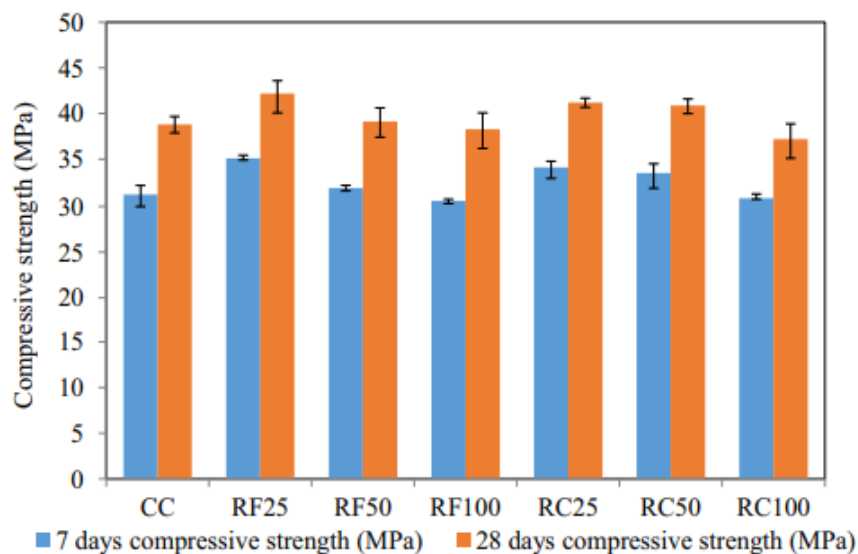


FIGURE 1.8 – Effet des granulats recyclés sur la résistance à la compression à 7 et 28 jours de divers mélanges de béton [54]

### 1.5.2 Résistance à la flexion

L'introduction des granulats recyclés (GR) induit une légère diminution de la résistance à la flexion du béton non armé, pour un taux de substitution de 50%, la résistance à la flexion diminue de 5% par rapport à celle du béton de référence, Fiol et al [19] ont conduit une recherche dans laquelle ils ont utilisé des granulats recyclés (GR) obtenus après concassage des éléments préfabriqués (poutres, pannes) où la résistance à la compression est comprise entre 30 et 50 MPa, ce qui permet d'avoir des GR de bonne qualité, ils ont observé que pour un taux de remplacement des granulats naturels par des GR de 20% et 50%, la résistance à la flexion est améliorée de 1,6 et 2,4%, respectivement, ceci est attribué à la bonne qualité des GR (module élastique), mais le remplacement total (100%) des GN par des GR induit une diminution de 9,6%.

Thomas et al [71], ont utilisé des GR qui ont été produit à partir des déchets de béton provenant de la démolition où la résistance du béton d'origine est de 25 MPa, d'après leurs résultats, la résistance à la flexion du béton est influencée par la présence des GR, une diminution de la résistance a été observée lorsque les granulats naturels (GN) sont remplacés par des granulats recyclés (GR), pour un taux de remplacement de 25% la résistance à la flexion diminue de 2% à 5%, et dans le cas d'un remplacement total (100%) des GN par des GR, la diminution de la résistance est comprise entre 7% et 17%, les principaux facteurs affectant la résistance à la flexion du béton recyclé sont la forme des granulats, leurs états de surface, et le module élastique, la résistance à la flexion du béton est influencée par les propriétés élastiques des agrégats, la diminution du module élastique des granulats recyclés entraîne une réduction de la résistance à la flexion du béton recyclé.

Dans l'essai de flexion à trois points des poutres de béton recyclé, où le taux de remplacement est de 100%, Casuccio et al [10] ont observé que l'énergie de rupture, la résistance à

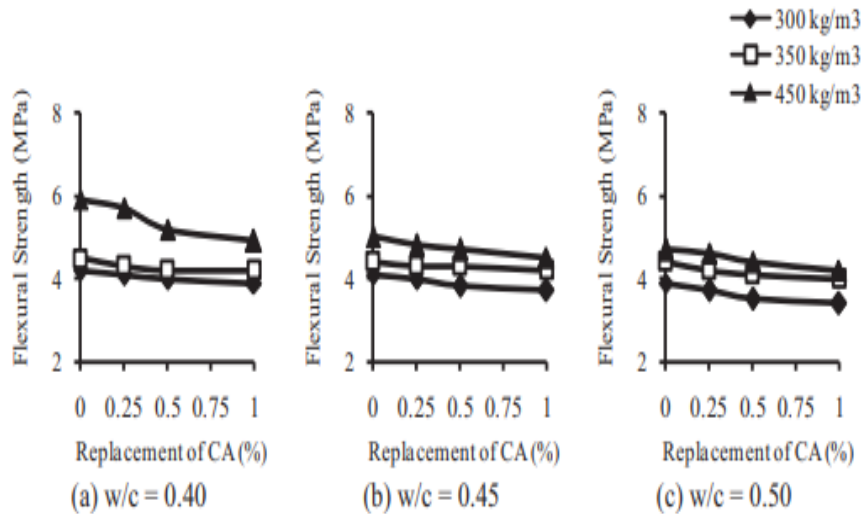


FIGURE 1.9 – Effet du remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés sur la résistance à la flexion du béton [71]

la flexion, le déplacement max au pic, sont tous affectés par l’incorporation des granulats recyclés GR, l’augmentation du déplacement au pic est compris entre 15 et 25%, par rapport à celui du béton naturel, la réduction de la résistance à la flexion est comprise entre 7 et 20%, tandis que l’énergie de rupture diminue de 30 à 44%, d’après les courbes de comportement, le béton recyclé présente une branche descendante plus raide que le béton naturel, ce qui signifie sa perte rapide de ductilité. Kazemian et al [35] ont aussi observé que l’énergie de rupture diminue avec l’incorporation des GR, l’énergie de rupture est très affectée par les effets négatifs des GR, en phase poste fissuration, les GR induisent une baisse plus intensive de l’énergie.

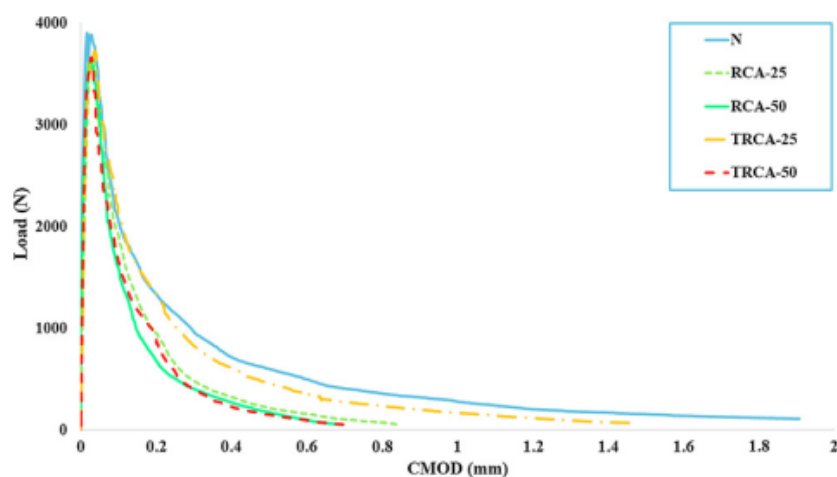


FIGURE 1.10 – Courbe force – CMOD [35]

### 1.5.3 Module de Young

Le module de Young est l'une des propriétés mécaniques qui caractérise le matériau béton, sa valeur dépend des phases qui constituent le composite, d'après la littérature le module de Young du béton recyclé présente une différence par rapport à celui du béton naturel, cette différence est due à la présence des granulats recyclés (GR) qui ont des caractéristiques mécaniques différentes de celle des granulats naturels.

D'après Rangel et al [56], la substitution totale des granulats naturels par des granulats recyclés engendre une diminution du module de Young, la réduction est estimée à 4%. Pedro et al [51] ont montré que le module de Young de béton recyclé dépend essentiellement des caractéristiques mécaniques des granulats, d'après leurs résultats, les granulats recyclés obtenus d'un béton de résistance moyenne fait diminuer le module du Young de 22%, et l'incorporation des GR obtenus d'un béton de bonne résistance engendre une diminution du module de Young de 15% à 18%. Arezoumandi et al [4] ont remarqué que l'augmentation du taux de substitution des GN par des GR induit une diminution de module du Young du béton, pour un taux de remplacement de 50%, le module de Young diminue de 10% par rapport au module de Young du béton naturel, et pour un taux de remplacement de 100%, le module de Young diminue de 19%, cette diminution est attribuée aux GR qui présentent des faibles caractéristiques mécaniques par rapport à celle des GN, cela est attribué à la présence de la vieille pâte cimentaire dans le GR, qui induit une diminution de la rigidité. Selon les résultats

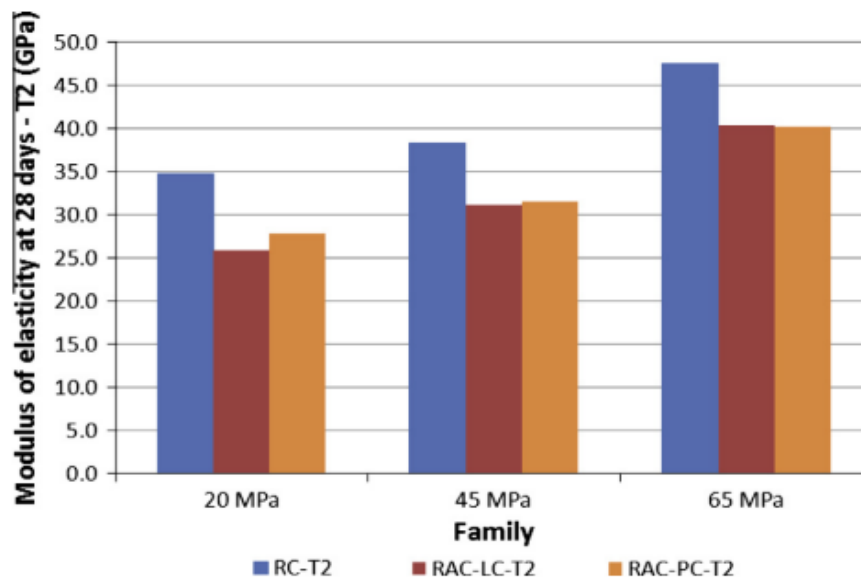


FIGURE 1.11 – Module élastique du béton recyclé [51]

de Duan et al [17], le module élastique du béton recyclé dépend des propriétés mécaniques des granulats qui le constituent, l'utilisation des GR de bonne qualité donne un module élastique qui est au voisinage de celui du béton naturel, mais les GR qui contiennent un taux élevé de vieux mortier engendrent une diminution du module élastique, aussi le module de Young est affecté par le taux de remplacement des GN par des GR. D'après Seara et al [59] la diminution du module de Young est en fonction du taux de remplacement, pour un taux

de substitution de 20%, la diminution du module de Young du béton recyclé est comprise entre 7 et 10% par rapport à celle du béton naturel, pour un taux de remplacement de 50%, la diminution est comprise entre 13 et 22%, et pour un taux de remplacement de 100%, la diminution est comprise entre 28 et 31%, donc plus en augmente le taux de substitution, le module de Young diminue. Michael et al [44] ont réalisé une étude dans laquelle ils ont utilisé différents types de granulats recyclés obtenus de différentes sources, d'après leurs résultats, le module de Young du béton à base des GR diminue par rapport à celui du béton naturel, la moyenne de diminution est de 26,4% pour un taux de remplacement de 50%, pour un taux de remplacement de 100%, la moyenne de diminution du module de Young est de 34,4%.

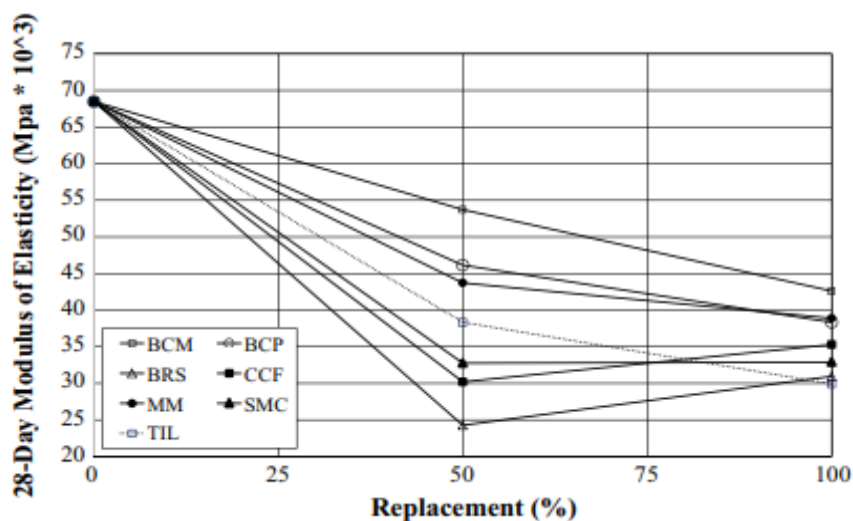


FIGURE 1.12 – : Module de Young en fonction du taux de remplacement [44]

La présence de la pâte cimentaire dans les GR diminue la rigidité de ces derniers, à cause de la présence des vides, la déformation des GR est plus élevée par rapport à la déformation des GN, donc le module de Young des GR est inférieur à celui des GN, comme il a été bien montré par Andreu et al [3], le module de Young du béton recyclé est très sensible aux propriétés des GR et au taux de remplacement des GN par des GR, le module élastique de béton recyclé est influencé par le module élastique des GR, le béton recyclé possède un module de Young inférieur à celui du béton naturel, cela est dû aux propriétés mécaniques des GR qui affectent négativement le module de Young du béton recyclé.

#### 1.5.4 Vitesse ultrason

Le temps mis par une onde ultrasonique à parcourir une distance donnée dans l'élément béton, permet d'évaluer la qualité de ce dernier, par l'analyse de la vitesse des ondes ultrasoniques VOU, la valeur de la VOU dépend de la structure du béton, et des propriétés élastiques des matériaux qu'elles traversent, car la présence des vides retarde la propagation des ondes, le principe d'évaluation de la qualité du béton est que des vitesses relativement plus élevées sont obtenues lorsque la qualité du béton en matière de densité, d'homogénéité

et d'uniformité est bonne.

Dans les travaux antérieurs, plusieurs chercheurs ont étudié l'effet de la présence des granulats recyclés dans le béton sur la propagation des ondes ultrason, car les GR changent la structure et les propriétés du béton recyclé, ce qui influe directement la propagation de la VOU, d'après Andreu et al [3] la VOU diminue avec l'augmentation du taux de remplacement des GN par des GR, cela est expliqué par la diminution de la qualité du béton recyclé, car les GR favorisent l'augmentation de la porosité qui affecte la transmission des ondes ultrasons. Kou et al [37] ont observé que pour un taux de remplacement de 100%, la vitesse des ondes ultrason diminue de 8% à 16% par rapport à la VOU dans un béton naturel, la VOU du béton à base des granulats de béton recyclé est inférieure à la VOU dans un béton naturel, cela pourrait être attribué à la porosité élevée et à la faible densité des GR par rapport au GN, aussi la capacité d'absorption d'eau élevée qui caractérise les GR induit un volume plus élevé de vides capillaires dans le béton recyclé, et aussi les micro-fissures dans la vieille pâte cimentaire, causant la réduction de la capacité du béton pour transférer l'onde ultrasonique. Kwan et al [38] ont effectué des tests ultrason pour le béton recyclé à différents

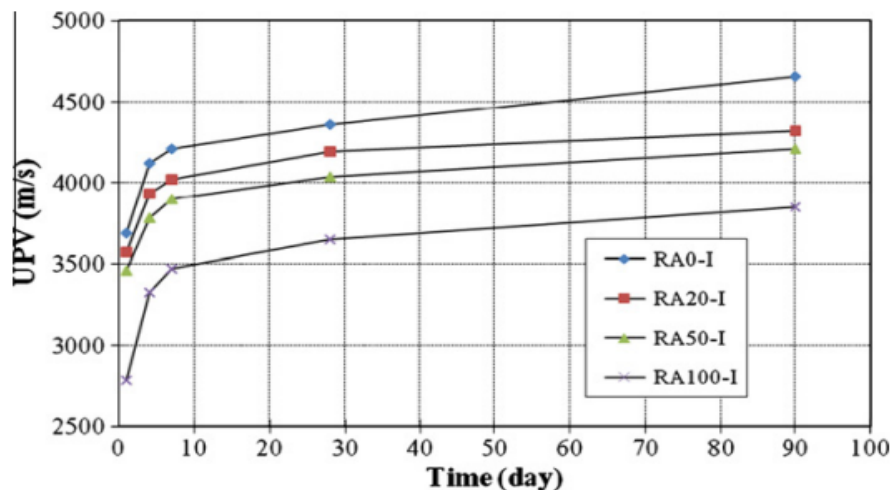


FIGURE 1.13 – développement des VOU [37]

taux de remplacement des GN par des GR, ils ont observé que la vitesse des ondes ultrason diminue avec l'augmentation de taux des GR dans le béton, cette diminution s'explique par la présence des pores dans le béton surtout au niveau de la vieille pâte cimentaire, et ces pores réduisent la propagation des ondes.

Selon Fiol et al [19], les VOU dans un béton naturel sont de 4980 m/s, et la substitution des GN par des GR de 20% réduit la VOU à 4870 m/s, et un remplacement de 50% et 100%, donne des VOU de 4830 m/s et 4750 m/s, respectivement, alors la diminution est entre 2% à 5%. Pedro et al [51] ont aussi observé une diminution des ondes ultrason de 2,6% à 5,4% lors de la substitution des GN par des GR. D'après les résultats de Kappor et al [33], la vitesse des ondes ultrason diminue avec l'augmentation de taux de remplacement des GN par des GR, pour un remplacement de 50%, les valeurs de la VOU diminuent légèrement de 3% et 3,2%, par rapport aux VOU dans un béton naturel, de même pour un taux de remplacement de 100%, les valeurs de la VOU diminuent de 8,5 % par rapport aux VOU dans un béton naturel.

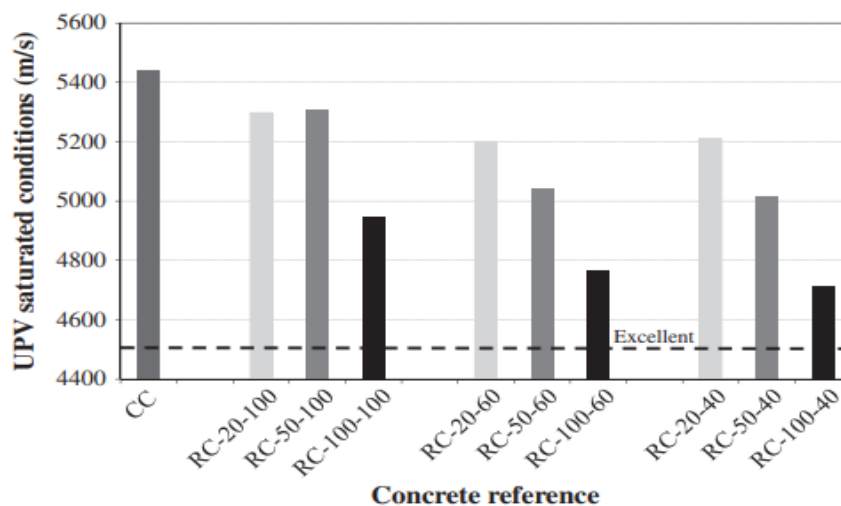


FIGURE 1.14 – développement des VOU en fonction du remplacement des GN par des GR [3]

### 1.5.5 Masse volumique

Les travaux antérieurs ont montré que les propriétés physiques des granulats recyclés et des granulats naturels sont généralement différentes, parmi ses propriétés la densité ou le poids, comme il a été constaté que la densité des GR est inférieure à celle des GN [34, 56], ce qui est dû essentiellement à la présence des vides et des pores dans le vieux mortier, alors le béton produit avec les GR connaîtra une diminution de la densité.

Omary et al [49] ont observé que la densité du béton recyclé est liée à sa porosité, l'augmentation de la substitution des GN par des GR augmente la porosité, ce qui conduit à la diminution de la densité. D'après Puthussery [54] la substitution des GN par des GR à un taux de 25%, induit une diminution de la densité qui est comprise entre 0,36% et 0,55%, pour un taux de remplacement de 50% la diminution de la densité est comprise entre 2,47% et 2,9%, et pour un remplacement total, la diminution est de 4,9% à 6,07%, alors l'augmentation du taux de substitution engendre une diminution de la densité du béton.

La même observation est faite par Dong et al [16], la densité du béton naturel est de  $2390.4 \text{ Kg}/m^3$ , cette densité diminue avec l'ajout des GR dans le béton, un taux de substitution de 50% donne une densité de  $2384.4 \text{ Kg}/m^3$ , et pour un remplacement de 100%, la densité est de  $2344.2 \text{ Kg}/m^3$ , alors la densité du béton recyclé diminue avec l'augmentation des taux de substitution, ceci est relié à la faible densité des GR par rapport à la densité des GN.

Andreu et al [3] ont utilisé différents types de granulats obtenus après broyage de différents bétons, d'après leurs résultats, la substitution des GN par des GR d'un taux de 20%, la densité du béton diminue en moyenne de 1,6%, lorsque la substitution est de 50%, la diminution de la densité et en moyenne de 2,92% et la diminution de la densité la plus élevée est donnée par un remplacement de 100%, une diminution moyenne de 4,78%, on remarque que plus le

taux des GR augmente dans le béton, plus la densité a tendance à diminuer.

Dilbas et al [13] ont aussi observé la diminution de la densité du béton, lorsqu'on ajoute des GR dans la formulation du béton, la densité du béton préparé avec des granulats naturels est de  $2478 \text{ Kg}/m^3$ , le remplacement des GN par des GR avec un pourcentage de 30% réduit la densité à  $2234 \text{ Kg}/m^3$ , un remplacement de 40% réduit la densité à  $2202 \text{ Kg}/m^3$ , et pour une substitution de 70%, la densité est de  $2038 \text{ Kg}/m^3$ , la diminution de la densité est liée directement à la capacité d'absorption des GR qui est plus élevée par rapport à celle des GN, à cause de la présence des vides dans la pâte cimentaire dans les GR, et ceci engendre la diminution de la densité des GR, et d'après cette information, on peut déduire que l'incorporation des GR dans le béton rend le matériau plus poreux, ce qui entraîne une diminution de la densité.

## 1.6 Microstructure du béton recyclé

Le béton est un matériau composite constitué de mortier et de granulats [62]. Le mortier est constitué de ciment et de sable/eau, qui a le rôle de lier les granulats dans le béton. Dans le cas d'un béton naturel (classique-ordinaire), la microstructure peut être représentée par trois phases : le mortier (matrice), les granulats, et la zone d'interphase ITZ<sup>1</sup> entre le granulat naturel et le mortier. Dans le cas d'un béton recyclé où les granulats naturels sont substitués par des granulats recyclés totalement ou partiellement, la présence des granulats recyclés (mélange de vieux mortier VM et du granulat d'origine GO) induit l'apparition d'une microstructure spécifique dans le béton recyclé. On distingue alors l'apparition de nouvelles zones d'interphases ITZ entre les granulats recyclés et le nouveau mortier. La microstructure du béton recyclé peut contenir trois zones d'interphases selon Zhang et al [81] :

La première se situe entre le granulat d'origine et le nouveau mortier, notée par ITZ<sup>1</sup>.

La deuxième entre le granulat d'origine et le vieux mortier ITZ<sup>2</sup>.

La troisième zone d'interphases ITZ<sup>3</sup> entre le vieux mortier et le nouveau mortier.

Donc la microstructure du béton recyclé est constituée d'un nouveau mortier, de granulats recyclés (mélange de granulats d'origine et de vieux mortier), et de granulats naturels avec la présence de trois zones d'interphases (ITZ<sup>1</sup>, ITZ<sup>2</sup>, ITZ<sup>3</sup>) [80].

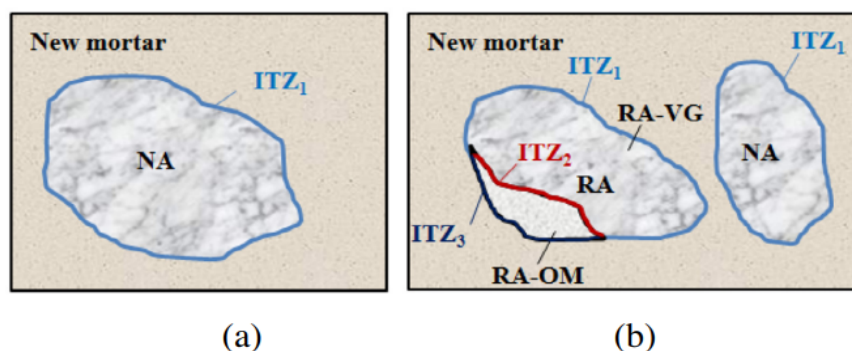


FIGURE 1.15 – Schéma de la microstructure du béton : (a) béton naturel, (b) béton recyclé [81].

## 1.7 Modèles numériques pour le béton recyclé

L'obtention d'une expression analytique pour décrire le comportement du béton recyclé [52, 24], est souhaitable pour l'analyse et la conception structurelles dans de nombreuses applications pratiques d'ingénierie [60, 11, 40, 31]. En général, les modèles mathématiques qui décrivent le comportement du béton recyclé, s'appuient sur des modèles cohérents établis pour le béton conventionnel [23, 28, 45], mais l'utilisation de ces modèles peut présenter quelques restrictions liées à la nature du granulat recyclé et au taux de remplacement maximum du granulat naturel.

### 1.7.1 Modèle de Da Silva pour le béton recyclé en compression

Da Silva et al [64] ont proposé un modèle numérique pour décrire le comportement du béton recyclé en compression, en utilisant un modèle d'endommagement isotrope adapté à la variation du taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés. Le modèle isotrope de Mazars a été utilisé comme équation constitutive pour le béton et ses paramètres d'ajustement, A et B, ont été écrits sous forme de polynômes quadratiques en fonction du taux de remplacement des granulats.

Pour assurer le meilleur ajustement du modèle aux données expérimentales, les valeurs des paramètres A et B sont déterminées par l'application d'une méthode de régression. L'évaluation paramétrique doit commencer par le choix de la fonction d'erreur permettant l'évaluation de la réponse numérique par rapport à la réponse expérimentale. En utilisant la régression des moindres carrés, l'erreur est estimée par l'équation suivante :

$$Err = \sum_{i=1}^{i=n} [y_i^e(x_i - y_i^n(x_i, A, B))] \quad (1.1)$$

Avec :

Err : erreur globale.

$y_i^e$  : fonction des valeurs expérimentales  $(x_i, y_i)$

$y_i^n$  : fonction à ajuster en fonction de  $(x_i)$  et des paramètres du modèle A et B.

### 1.7.2 Modèle de Xiao

Xiao et al [75] propose une expression analytique pour la courbe contrainte déformation du béton recyclé. L'expression utilisée est adoptée pour le cas d'un béton ordinaire en compression uni axiale. Cette expression est développée pour le béton ordinaire, est étendue pour le cas du béton recyclé. La relation contrainte-déformation normalisée du béton

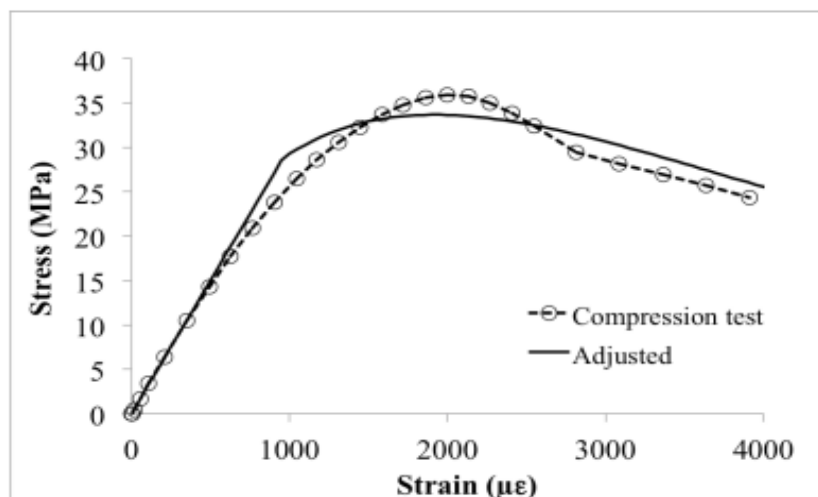


FIGURE 1.16 – Comportement du béton recyclé en compression, expérimentale et numérique [64]

recyclé est approximée par l'équation suivante :

$$\sigma = a\bar{\epsilon} + (3 - 2a)\bar{\epsilon}^2 + (a - 2)\bar{\epsilon}^3, \quad si \quad \bar{\epsilon} < 1 \quad (1.2)$$

$$\sigma = \frac{\bar{\epsilon}}{b(\bar{\epsilon} - 1)^2 + \bar{\epsilon}}, \quad si \quad \bar{\epsilon} \geq 1 \quad (1.3)$$

$\bar{\epsilon} = \epsilon/\epsilon_0$ ,  $\bar{\sigma} = \sigma/c$   $a$  et  $b$  sont des constantes à déterminer. Le paramètre  $a$  est la pente de la tangente initiale, qui reflète le module élastique initial du béton recyclé. Le paramètre  $b$  est lié à la surface sous la partie descendante de la courbe. En se basant sur les courbes contrainte-déformation expérimentales, les paramètres  $a$  et  $b$  ont été obtenus par une analyse de régression des données. Les résultats sont donnés comme suit :

$$a = 2.2(0.748r^2 - 1.231r + 0.975) \quad (1.4)$$

$$b = 0.8(7.6483r + 1.142) \quad (1.5)$$

Avec  $r$  le taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés.

### 1.7.3 Modèle du Bhikshma et Kishore

Bhikshma et Kishore [7] ont développé un modèle mathématique qui leur permet la modélisation du béton recyclé, ils supposent que l'équation proposée par Saenz et al [58] pour le béton en compression est également valable pour le béton recyclé, Pour exprimer le comportement contrainte-déformation du béton recyclé dans une forme adimensionnelle comme dans le modèle de Saenz et al [58] avec le rapport de déformation comme variable indépendante et le rapport contrainte comme variable dépendante du béton, les auteurs ont

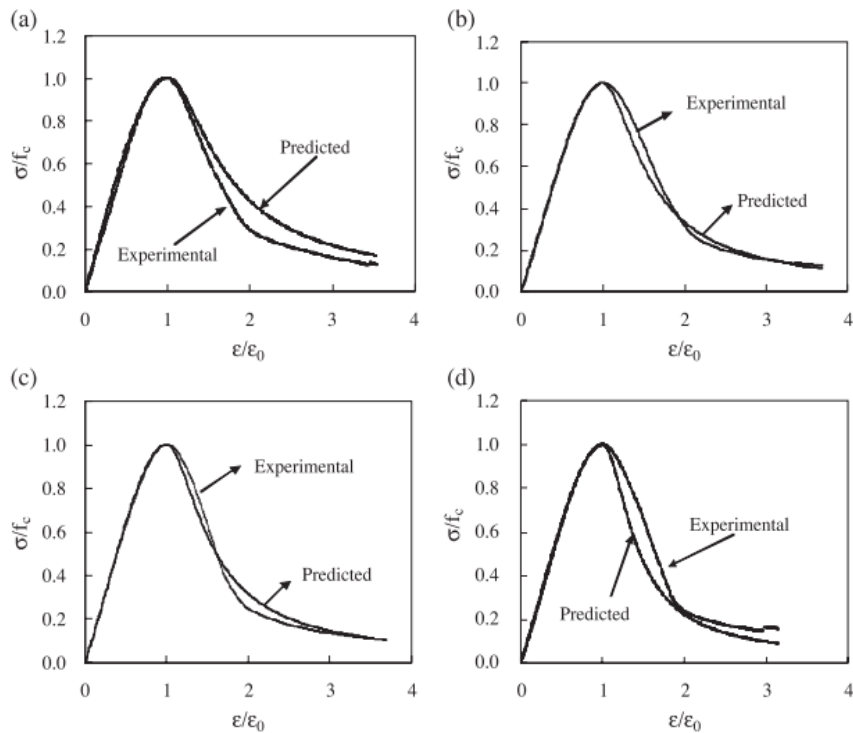


FIGURE 1.17 – Comparaison des courbes contrainte-déformation normalisées. (a)  $r=30\%$ , (b)  $r=50\%$ , (c)  $r=70\%$ , (d)  $r=100\%$  [75]

évalué les constantes à l'aide des conditions aux limites relatives à la courbe contrainte-déformation.

$$\frac{f}{f_u} = \frac{A'(\varepsilon/\varepsilon_u)}{1 + A'(\varepsilon/\varepsilon_u)^2} \quad (1.6)$$

Avec,  $A'$  et  $B'$  sont des constantes de la courbe contraintes déformations.

$\frac{f}{f_u}$  : rapopr de contrainte.

$\varepsilon/\varepsilon_u$  : rapport de déformation.

Les constantes  $A'$  et  $B'$  sont évaluées à l'aide des conditions limites relatives à la courbe contrainte-déformation.

### 1.7.4 Modèle de Rodrigues pour la flexion

Rodrigues et al [57], étudient le mécanisme de rupture du béton recyclé en tenant compte de l'hétérogénéité à échelle mésoscopique, en utilisant un modèle élément fini équipé d'un modèle d'endommagement en traction, le comportement en flexion trois points dans Casuccio et al [10] est analysé numériquement par le modèle, les résultats numériques obtenus montrent que le modèle multi-échelles est capable de représenter le mécanisme de rupture en traction du béton recyclé.

Un modèle d'endommagement en traction est utilisé pour représenter le comportement non linéaire du béton recyclé à l'échelle mésoscopique. Le modèle est formulé dans le contexte

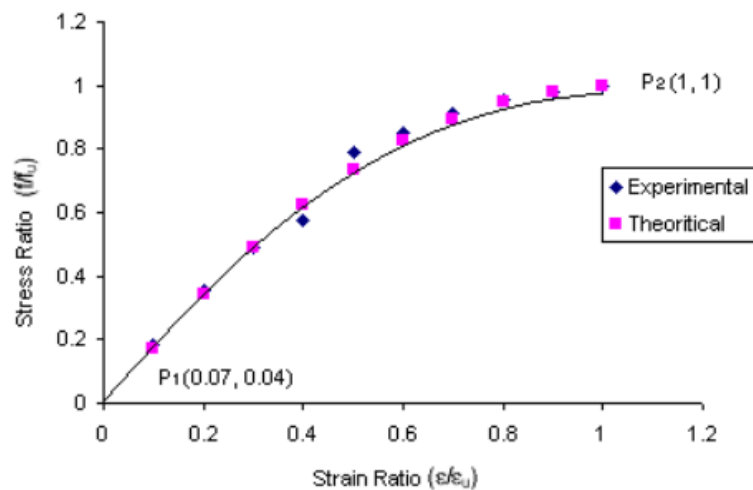


FIGURE 1.18 – Courbes contrainte-déformation pour le béton de granulats recyclés [7]

d'une variable scalaire d'endommagement, qui est appliquée pour représenter l'état du dommage du matériau. La variable d'endommagement  $d$ , peut aller de 0 pour le matériau sain à 1 pour le matériau complètement endommagé. A partir du tenseur de déformation  $\varepsilon$ , le tenseur de contrainte  $\sigma$  peut être calculer comme suit :

$$\bar{\sigma} = (1 - d)C : \varepsilon \quad (1.7)$$

où  $C$  est le tenseur élastique de quatrième ordre.

L'évolution de la variable d'endommagement est donné par la fonction exponentielle suivante :

$$d(r) = 1 - \frac{f_t}{r} e^{Ah(1-\frac{r}{f_t})} \quad (1.8)$$

$r$  est une variable interne qui contrôle le domaine élastique,  $h$  est l'épaisseur de l'élément d'interface,  $A$  est un paramètre qui est relié à l'énergie de rupture  $G_f$ , avec :

$$A = \frac{f_t^2}{G_f E} \quad (1.9)$$

$E$  est le module élastique.

## 1.8 Conclusion

Le béton recyclé présente des propriétés mécaniques et physiques différentes de celles du béton naturel, cette différence est attribuée à la composition de chaque type de béton, le béton naturel et confectionné uniquement avec des granulats naturels, par contre le béton recyclé et confectionné avec l'incorporation des granulats recyclés, ces derniers influent généralement sur les différentes propriétés du béton recyclé. La structure et la composition des GR sont différentes de celles des GN, la pâte cimentaire adhérente présente des vides et

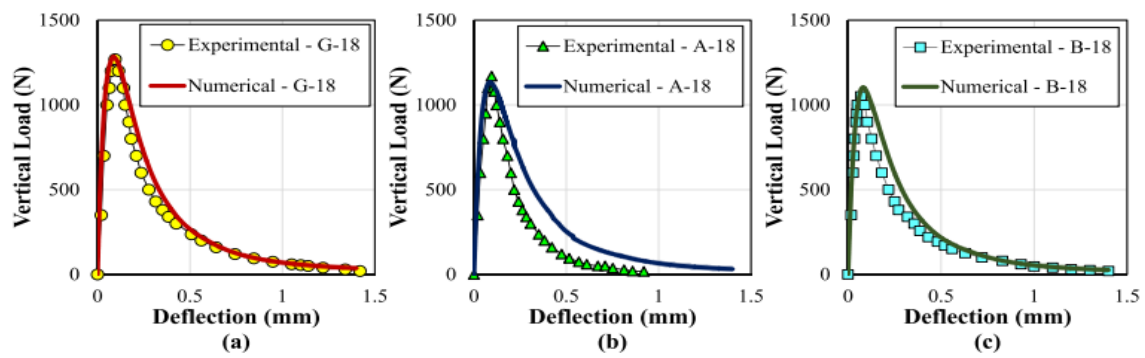


FIGURE 1.19 – Courbes force-flèche des poutres en béton recyclé [57].

des microfissures ce qui induit une diminution des propriétés élastiques des GR d'une part, d'autre part, la diminution des propriétés élastiques du béton recyclé, l'incorporation des GR induit généralement une diminution des résistances mécaniques, comme la résistance à la compression, la résistance à la traction et à la flexion, la forte absorption des GR qui est attribuée à la présence des vides induit une diminution de la densité, en conséquences la réduction de la capacité à transférer les ondes ultrason.

CHAPITRE 2

---

2.1	Introduction . . . . .	32
2.1.1	Estimation des propriétés d'un composite à deux phase . .	32
2.1.2	Effet du rapport d'aspect des renforts sur le comportement global . . . . .	33
2.1.3	Combinaison de la variation du rapport d'aspect et de la fraction volumique des renforts . . . . .	34
2.2	Composites multi-phases . . . . .	34
2.2.1	Composite à trois phases renforcé par deux types d'inclusions . . . . .	34
2.2.2	Composite à renforts alignés . . . . .	35
2.3	Estimation des propriétés élastique du béton recyclé . . . . .	36
2.3.1	Première étape d'homogénéisation . . . . .	38
2.3.2	Modèle GEEE . . . . .	38
2.3.3	Deuxième étape d'homogénéisation . . . . .	39
2.3.4	Troisième étape d'homogénéisation . . . . .	40
2.4	Homogénéisation des granulats recyclés . . . . .	41
2.5	Propriétés linéaires élastiques du béton recyclé . . . . .	41
2.5.1	Module de Young en fonction du taux de remplacement . .	41
2.5.2	Effet de la qualité des granulats recyclés sur le module de Young homogène . . . . .	43
2.6	Conclusion . . . . .	45

---

## 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous utilisons les méthodes d'homogénéisation à champs moyen pour prédire les propriétés linéaires élastiques des composites à deux phases. En premier lieu nous étudions l'effet du rapport d'aspect des inclusions sur le comportement global du composite à deux phases [73, 67], ensuite nous traitons l'influence de la fraction volumique sur les propriétés homogénéisées [32]. Les composites multi phases sont également étudiés, leur comportement global est déterminé par la stratégie d'homogénéisation à deux étapes. Ensuite, nous visons à développer un modèle élastique efficace pour prédire les propriétés du béton recyclé en utilisant trois étapes d'homogénéisation. Dans la première étape, les propriétés équivalentes des granulats recyclés (GR) sont obtenues en utilisant une approche d'homogénéisation basée sur le concept d'inclusion équivalente [22]. La micro-structure est divisée en grain à deux phases, chaque grain est constitué d'une matrice qui est le nouveau mortier (NM) et d'une famille d'inclusion (GN ou GR), les inclusions possèdent la même forme et la même orientation. Les propriétés homogénéisées de chaque grain peuvent être obtenues à l'aide d'un modèle d'homogénéisation. Les propriétés effectives du béton recyclé sont finalement obtenues avec un modèle approprié [53, 14, 8].

### 2.1.1 Estimation des propriétés d'un composite à deux phase

Un composite à matrice époxy renforcé par des inclusions sphériques en silice  $a_r = 1$ , le module élastique effectif du composite sera évalué par plusieurs méthodes d'homogénéisation, et cela pour différentes fractions volumiques des inclusions. Les propriétés des deux phases sont données dans le tableau 2.1 :

TABLE 2.1 – Propriétés de la matrice époxy et de l'inclusion silice

Phase	Matrice (epoxy)	Inclusion (silice)
E[GPa]	3.16	73.1
$\nu$	0.35	0.18

La figure 2.1 montre l'évolution du module de Young normalisé par rapport au module de Young de la matrice, cela pour différentes valeurs de la fraction volumiques des inclusions, toutes les estimations sont entre les deux bornes de Voigt et Reuss, d'après les résultats montrés dans la figure 2.1 le dilué contraint n'est valide que pour de faibles fractions volumiques, le modèle de Mori Tanaka coïncide avec la borne supérieure de Hashin, on observe que le modèle de Mori Tanaka et le modèle auto cohérent sont en bon accord avec le modèle élément fini [48].

Pour une fraction volumique des inclusions  $f_1 = 0.4$ , le tableau 2.2 montre les propriétés homogénéisées du composite à savoir le module de Young et le module de cisaillement, avec les différents schémas d'homogénéisation.

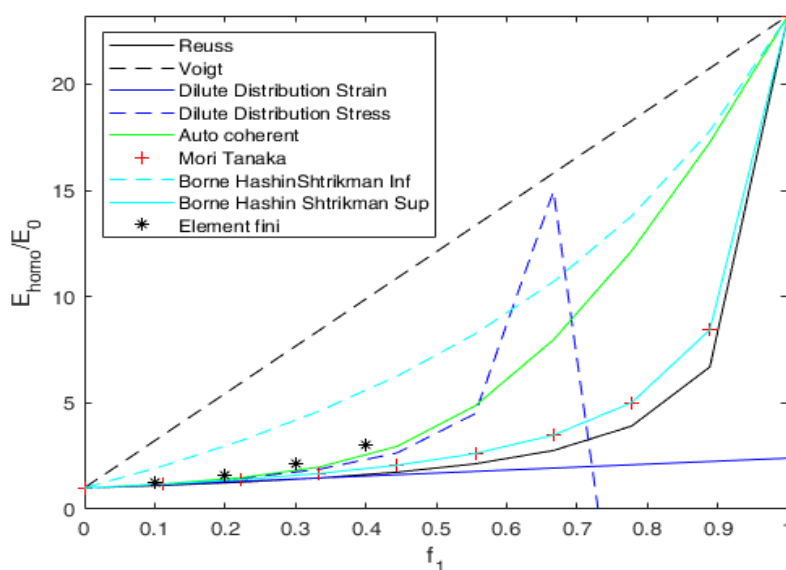


FIGURE 2.1 – Comportement macroscopique élastique par différentes approches : Voigt, Hashin sup, Hashin inf, Mori-Tanaka, dilué contrainte, dilué déformation

TABLE 2.2 – Module de Young  $E$  et module de cisaillement  $\mu$  obtenus par différent schémas d'homogénéisation.

Phase	Reuss	Voigt	Dilue déformation	Dilue contrainte	Auto coherent	Mori Tanaka
$E$ [GPa]	4.63	26.55	4.63	5.92	6.25	5.3
$\mu$ [GPa]	1.72	11.1	4.63	5.92	2.98	2.28

## 2.1.2 Effet du rapport d'aspect des renforts sur le comportement global

Dans ce teste nous étudions l'effet du rapport d'aspect sur le comportement effectif du composite, pour cela on considère un VER (volume elementaire representatif) composé d'une matrice de propylène ( $E_0 = 1\text{GPa}$ ,  $\nu_0=0.35$ ) renforcée par des plaquettes ( $E_1 = 1\text{GPa}$ ,  $\nu_1=0.35$ ), les différents rapport d'aspects sont compris entre 0.01 et 1 (sphère), et trois fractions volumiques des inclusion ( $f_1 = 0.05$ ,  $f_2 = 0.1$ ,  $f_3 = 0.15$ ) sont prises en compte. L'homogénéisation du composite à deux phase est effectuée par une approche qui prend en compte l'effet de la géométrie, dans notre cas nous utilisons celle de Mori Tanaka.

La figure 2.3 montre les résultats de ce test, on observe bien que l'augmentation de la fraction volumique des inclusions augmente le module de Young du composite  $E_{hom}$ , d'après les résultats, un rapport d'aspect  $a_r < 0.2$  donne un comportement rigide, mais au delà de cette valeur, si on augmente le  $a_r$ , le  $E_{hom}$  converge vers la même valeur.

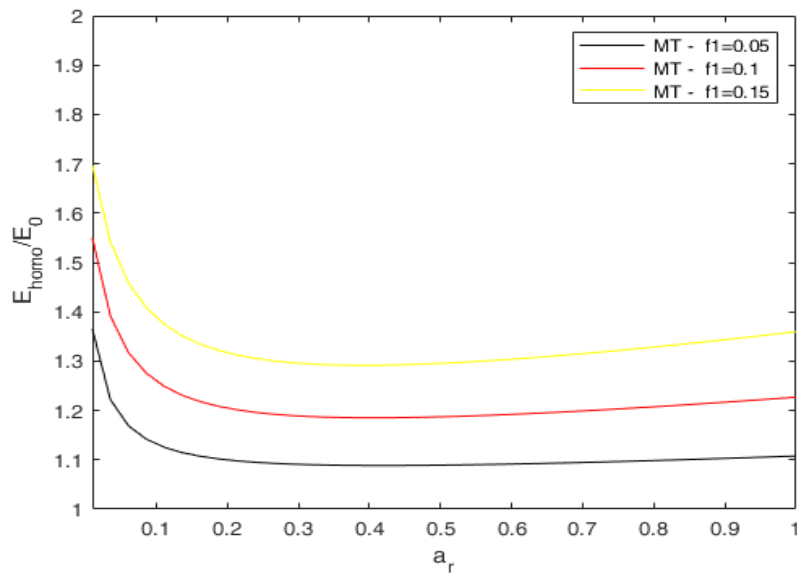


FIGURE 2.2 – Influence de la géométrie des inclusions (plaquettes) sur le module élastique homogénéisé

### 2.1.3 Combinaison de la variation du rapport d'aspect et de la fraction volumique des renforts

Une matrice d'aluminium, ( $E_0 = 70\text{GPa}$ ,  $\nu_0=0.33$ ), renforcée par des fibres courtes d'alumine ( $E_1 = 300\text{GPa}$ ,  $\nu_1=0.2$ ,  $f_1 = 0.1$ ), le rapport d'aspect des fibres varié entre 5 et 50, afin d'évaluer l'effet du rapport d'aspect sur le comportement effectif, les résultats obtenus seront comparés à ceux obtenus par le modèle double inclusion [53] et élément fini [32]. La figure 2.3 montre le module de Young normalisé  $E_{homo}/E_0$  par rapport au module de la matrice  $E_0$  en fonction du rapport d'aspect des fibres courtes  $a_r$ , toutes les estimations montrent que le comportement global dépend de la valeur de  $a_r$ , l'augmentation de ce dernier augmente le module homogénéisé jusqu'à atteindre un plateau. Le modèle double inclusion coïncide avec le modèle de Mori Tanaka, et le modèle EF présente des estimations inférieures à celle obtenues par les méthodes en champ moyen (MT et DI).

## 2.2 Composites multi-phases

### 2.2.1 Composite à trois phases renforcé par deux types d'inclusions

Dans cet exemple, le composite est constitué de trois phases. Une matrice ( $E_0 = 95.6\text{GPa}$ ,  $\nu_0=0.33$ ,  $f_0 = 0.55$ ) renforcée par deux types de renforts, la première inclusion est une fibre ( $E_1 = 431\text{GPa}$ ,  $\nu_1=0.2529$ ,  $f_1 = 0.2$ ,  $a_{r1} = 100$ ), la deuxième est un disque ( $E_2 = 34.4\text{GPa}$ ,  $\nu_2=0.2028$ ,  $f_2 = 0.25$ ,  $a_{r2} = 0.01$ ), leurs propriétés physiques et mécaniques sont dif-

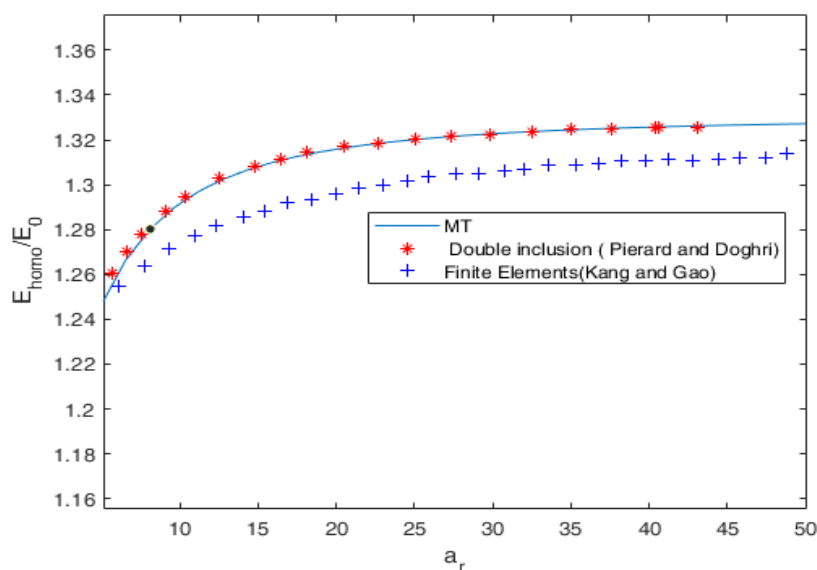


FIGURE 2.3 – Estimation de comportement globale en fonction du rapport d’aspect  $a_r$  des fibres. Les approches utilisées, MT-DI-EF

férentes. L’utilisation direct du modèle de Mori Tanaka pour homogénéiser le composite à trois phases, conduit à un tenseur de rigidité non symétrique, nous utilisons alors la méthode à deux étapes, au niveau de la première étape nous utilisons le modèle Mori Tanaka, et dans la deuxième étape nous utilisons soit le modèle de Reuss ou le modèle de Voigt ou celui de Mori Tanaka.

Le tableau 2.3 montre les résultats des différentes approches (MT-Voigt, MT-Reuss, MT-MT), les résultats montrent une symétrie du tenseur de rigidité homogénéisé  $\mathbb{C}^{\text{hom}}$  ( $\mathbb{C}_{3311}^{\text{hom}} = \mathbb{C}_{1133}^{\text{hom}}$ ).

TABLE 2.3 – Composante du tenseur élastique homogénéisé  $\mathbb{C}^{\text{hom}}$  d’un composite à trois phases, obtenu par l’homogénéisation à deux étapes, les composantes sont en [GPa]

Approche	Mori Tanaka-Voigt	Mori Tanaka-Reuss
$\mathbb{C}_{1122}^{\text{hom}}$	49.89	37.94
$\mathbb{C}_{1133}^{\text{hom}}$	45.86	30.37
$\mathbb{C}_{3311}^{\text{hom}}$	45.86	330.37
$\mathbb{C}_{3333}^{\text{hom}}$	162.49	395.36
$\mathbb{C}_{1212}^{\text{hom}}$	84.13	62.23
$\mathbb{C}_{3131}^{\text{hom}}$	86.24	72.12

## 2.2.2 Composite à renforts alignés

On considère un matériau composé de trois phases, une matrice ( $E_0 = 1$  GPa,  $\nu_0 = 0.35$ ) et deux types d’inclusions, pour lequel nous déterminons le module élastique homogénéisé  $E_{\text{homo}}$  suivant le sens de la traction (chargement), et cela par l’utilisation de la méthode à

deux étapes (MT-Voigt, MT-Reuss, MT-MT), les inclusions sont alignés suivant le sens du chargement, les propriétés et la géométrie (fibre ou sphère) des inclusions sont différentes ( $E_1 = 50$  GPa,  $\nu_1=0.3$ ,  $E_2 = 100$  GPa,  $\nu_2=0.3, f_2 = 3f_1$ ).

Le but de cet exemple est de déterminer l'effet de la fraction volumique des inclusions sur le comportement effectif du composite, ainsi l'effet de la variation du rapport d'aspect des inclusions, donc trois rapports d'aspect sont pris en compte pour chaque type d'inclusion qui sont les suivant : ( $a_{r1} = 1$   $a_{r2} = 10$ ) et ( $a_{r1} = 50$   $a_{r2} = 10$ ) et ( $a_{r1} = 10$   $a_{r2} = 50$ ).

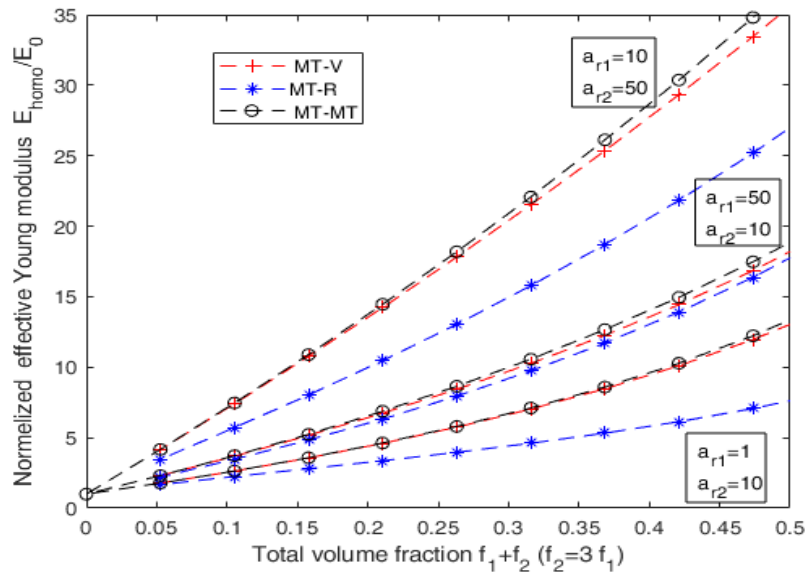


FIGURE 2.4 – Module élastique homogénéisé d'un composite renforcé par des inclusions de différentes formes et propriétés mécaniques. Les approches utilisées sont MT-Voigt et MT-Reuss et MT-MT

La figure 2.4 montre les résultats de cet exemple, on observe que l'augmentation de la fraction volumique des inclusion ( $f_1 + f_2$ ) augmentent le module de Young homogénéisé  $E_{\text{hom}}$ . Le comportement macroscopique est influencé par la valeur du rapport d'aspect, tel que l'augmentation de  $a_{r1}$  et  $a_{r2}$  augmente la valeur de  $E_{\text{hom}}$ , nous observons également que l'approche MT-MT n'est pas entre les deux limite de MT-Voigt et MT-Reuss.

### 2.3 Estimation des propriétés élastique du béton recyclé

Le béton est un matériau composite constitué de mortier et de granulats. Le mortier est constitué de ciment et de sable/eau, qui a le rôle de lier les granulats dans le béton. Dans le cas d'un béton naturel (classique-ordinaire), la microstructure peut être représentée par trois phases : le mortier (matrice), les granulats, et la zone d'interphase ITZ<sup>1</sup> entre le granulat naturel et le mortier. Dans le cas d'un béton recyclé où les granulats naturels sont substitués par des granulats recyclés totalement ou partiellement, la présence des granulats recyclés (mélange de vieux mortier et du granulat d'origine) induit l'apparition d'une microstructure spécifique dans le béton recyclé. On distingue alors l'apparition de nouvelles zones d'interphases ITZ entre les granulats recyclés et le nouveau mortier. La microstruc-

ture du béton recyclé peut contenir trois zones d'interphases [81] :

- La première se situe entre le granulat d'origine GO et le nouveau mortier NM, noté par  $ITZ^1$
- La deuxième entre le granulat d'origine GO et le vieux mortier VM  $ITZ^2$ .
- La troisième zone d'interphases  $ITZ^3$  entre le vieux mortier VM et le nouveau mortier NM.

Donc la microstructure du béton recyclé est constituée d'un nouveau mortier, de granulats recyclés (mélange de granulats d'origine et de vieux mortier), et de granulats naturels avec la présence de trois zones d'interphases ( $ITZ^1$ ,  $ITZ^2$ ,  $ITZ^3$ )[80]. Nous considérons un

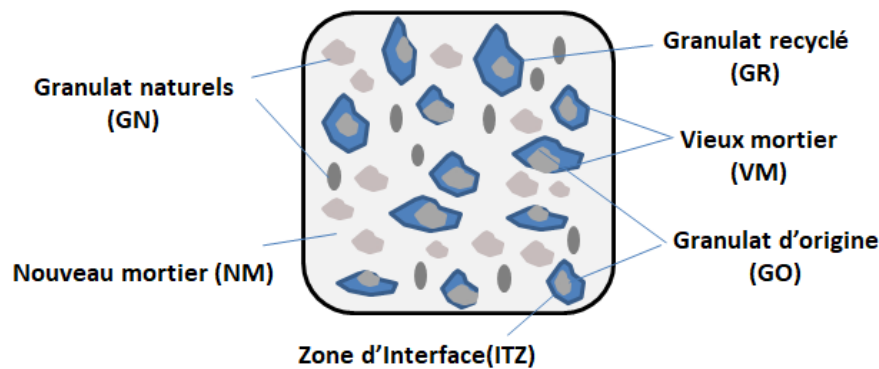


FIGURE 2.5 – Microstructure d'un béton recycle

volume élémentaire représentatif du béton recyclé (VER), constitué d'une matrice qui est le nouveau mortier, et de deux types d'inclusions, qui sont les granulats recyclés (GR) et les granulats naturels (GN), à savoir que la forme, les propriétés, et l'orientation des deux types d'inclusions sont différentes, alors pour obtenir les propriétés effectives du béton recyclé, nous faisons appel à l'homogénéisation multi phases, dans ce cas, la méthode utilisée couramment est celle de Mori Tanaka reformulée par Benveniste [6], mais cette méthode donne un tenseur symétrique uniquement dans le cas où les inclusions possèdent la même forme et la même orientation, et d'après Pierard et al [53] la méthode direct de Mori Tanaka, conduit à des résultats physiques inacceptables.

Dans le cas d'un béton recyclé, on propose une stratégie d'homogénéisation inspirée de Camacho et al [8] et Pierard et al [53], cette stratégie sera composée de trois étapes d'homogénéisation, la première aura comme objectif de déterminer les propriétés effectives du granulat recyclé (GR), car il est considéré comme un matériau à deux phases, constitué d'un granulat d'origine (GO) de rigidité  $\mathbb{C}^{GO}$ , entouré partiellement ou globalement par une couche de vieux mortier (VM) de rigidité  $\mathbb{C}^{VM}$ , alors cette étape permet d'avoir un granulat recyclé équivalent  $GR_{eq}$  de rigidité  $\mathbb{C}_{eq}^{GR}$ . Une fois le granulat recyclé est homogénéisé, on entame la deuxième étape d'homogénéisation. Dans cette étape, les différentes phases qui constituent le béton recyclé, à savoir la matrice qui est le nouveau mortier (NM) de rigidité  $\mathbb{C}^{NM}$ , et deux familles d'inclusions qui sont, les granulats naturels (GN) de rigidité  $\mathbb{C}^{GN}$  et les granulats recyclés équivalent  $GR_{eq}$  de rigidité  $\mathbb{C}_{eq}^{GR}$ , sont toutes considérées comme homogènes, linéaires élastiques, et isotropes, au niveau de cette étape, le volume élémentaire représentatif du béton recyclé sera décomposé en grains  $G_i$ , chaque grain sera

composé d'une matrice qui est le nouveau mortier (NM), et d'une famille d'inclusions ( $i$ ), chaque grain fait l'objet d'une homogénéisation à deux phases, ce qui permet de transformer le VER hétérogène en plusieurs grain homogènes. Dans la troisième étape d'homogénéisation, afin d'avoir un béton recyclé homogène, les grains homogènes peuvent être homogénéisés par le modèle de Voigt (loi des mélanges).

### 2.3.1 Première étape d'homogénéisation

Le granulat recyclé (GR) est considéré comme un matériau composite à deux phases, la première est un granulat d'origine (GO) et la deuxième est un vieux mortier (VM) adhérent au granulat d'origine, le but de cette étape est d'obtenir un granulat recyclé équivalent (GReq), la méthode d'homogénéisation proposée est celle de GEEE (A generale and explicit Eshelby type estimatore), ce modèle est développé par Ghazavizadeh et al [22], l'objectif principal est d'estimer la rigidité équivalente d'une hétérogénéité ellipsoïdale multi phases. On considère que les deux phases qui constituent le granulat recyclé sont isotropes, le granulat d'origine (GO) de rigidité  $\mathbb{C}^{GO}$  et de fraction  $f_{GO}$ , de forme supposée sphérique, alors son rapport de forme  $\xi = 1$ . Le vieux mortier (VM), constitue une couche de revêtement pour le granulat d'origine, caractérisé par une rigidité  $\mathbb{C}^{VM}$ , et une fraction  $f_{VM}$ , sa forme est supposée ellipsoïdale.

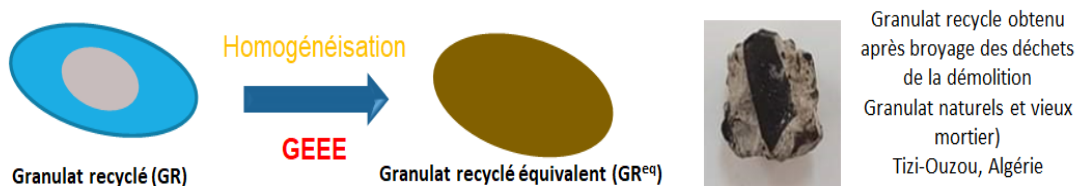


FIGURE 2.6 – Présentation du premier niveau d'homogénéisation.

### 2.3.2 Modèle GEEE

L'idée principale développée par ce modèle est de déduire les propriétés effectives de l'inclusion multi couches dans le cas de deux phases, basées sur une inclusion inhomogène d'Eshelby [22]. Dans le cas de ( $n$ ) couches, une procédure itérative est alors utilisée pour obtenir les propriétés équivalentes des ( $n$ ) phases. Ce modèle permet de déterminer les propriétés effectives du (GR) avec et sans la présence d'une couche d'interface entre le granulat d'origine et l'ancien mortier. Avec ce modèle, la forme de l'inclusion (granulat d'origine d'origine) peut être différente de la forme de la couche de revêtement qui est le vieux mortier mortier (VM). Dans le cas de deux phases, le tenseur de rigidité équivalent est explicitement donné par l'équation 3.53.

$$\mathbb{C}_{eq}^{RA} = \mathbb{C}^{VM} + f_{OA}[(\mathbb{C}^{GO} - \mathbb{C}^{VM})^{-1} + (\mathbb{P}^{GO} - f_{GO}\mathbb{P}^{eq})]^{-1} \quad (2.1)$$

Avec :

$$\begin{aligned}\mathbb{P}^{GP} &= \mathbb{S}^{GO}(\mathbb{C}^{VM})^{-1} \\ \mathbb{P}^{eq} &= \mathbb{S}^{eq}(\mathbb{C}^{VM})^{-1}\end{aligned}$$

$\mathbb{C}^{VM}$  et  $\mathbb{C}^{GO}$  désigne le rigidité du vieux mortier (VM) et du granulat d'origine (GO) et  $f_{GO}$  la fraction volumique du granulat d'origine par rapport au volume du granulat recyclé, et  $\mathbb{P}^{GO}$  l'opérateur de Grenn [21].

### 2.3.3 Deuxième étape d'homogénéisation

On considère un volume élémentaire représentatif d'un béton recyclé (VER), constitué d'une matrice qui est le nouveau mortier (NM) de fraction volumique  $f_{NM}$ , et deux types d'inclusion qui sont les granulats naturels (GN) et les granulats recyclés équivalents  $GR_{eq}$ , l'objectif de cette deuxième étape d'homogénéisation est de décomposer le VER de béton recyclé en grains  $G_i$ , chaque grain est constitué d'une matrice qui est le nouveau mortier de rigidité  $\mathbb{C}^{NM}$  et un type d'inclusion (GN ou  $GR_{eq}$ ). Au niveau de chaque grain  $G_i$ , la matrice possède une rigidité  $\mathbb{C}^{NM}$  et une fraction volumique  $f_{NM}$  (la même que celle du VER), les inclusions sont de même forme et distribuées aléatoirement dans la matrice, donc le VER représentatif est décomposé en grains, chaque grain est un matériau à deux phases (matrice et inclusions), alors pour homogénéiser chaque grains en utilise le modèle de Mori Tanaka , la figure 2.7 récapitule le principe de la deuxième étape d'homogénéisation :

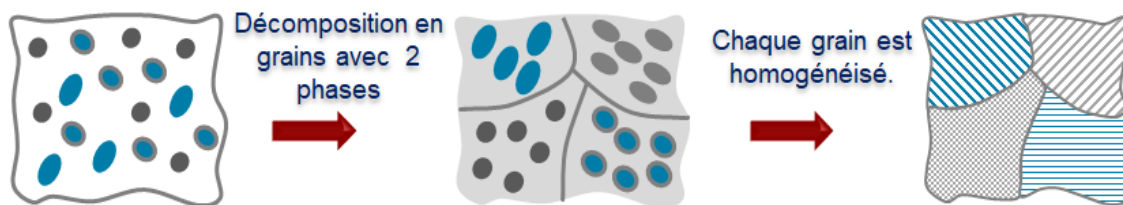


FIGURE 2.7 – Présentation de la deuxième étape d'homogénéisation.

#### Orientation des inclusions

Dans ce travail, l'effet de l'orientation des inclusions dans la matrice sur les propriétés macroscopiques est pris en compte [48], en considérant différents types d'orientation (aléatoire, aligné, axisymétrique), la distribution aléatoire où les inclusions sont orientées au hasard suivant les trois directions, sera représentée par les angles d'Euler  $(\alpha, \beta, \gamma)$  qui permettent le passage du repère local  $(x, y, z)$  de l'inclusion au repère global  $(x'', y'', z'')$  via trois rotations, tandis que la distribution alignée et axisymétrique sera représentée par la fonction de distribution des orientations ODF  $\lambda(\alpha, \gamma)$ .

Pour une distribution aléatoire, la transformation du tenseur de localisation des déformations dilué  $\mathbb{A}^{dilue}$  du repère local au repère global sera déterminée comme suit :

$$\langle \mathbb{A}_{ijkl}^{dilue} \rangle = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} a_{im} a_{jn} a_{kp} a_{lq} \mathbb{A}_{mnpq}^{dilue} \sin(\beta) d\beta d\alpha d\gamma \quad (2.2)$$

$$\mathbb{A}_{mnpq}^{dilue} = [\mathbb{I} + \mathbb{S}^{Esh}(\mathbb{C}_{NM}^{sct})^{-1}(\mathbb{C}_i^{sct} - \mathbb{C}_{NM}^{sct})]^{-1} \quad (2.3)$$

Avec  $\mathbb{I}$  le tenseur identité d'ordre quatre et  $\mathbb{S}^{Esh}$  le tenseur d'Eshelby de l'inclusion, et  $a$  la matrice de passage qui englobe les trois rotations avec :

$$a = \begin{bmatrix} \cos(\gamma)\cos(\alpha) - \sin(\alpha)\sin(\gamma)\cos(\beta) & \cos(\gamma)\sin(\alpha) + \sin(\gamma)\cos(\beta)\cos(\alpha) & \sin(\gamma)\sin(\alpha) \\ -\sin(\gamma) - \sin(\alpha)\cos(\gamma) & -\sin(\gamma)\sin(\alpha) + \cos(\alpha)\cos(\beta)\cos(\gamma) & \cos(\gamma)\sin(\beta) \\ \sin(\beta)\sin(\alpha) & -\sin(\beta)\cos(\alpha) & \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

Pour le cas d'une distribution alignée où les inclusions sont parfaitement alignées suivant un axe donné, et aussi pour le cas d'une distribution axisymétrique, la moyenne du tenseur de localisation des déformations dilué  $\mathbb{A}^{dilue}$  sera calculée via l'équation 2.4 et 2.5 :

$$\langle \mathbb{A}_{ijkl}^{dilue} \rangle = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \bar{\mathbb{A}}^{dilue}(\alpha, \beta, \gamma) \lambda(\alpha, \gamma) \sin(\beta) d\alpha d\beta d\gamma}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \lambda(\alpha, \gamma) \sin(\beta) d\alpha d\beta d\gamma} \quad (2.4)$$

$$\bar{\mathbb{A}}_{ijkl}^{dilue} = a_{im} a_{jn} a_{kp} a_{lq} \mathbb{A}_{mnpq}^{dilue} \quad (2.5)$$

$\lambda(\alpha, \gamma)$  Est la fonction de distribution des orientations qui est une fonction de deux angles  $\alpha$  et  $\gamma$  et aussi de deux facteurs  $s_1$  et  $s_2$  qui contrôlent l'orientation des inclusions, et l'ODF s'écrit comme suit :

$$\lambda(\alpha, \gamma) = \exp[-s_1 \alpha^2] \exp[-s_2 \gamma^2]$$

### 2.3.4 Troisième étape d'homogénéisation

Dans cette dernière étape, le volume élémentaire représentatif est considéré comme un agrégat constitué de plusieurs grains  $G_i$ , chaque grain est caractérisé par sa rigidité effective  $\mathbb{C}_{G_i}^{eff}$  calculée dans la première étape. L'agrégat obtenu est un composite multi phases, qui sera homogénéisé avec n'importe quelle méthode d'homogénéisation, dont certaines seront décrites ci-après.

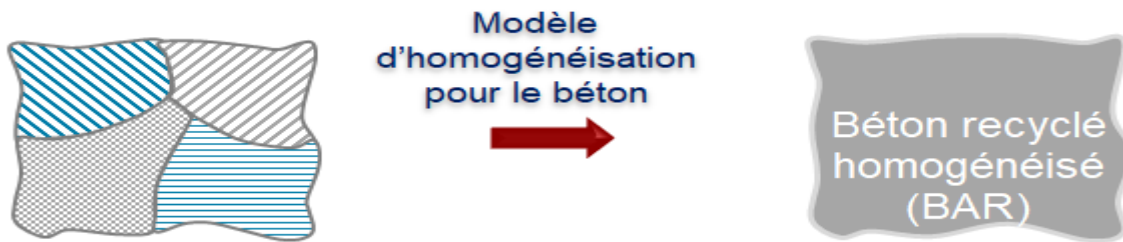


FIGURE 2.8 – Troisième étape d'homogénéisation

**Voigt :** Dans ce modèle l'hypothèse de base, est que le champ des déformations est uniforme dans l'agrégat, la rigidité homogénéisée est obtenue comme suit :

$$\mathbb{C}^{hom} = \sum_{i=1}^N f_{G_i} \mathbb{C}_{G_i}^{eff} \quad (2.6)$$

**Reuss :** L'hypothèse de base de ce modèle est que le champ des contraintes est uniforme dans l'agrégat. La rigidité macroscopique effective peut être écrite comme :

$$\mathbb{C}^{hom} = \sum_{i=1}^N f_{G_i} [(C_{G_i}^{eff})^{-1}]^{-1} \quad (2.7)$$

## 2.4 Homogénéisation des granulats recyclés

Le granulat recyclé est un matériau à deux phases, la première phase est un granulat d'origine  $GO$  de forme sphérique, son rapport d'aspect  $\xi_{GO} = 1$ , la deuxième est constitué d'un vieux mortier, elle possède une forme ellipsoïdale, alors pour évaluer l'effet de la forme du vieux mortier, on opte pour trois rapports de'aspect,  $\xi_{VM} = [0.811.25]$ , les propriétés élastiques du granulat d'origine et du vieux mortier sont récapitulées dans le tableau 2.5 :

TABLE 2.4 – propriétés élastiques du granulat d'origine et du vieux mortier[2]

Phase	Granulat d'origine	vieux mortier
Module de Young $E$ [GPa]	92.9	16.31
Coefficient du Poisson $\nu$	0.08	0.2

Les propriétés effectives du granulat recyclé équivalent sont déterminées en fonction de la fraction volumique du granulat d'origine  $f_{GO}$ , , et aussi en fonction de la forme du vieux mortier, d'après la figure 2.10, pour une forme sphérique concentrée du vieux mortier  $a_r = 1$ , les estimations du modèle GEEE coïncident avec les estimations de Mori Tanaka, et aussi avec celles de Ponte Castaneda et Willis [9], et toutes les estimation sont entre les bornes de Voigt et Reuss. Dans le cas où la forme du vieux mortier est une sphéroïde aplatie  $a_r = 0.8$  ou un sphéroïde allongée  $a_r = 1.25$ , les estimations du modèle GEEE dépassent les bornes de Voigt et de Reuss au-delà d'une certaine fraction de granulat d'origine, la même remarque a été observée pour les estimations de Ponte Castaneda et Willis, ces remarques ont été également observées par Ponte Castaneda et Willis[9], donc la validité du modèle dépend des rapports d'aspects du granulat d'origine et du vieux mortier.

## 2.5 Propriétés linéaires élastiques du béton recyclé

### 2.5.1 Module de Young en fonction du taux de remplacement

Pour déterminer les propriétés effectives du béton recyclé, on considère que toutes les phases sont homogènes et isotropes, la forme des granulats naturels (GN) et des granulats recyclés (GR) est supposée sphérique, le but est de déterminer le module de Young homogénéisé en fonction du taux de granulats recyclés dans le béton, les propriétés des phases qui constituent le béton recyclé sont récapitulées dans le tableau 2.5 :

D'après les résultats numériques illustrés dans la figure 2.10, qui présente le module de Young du béton recyclé à l'âge de 28 et 90 jours, on remarque que le module de Young effectif

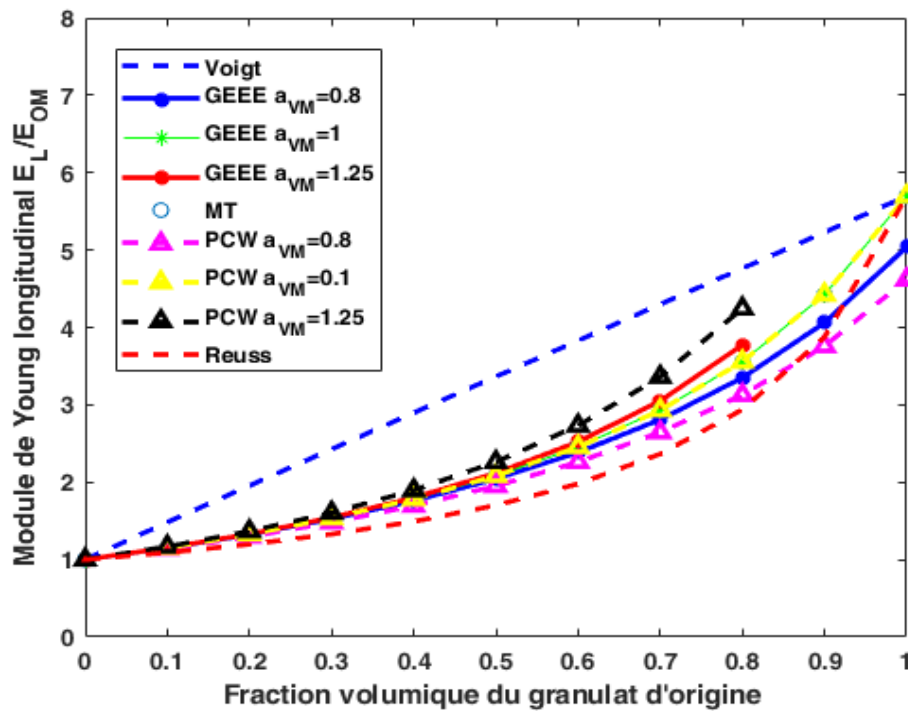


FIGURE 2.9 – Module de Young du granulat recyclé équivalent avec les modèles de Voigt, Reuss, GEEE, MT, PCW. Trois rapports d'aspect du vieux mortier  $a_{VM} = 0.8, 1, 1.25$ .

TABLE 2.5 – propriétés élastiques du granulat d'origine et du vieux mortier [2].

Phase	E [GP]	$\nu$
Granulat d'origine	92.9	0.08
Vieux mortier	16.08	0.23
Granulat naturels	68.81	0.32
Nouveau mortier (28 jours)	16.08	0.23
Nouveau mortier (90 jours)	36	0.2

du béton recyclé est sensible à la fraction volumique des granulats recyclés, on constate que l'augmentation de la fraction volumique des granulats recyclés induit une diminution du module de Young, si on compare les résultats numériques à ceux donnés par l'expérimentale [2], on remarque une concordance entre les deux valeurs numérique et expérimentale, alors le modèle d'homogénéisation basé sur une démarche à trois étapes permet d'approcher les résultats expérimentaux [2] du béton recyclé à l'âge de 28 et 90 jours. La stratégie d'homogénéisation adoptée est très flexible pour prédire le comportement des matériaux à microstructure complexe comme dans le cas d'un béton recyclé.

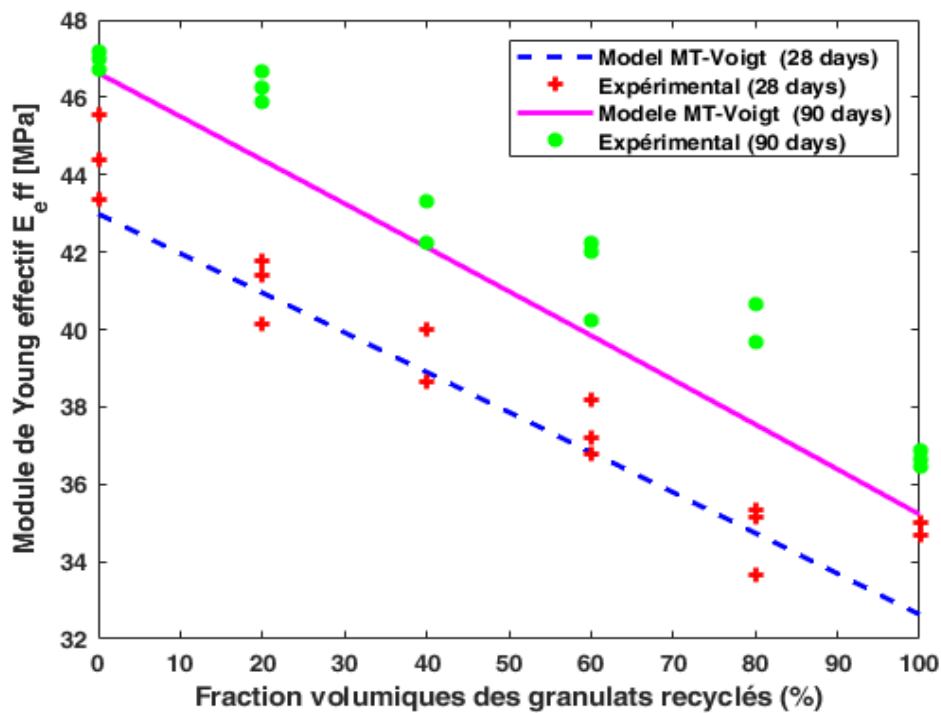


FIGURE 2.10 – Estimation de module de Young effectif du béton recyclé à l'âge de 28 et 90 jours, comparaison avec l'expérimental [2].

## 2.5.2 Effet de la qualité des granulats recyclés sur le module de Young homogène

Dans cet exemple, on détermine le module de Young homogénéisé d'un béton recyclé constitué totalement de granulats recyclés, ces derniers se décomposent en deux types, des granulats recyclés obtenus d'un béton de haute résistance (A), et des granulats recyclés obtenus d'un béton de moyenne résistance (B), ces deux types de granulats recyclés seront utilisés pour obtenir des bétons de différentes résistances mécaniques, pour les deux types de granulats recyclés, le granulat d'origine (GO) possède un module de Young  $E_{GO} = 50GPa$  et un coefficient de poisson  $\nu = 0.18$ , le vieux mortier du granulat recyclé de type (A) possède un module de Young  $E_{VM}^A = 26.42GPa$  et un coefficient de poisson  $\nu_{VM}^A = 0.18$ , et le vieux mortier du granulat recyclé de type (B) possède un module de Young  $E_{VM}^B = 22.875GPa$  et un coefficient de poisson  $\nu_{VM}^B = 0.18$ .

Trois classes de béton recyclé sont modélisés, le premier est de résistance mécanique 18 MPa nommé BR18, le deuxième est de résistance mécanique 37 MPa nommé BR37, le troisième est un béton de résistance mécanique de 48 MPa nommé BR48, et chaque type de béton possède son mortier intrinsèque, les propriétés mécaniques de chaque type de mortier sont récapitulées dans le tableau 2.6 :

Les résultats du modèle numérique sont illustrés dans la figure 2.11, qui présente le module de Young  $E(GPa)$  du béton recyclé en fonction du type de granulats recyclés, et en fonction du type de béton, d'après les résultats, on remarque que les résultats numérique donnés par notre modèle s'approchent des résultats expérimentaux [57], le module de Young  $E$  numé-

TABLE 2.6 – propriétés mécaniques des différents types de mortier [57]

Type de mortier	Mortier (BR18)	Mortier (BR37)	Mortier (BR48)
E [GPa]	18.05	24.98	37.19
$\nu$	0.18	0.18	0.18

rique est fonction du type de mortier, on observe que l'augmentation du module de Young du mortier fait augmenter le module de Young effectif, la même remarque est constatée pour les valeurs expérimentales [57].

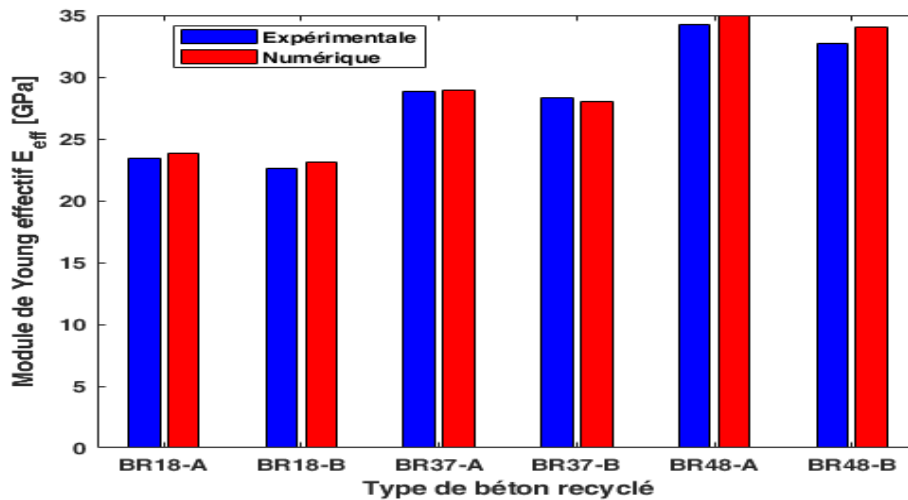


FIGURE 2.11 – Module de Young effectif du béton recyclé.

D'autres part, on peut noter que globalement les valeurs calculées du module de Young sont en parfaite concordance avec celles obtenues expérimentalement [57] et cela pour tous les types de béton.

Maintenant, on reprend ce qu'on a fait précédemment, mais avec la prise en compte de l'interface (ITZ) dans le granulat recyclé, cette interface se situe entre le granulat d'origine (*GO*) et le vieux mortier (*VM*). Dans ce cas, pour obtenir un granulat recyclé équivalent, le composite fait l'objet de deux étapes d'homogénéisations en utilisant le modèle GEEE, tout d'abord pour homogénéiser le granulat d'origine et l'interface, ensuite le résultat de cette homogénéisation sera homogénéisé avec le vieux mortier, les propriétés mécaniques des interfaces sont récapitulées dans le tableau 2.7 :

TABLE 2.7 – Propriétés des interfaces [57]

Type de l'interface	Interface (A)	Interface (B)
E [GPa]	26.42	22.875
$\nu$	0	0

Les résultats obtenus avec la prise en compte des interfaces sont présentées dans la figure 2.12, on remarque que les estimations par le modèle des propriétés des bétons de types (BR18-A, BR18-B, BR37-A, BR37-B), sont plus proches des résultats expérimentaux [57],

mais les estimations du modèle pour les propriétés des bétons (BR48-A, BR48-B), sont supérieures aux résultats expérimentaux [57].

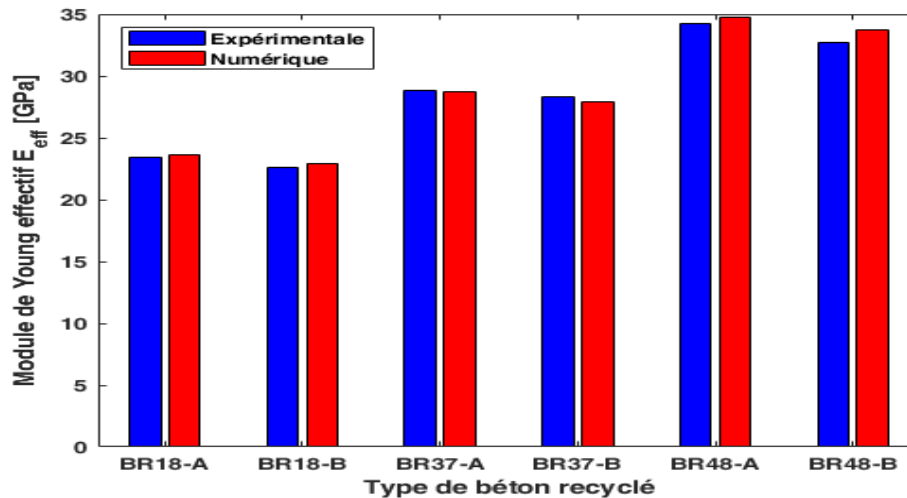


FIGURE 2.12 – Effet de l’interface sur le Module de Young effectif du béton recyclé.

Dans les résultats montrés précédemment, on a déterminé les propriétés élastique du béton recyclé. La stratégie d’homogénéisation élastique développée pour cette étude est très simple de mis en œuvre et flexible. Elle permet de prédire le comportement élastique des bétons à agrégats recyclés. La validation par les mesures expérimentales de la littérature montre les performances du modèle à trois étapes, notamment dans la prise en compte des effets des agrégats recyclés dans la confection du nouveau béton. Par le modèle GEEE élastique généralisée à  $n$  phases par itération, l’interface entre inclusion-inclusion et matrice –inclusion peut être prise en compte comme une interphase de fraction volumique.

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les propriétés des composites à deux phases sont déterminées par les méthodes d’homogénéisation à champ moyen. Aussi la stratégie à deux étapes permet d’évaluer le comportement des composites multi phases. La stratégie d’homogénéisation à trois étapes a comme objectif la détermination des propriétés élastiques du béton recyclé, en utilisant une approche multi échelles basées sur la micromécanique des matériaux, la méthode sert à effectuer trois étapes d’homogénéisation. La stratégie d’homogénéisation élastique développée pour cette étude est très simple de mise en œuvre et flexible. Elle permet de prédire le comportement élastique des bétons à agrégats recyclés. La validation par les mesures expérimentales de la littérature montre les performances du modèle à trois étapes, notamment dans la prise en compte des effets des agrégats recyclés dans la confection du nouveau béton. Par le modèle GEEE élastique généralisée à  $n$  phases par itération, l’interface entre inclusion-inclusion et matrice –inclusion peut être prise en compte comme une interphase de fraction volumique.



## CHAPITRE 3

---

3.1	Introduction . . . . .	48
3.2	Propriétés effectives des composites multi phases non linéaires . .	48
3.3	Formulation sécante . . . . .	49
3.4	Méthode sécante . . . . .	49
3.5	Généralités sur la formulation sécante . . . . .	49
3.6	Méthode sécante classique : une théorie basée sur la déformation moyenne . . . . .	51
3.6.1	Cas d'un composite isotrope à deux phases . . . . .	51
3.7	Lois de comportement . . . . .	52
3.7.1	Modèle d'endommagement de Mazars . . . . .	52
3.8	Simulation du comportement linéaire endommageable : cas d'un béton ordinaire : . . . . .	55
3.8.1	Comportement du béton ordinaire en compression . . . . .	55
3.8.2	Comportement du béton ordinaire en traction . . . . .	57
3.9	Modélisation du comportement du béton à base d'agrégats recyclés	59
3.9.1	Comportement des phases constitutive du béton recyclé . . . . .	60
3.9.2	Algorithme général . . . . .	62
3.10	Conclusion . . . . .	63

---

### 3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la prédiction des propriétés effectives des composites non linéaires [18, 15]. Le mot composite indique tout matériau non homogène, ces constituants sont de nature différente [14]. Par exemple un matériau à matrice d'aluminium contenant des fibres, est considéré comme un composite puisqu'il est composé de deux phases différentes, la matrice d'aluminium et les fibres. De même le béton, qui est largement utilisé dans la construction, est considéré comme un composite puisqu'il est constitué d'une matrice mortier, et des granulats de forme et de nature différentes.

Les composites sont composés de  $N$  phases avec un comportement connu et des interfaces parfaites, on suppose que les informations sur leurs micro-structures est disponible. L'objectif de cette partie est de combiné les deux types d'informations, le comportement des phases  $N$  et la microstructure, pour prédire le comportement effectif du composite. Il est souvent utile de connaître l'état mécanique local des différentes phases qui constituent le composite, car cela est lié au propriétés effectives.

### 3.2 Propriétés effectives des composites multi phases non linéaires

On considère un volume élémentaire représentatif (VER)  $V$  du matériau composite où la taille des inhomogénéités est inférieure par rapport à  $V$ , le composite est constitué de  $N$  phases homogènes  $V_i, i = 1, \dots, N$ , on note par  $f_i$  la fraction volumique de la phase ( $i$ ), le signe  $\langle . \rangle_i$  indique la moyenne spatiale sur le volume de la phase ( $i$ ), et le signe  $\langle . \rangle$  indique la moyenne spatiale sur le volume élémentaire représentatif ( $V$ ) :

$$\varepsilon_i = \langle \varepsilon \rangle_i = \frac{1}{|V_i|} \int_{V_i} \varepsilon(x) dx \quad (3.1)$$

$$\sigma_i = \langle \sigma \rangle_i = \frac{1}{|V_i|} \int_{V_i} \sigma(x) dx \quad (3.2)$$

$$\varepsilon = \langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{|V|} \int_V \varepsilon(x) dx \quad (3.3)$$

$$\sigma = \langle \sigma \rangle = \frac{1}{|V|} \int_V \sigma(x) dx \quad (3.4)$$

Les phases du VER sont non linéaires, leur comportement individuel sous chargement uniaxiale peut être décrit suivant une formulation sécante, et dans le contexte des petites déformations comme suit :

$$\sigma = E_s(\varepsilon) \varepsilon \quad (3.5)$$

La loi de comportement de chaque phase (i) peut être formulée comme suit :

$$\sigma_m = k(tr(\varepsilon)), s_{ij} = 2\mu_s(\varepsilon_{eq})e_{ij} \quad (3.6)$$

Où  $\sigma_m$  et  $\varepsilon_m$  sont les premiers invariants de la contrainte et de la déformation,  $s$  et  $e$  sont la contrainte et la déformation déviatorique.

$$\sigma_m = \frac{1}{3}tr(\sigma), \varepsilon_m = \frac{1}{3}tr(\varepsilon) \quad (3.7)$$

$$s_{ij} = \varepsilon_{ij} - \sigma_m \delta_{ij}, e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_m \delta_{ij} \quad (3.8)$$

$\sigma_{eq}$  et  $\varepsilon_{eq}$  sont la contrainte équivalente de Von Mises et la déformation équivalente :

$$\sigma_{eq} = \left(\frac{3}{2}s_{ij}s_{ij}\right)^{1/2}, \varepsilon_{eq} = \left(\frac{3}{2}e_{ij}e_{ij}\right)^{1/2} \quad (3.9)$$

$\mu_s$  est le module de cisaillement sécant :

$$\mu_s = \frac{\sigma_{eq}}{3\varepsilon_{eq}} \quad (3.10)$$

### 3.3 Formulation sécante

La loi de comportement décrite en équation 3.6 peut être écrite sous forme compacte :

$$\sigma = \mathbb{C}_{sct}(\varepsilon) : \varepsilon \quad (3.11)$$

Avec :

$$\mathbb{C}(\varepsilon) = 3k\mathbb{J} + 2\mu_s(\varepsilon_{eq})\mathbb{K} \quad (3.12)$$

$\mathbb{C}_{sct}$  est le tenseur de rigidité secant, l'équation 3.12 montre sa décomposition sur les deux projecteur  $\mathbb{J}$  et  $\mathbb{K}$  :

$$J_{ijkh} = \frac{1}{3}\delta_{ij}\delta_{kh}, K_{ijkh} = \frac{1}{2}(\delta_{ik}\delta_{jh} + \delta_{ih}\delta_{jk}) - J_{ijkh} \quad (3.13)$$

$$\mathbb{J} + \mathbb{K} = \mathbb{I} \quad (3.14)$$

Où  $\mathbb{I}$  est le tenseur d'identité d'ordre quatre.

### 3.4 Méthode sécante

Dans cette section, nous considérons que tous les matériaux sont gouverné par la loi de comportement décrite en équation 3.6

### 3.5 Généralités sur la formulation sécante

On note que les champs locaux de contrainte  $\sigma(x)$  et de déformation  $\varepsilon(x)$  résolvent le problème suivant :

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\Delta u + \Delta u^t), div(\sigma) = 0 \quad (3.15)$$

$$\sigma(x) = \mathbb{C}_i^{sct}(x) : \varepsilon(x) \quad (3.16)$$

Avec :

$$\mathbb{C}^{sct} = 3k(x)\mathbb{J} + 2\mu_s(x)\mathbb{K} \quad (3.17)$$

$$k(x) = k^i, \mu_s = \mu_s^i(\varepsilon_{eq}(x)) \quad (3.18)$$

Dans un composite non linéaire, le module sécant  $\mu_s$  varie d'un point à un autre même à l'intérieur d'une même phase, Le composite non linéaire se comporte comme un composite linéaire avec un nombre infini de phases avec des modules élastiques  $(k^i, \mu_s(x))$ . Les fluctuations spatiales de ces modules dépendent fortement du type de comportement non linéaire des phases et de la déformation globale appliquée sur le VER. D'après Hill et al [26] et Suquet [65, 66], il est impossible de déterminer analytiquement la réponse locale de ces composites non linéaires, alors une approximation doit être introduite pour rendre les calculs analytiques plus réalisables.

L'approximation dans la méthode sécante, consiste à remplacer le tenseur de rigidité sécant  $\mathbb{C}_i^{sct}(x)$  par un tenseur constant dans chaque phase ( $i$ ).

$$\mathbb{C}^{sct}(x) = \mathbb{C}_i$$

De plus, il est raisonnable de supposer que le tenseur  $\mathbb{C}_i$  donné par l'équation 3.12 est évalué à une certaine déformation effective  $\varepsilon_{eff}^i$  :

$$\mathbb{C}_i = \mathbb{C}_i^{sct}(\varepsilon_{eff}^i) \quad (3.19)$$

On suppose que la déformation effective dans la phase ( $i$ ) est connue, la version approximative du problème local dans la phase ( $i$ ) peut s'écrire alors comme suit :

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\Delta u + \Delta u^t) \quad (3.20)$$

$$div(\sigma) = 0 \quad (3.21)$$

$$\sigma(x) = \mathbb{C}_i : \varepsilon(x) \quad (3.22)$$

Étant donné le tenseur  $\mathbb{C}_i$ , Le problème ci-dessus est maintenant un problème classique pour un matériau élastique linéaire. Notons que le tenseur de rigidité de la phase  $\mathbb{C}_i$  lui-même dépend du champ de déformation  $\varepsilon$  ( la déformation effective  $\varepsilon_{eff}^i$ ), qui dépend elle-même du tenseur  $\mathbb{C}_i$ . Le problème est donc non linéaire, mais au lieu d'avoir une infinité de problèmes non linéaires à résoudre (à chaque point  $x$ ), il y a seulement  $N$  problèmes non linéaires à résoudre, correspondant au nombre du phases  $N$  dans le composite :

$\mathbb{C}_i = \mathbb{C}_i^{sct}(\varepsilon_{eff}^i)$ , sachant que  $\varepsilon_{eff}^i$  est en fonction de  $\mathbb{C}_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ .

Une fois ces  $N$  problèmes non linéaires sont résolus, la rigidité  $\mathbb{C}_i$  et la déformation effective  $\varepsilon_{eff}^i$  de chaque phase sont connues. Les deux dépendent de manière non linéaire de la déformation globale appliqué  $\mathbf{E}$ . Le composite linéaire correspondant est parfois appelé composite linéaire de comparaison . La rigidité effective  $\mathbb{C}^{hom}$  de ce composite linéaire peut ensuite être estimée par un schéma prédictif linéaire approprié à la microstructure du composite.

$$\mathbb{C}^{hom} = \mathbb{C}^{hom}(f_i, \mathbb{C}_i|_{i=1,\dots,N}) \quad (3.23)$$

Enfin, la loi constitutive globale du composite s'écrit :

$$\Sigma = \mathbb{C}^{hom}(\mathbf{E}) : \mathbf{E} \quad (3.24)$$

## 3.6 Méthode sécante classique : une théorie basée sur la déformation moyenne

Cette méthode est basée sur la moyenne des déformations, c'est-à-dire la déformation effective  $\varepsilon_{eff}^i$  de la phase ( $i$ ) est la déformation moyenne  $\langle \varepsilon \rangle_i$  de la phase elle-même.

$$\varepsilon_{eff}^i = \langle \varepsilon \rangle_i \quad (3.25)$$

La déformation moyenne  $\langle \varepsilon \rangle_i$  de la phase ( $i$ ) peut être obtenue au moyen des tenseurs de concentration des déformations  $A^i$  qui relie la déformation moyenne de la phase avec la déformation macroscopique imposée  $E$  :

$$\varepsilon(x) = A(x) : \mathbf{E} \quad (3.26)$$

$$\varepsilon_{eff}^i = A^i : \mathbf{E} \quad (3.27)$$

$$A^i = \langle A \rangle_i \quad (3.28)$$

Le problème cité ci-dessus est non linéaire, car le tenseur de concentration de déformation  $A^i$  dépend de la rigidité  $C_i$  de la phase ( $i$ ), la rigidité de la phase  $C_i$  elle-même dépend de la déformation moyenne de la phase  $\langle \varepsilon \rangle_i$  et donc du tenseur de concentration de déformation  $A^i$ . Donc la méthode sécante classique implique les étapes suivantes :

1. Une théorie linéaire fournit une expression du tenseur de rigidité homogène  $C^{hom}$  et du tenseur de concentration de déformation  $A^i$  de chaque phase ( $i$ ) en fonction du tenseur de rigidité sécant de la phase  $C_i^{sct}$  et de la microstructure.

2. Résolution du  $N$  problème non linéaire, pour  $N$  Tenseurs sécants inconnus  $\mathbb{C}_i(\varepsilon_{eff}^i)$

$$C_i = C_i^{sct}(\varepsilon_{eff}^i) \quad (3.29)$$

$$\varepsilon_{eff}^i = A^i : E \quad (3.30)$$

$$A^i = A^i(C_i^{sct}) \quad (3.31)$$

3. Une fois que le problème est résolu, la relation contrainte-déformation globale est donnée par :

$$\Sigma = C^{hom}(E) : E \quad (3.32)$$

### 3.6.1 Cas d'un composite isotrope à deux phases

Pour le cas d'un composite isotrope à deux phases, constitué d'une matrice de rigidité  $C_m$  et d'une inclusion de rigidité  $C_I$  et de fraction volumique  $f_I$ , les tenseurs de concentration des déformations  $A^m$  et  $A^I$  seront déterminés en fonction du tenseur de rigidité homogène du composite :

$$A^m = \frac{1}{(1 - f_I)} (C^m - C^I)^{-1} (C^{\text{hom}} - C^I) \quad (3.33)$$

$$A^I = \frac{1}{f_I} (C^I - C^m)^{-1} (C^{\text{hom}} - C^m) \quad (3.34)$$

Le système d'équations non linéaire à résoudre dans la méthode sécante classique est le suivant :

$$\varepsilon_{eff}^m = \frac{1}{(1 - f_I)} (C^m - C^I)^{-1} (C^{\text{hom}} - C^I) : E \quad (3.35)$$

$$\varepsilon_{eff}^I = \frac{1}{f_I} (C^I - C^m)^{-1} (C^{\text{hom}} - C^m) : E \quad (3.36)$$

$$C^m = C_{sct}^m(\varepsilon_{eff}^m), \quad C^I = C_{sct}^I(\varepsilon_{eff}^I), \quad C^{\text{hom}} = C^{\text{hom}}(C^m, C^I, f_I) \quad (3.37)$$

Le système d'équation non linéaires ci-dessus se réduit à :

$$\varepsilon_s^m = a_s^m E_s, \quad \varepsilon_s^I = a_s^I E_s \quad (3.38)$$

$$\varepsilon_{eq}^m = a_{eq}^m E_{eq}, \quad \varepsilon_{eq}^I = a_{eq}^I E_{eq} \quad (3.39)$$

$$a_s^m = \frac{1}{1 - f_I} \frac{k^{\text{hom}} - k^I}{k^m - k^I}, \quad a_s^I = \frac{1}{f_I} \frac{k^{\text{hom}} - k^m}{k^I - k^m} \quad (3.40)$$

$$a_{eq}^m = \frac{1}{1 - f_I} \frac{\mu^{\text{hom}} - \mu^I}{\mu^m - \mu^I}, \quad a_{eq}^I = \frac{1}{f_I} \frac{\mu^{\text{hom}} - \mu^m}{\mu^I - \mu^m} \quad (3.41)$$

$$\mu^m = \mu_{sct}^m(\varepsilon_{eq}^m), \quad \mu^I = \mu_{sct}^I(\varepsilon_{eq}^I) \quad (3.42)$$

$$k^{\text{hom}} = k^{\text{hom}}(k^m, k^I, \mu^m, \mu^I), \quad \mu^{\text{hom}} = \mu^{\text{hom}}(k^m, k^I, \mu^m, \mu^I) \quad (3.43)$$

Si les deux phases sont incompressibles, ces équations non linéaires peuvent être simplifiées pour donner :

$$\varepsilon_{eq}^m = a_{eq}^m E_{eq}, \quad \varepsilon_{eq}^I = a_{eq}^I E_{eq} \quad (3.44)$$

$$\varepsilon_{eq}^m = a_{eq}^m E_{eq}, \quad \varepsilon_{eq}^I = a_{eq}^I E_{eq} \quad (3.45)$$

$$\mu^{\text{hom}} = \mu^{\text{hom}}(k^m, k^I, \mu^m, \mu^I) \quad (3.46)$$

Pour le calcul de la rigidité effectif  $C_{hom}$  on utilise l'approximation de Mori Mataka.

## 3.7 Lois de comportement

Dans ce qui suit, on va présenter les lois de comportement utilisées pour décrire le comportement des phases, la loi de Mazars décrit le comportement linéaire endommageable.

### 3.7.1 Modèle d'endommagement de Mazars

Le modèle de comportement de MAZARS [**maza**] est un modèle simple, réputé robuste, basé sur la mécanique de l'endommagement, qui permet de décrire la diminution de la ri-

gidité du matériau sous l'effet de la création de microfissures dans le béton [30]. Il s'appuie sur une seule variable interne scalaire  $D$ , décrivant l'endommagement de façon isotrope, mais distinguant malgré tout l'endommagement de traction et l'endommagement de compression. Ce modèle ne permet pas de traduire le phénomène de refermeture des fissures (restauration de rigidité). Par ailleurs, le modèle de Mazars ne prend pas en compte les éventuelles déformations plastiques ou effets visqueux qui peuvent être observés au cours des déformations d'un béton. Le modèle de MAZARS a été élaboré dans le cadre de la mécanique de l'endommagement. La contrainte est donnée par la relation suivante :

$$\sigma = (1 - D)\mathbb{C}\varepsilon^e \quad (3.47)$$

Avec :

$\mathbb{C}$  La matrice de rigidité.

$D$  La variable d'endommagement.

$\varepsilon^e$  La déformation élastique.

La variable d'endommagement  $D$ , résulte d'une combinaison d'un endommagement de traction  $D_t$  et d'un endommagement de compression  $D_c$ .

$$D = \alpha_t D_t + (1 - \alpha_t) D_c \quad (3.48)$$

Les endommagements de traction et de compression sont définis par les équations suivantes dès lors que  $\varepsilon_{eq} > \varepsilon_{d0}$

$$D_c = 1 - \frac{\varepsilon_{d0}(1-A_c)}{\varepsilon_{eq}} - \frac{A_c}{\exp[B_c(\varepsilon_{eq}-\varepsilon_{d0})]} \quad (\text{Borné entre 0 et 1}).$$

$$D_t = 1 - \frac{\varepsilon_{d0}(1-A_t)}{\varepsilon_{eq}} - \frac{A_t}{\exp[B_t(\varepsilon_{eq}-\varepsilon_{d0})]} \quad (\text{Borné entre 0 et 1}).$$

Où  $A_c, A_t, B_c, B_t, \varepsilon_{d0}$  sont des paramètres matériaux à identifier.

$D$  est la variable d'endommagement, elle est comprise entre 0, matériau sain, et 1, matériau rompu. L'endommagement est piloté par la déformation équivalente  $\varepsilon_{eq}$ , qui permet de traduire un état triaxial par une équivalence à un état uniaxial. Comme les extensions sont primordiales dans le phénomène de fissuration du béton, la déformation équivalente introduite est définie à partir des valeurs propres positives du tenseur des déformations, soit :

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\langle \varepsilon \rangle_+ : \langle \varepsilon \rangle_+} \quad (3.49)$$

Dans le repère principal du tenseur de déformations :

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\langle \varepsilon_1 \rangle_+ + \langle \varepsilon_2 \rangle_+ + \langle \varepsilon_3 \rangle_+} \quad (3.50)$$

Sachant que la partie positive  $\langle \cdot \rangle_+$  est définie de telle sorte que si  $\varepsilon_i$  est la déformation principale dans la direction  $(i)$ .

$$\begin{cases} \langle \varepsilon_i \rangle_+ = \varepsilon_i \text{ si } \varepsilon_i > 0 \\ \langle \varepsilon_i \rangle_+ = 0 \text{ si } \varepsilon_i < 0 \end{cases} \quad (3.51)$$

Le coefficient  $\alpha_t$  qui réalise le couplage entre endommagement en traction et endommagement en compression est telle qu'en l'absence totale de traction  $\alpha_t = 0$ , et en l'absence

total de compression  $\alpha_t = 1$

$$\alpha_t = \frac{\sum_{i=1}^3 |\langle \varepsilon_i \rangle + \varepsilon_{ti}|}{\varepsilon_{eq}^2} \text{ (borné entre 0 et 1).}$$

Où  $\varepsilon_{ti}$  est la composante principale de la déformation créée par les contraintes principales positives, sous forme tensorielle elle s'écrit :

$$\varepsilon_t = \frac{1 + \nu}{E} \langle \tilde{\sigma} \rangle_+ - \frac{\nu}{E} tr(\langle \tilde{\sigma} \rangle_+) \quad (3.52)$$

$\tilde{\sigma} = \sigma / (1 - D)$  Étant les contraintes effectives au sens de la mécanique de l'endommagement. Le coefficient est un paramètre du matériau qui permet, lorsqu'il est supérieur à 1, d'améliorer la réponse en cisaillement (par rapport à la version originelle de la loi où  $\beta$  avait la valeur 1).

Le modèle du Mazars permet de décrire la dégradation des matériaux et de supposer que l'endommagement est isotrope, l'algorithme de l'implémentation du modèle de Mazars est représenté ci-dessous :

---

**Algorithm 1** : déformation imposé  $\varepsilon$

Calculer la déformation équivalente  $\varepsilon_{eq} = \sqrt{\langle \varepsilon_1 \rangle_+ + \langle \varepsilon_2 \rangle_+ + \langle \varepsilon_3 \rangle_+}$

---

**if**  $\varepsilon_{eq} < \varepsilon_D^0$  **then**

$$D = 0$$

$$E_{sct} = E$$

$$\mathbb{C}_{sct} = \mathbb{C}$$

$$\sigma = \mathbb{C}_{sct} : \varepsilon$$

**else**

$$D = \alpha_t D_t + (1 - \alpha_t) D_c$$

$$E_{sct} = (1 - D) E$$

$$\mathbb{C}_{sct} = (1 - D) \mathbb{C}$$

$$\sigma = \mathbb{C}_{sct} : \varepsilon$$

**end if**

---

Le modèle d'endommagement de Mazars permet une distinction entre le comportement du béton en traction et en compression, les figures 3.1 3.2 illustrent ce propos.

Les figures 3.3 et 3.4 présentent l'évolution de l'endommagement en compression pure et en traction pure, en fonction de la déformation équivalente  $D = f(\varepsilon_{eq})$ .

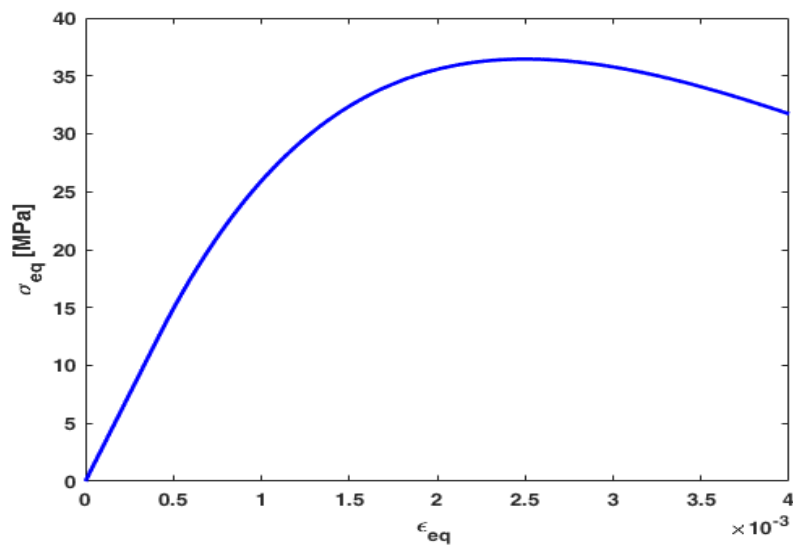


FIGURE 3.1 – Comportement en compression selon la loi de Mazars, contrainte équivalente  $\sigma_{eq}$  en fonction de la déformation équivalente  $\epsilon_{eq}$ .

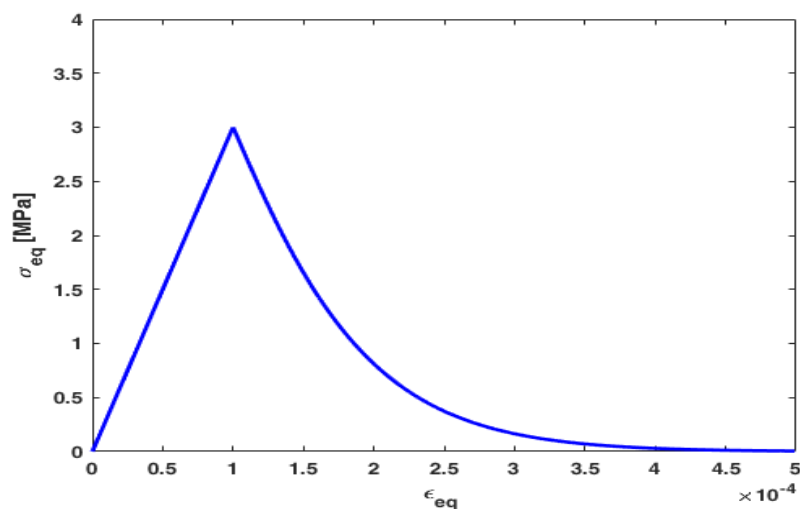


FIGURE 3.2 – Comportement en traction selon la loi de Mazars, contrainte équivalente  $\sigma_{eq}$  en fonction de la déformation équivalente  $\epsilon_{eq}$ .

## 3.8 Simulation du comportement linéaire endommageable : cas d'un béton ordinaire :

### 3.8.1 Comportement du béton ordinaire en compression

Dans cet exemple, le modèle d'endommagement isotrope de Mazars a été implémenté, le modèle a été appliqué uniquement pour la matrice, alors que les granulats sont supposés linéaires élastiques, la fraction volumique des granulats est prise égale à 0.4. Le chargement

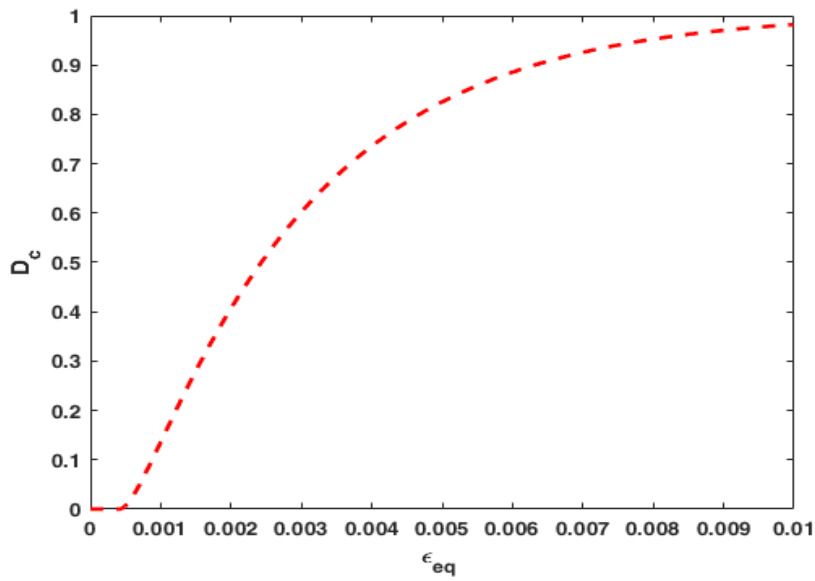


FIGURE 3.3 – Évolution de l’endommagement en compression  $D_c$ , en fonction de la déformation équivalente  $\epsilon_{eq}$

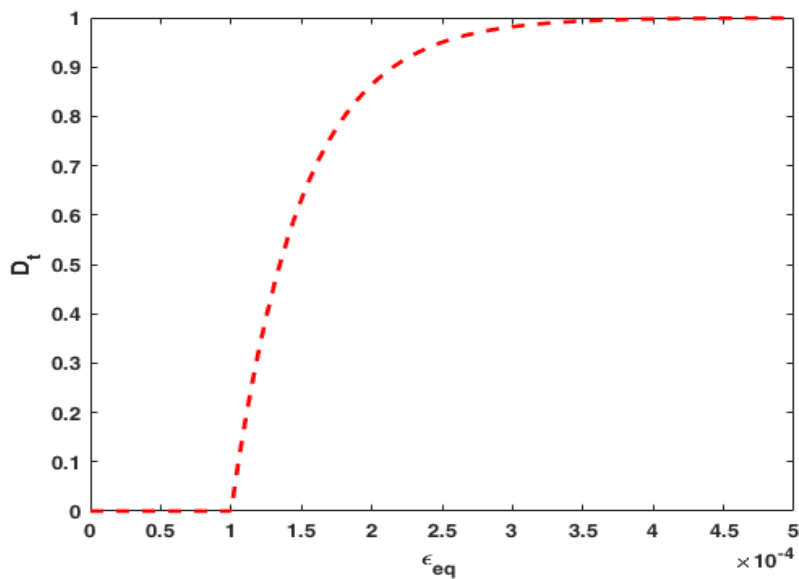


FIGURE 3.4 – Évolution de l’endommagement en compression  $D_t$ , en fonction de la déformation équivalente  $\epsilon_{eq}$

en compression est effectué, en déformations contrôlées, pour simuler la réponse non linéaire du matériau béton. Le tableau suivant contient les paramètres des constituants du béton (mortier, granulats).

La figure 3.5 montre la courbe contrainte équivalente  $\sigma_{eq}$  en fonction de la déformation équivalente appliquée  $\epsilon_{eq}$  du béton sous un chargement en compression, donné par l’homogénéisation sécante, ainsi que les résultats expérimentaux de Cordes [25] et les résultats de Wriggers [74], qui ont fait un modèle élément fini pour simuler le comportement du

TABLE 3.1 – Paramètres des constituants du béton ordinaire.

Phase	E(MPa)	$\nu$	$\varepsilon_D^0$	$A_c$	$B_c$	$\beta$
Mortier	20000	0.2	$10^{-4}$	1	340	1
Granulat naturel	60000	0.22	/	/	/	/

béton à l'aide d'un modèle d'endommagement isotrope, qui permet la modélisation de la dégradation progressive du béton. On peut voir sur la figure 3.5 que la réponse du béton donné par notre modèle est en bon accord avec ceux de Wriggers [74] et de l'expérimental Cordes [25], la déformation au pic expérimental égale à  $2,4 \cdot 10^{-3}$  et celle de notre modèle égale à  $2,3 \cdot 10^{-3}$ , donc la déformation au pic est légèrement sous-estimée, cela peut être due aux zones d'interfaces et les pores dans le béton qui n'ont pas été pris en comptes dans le modèle numérique.

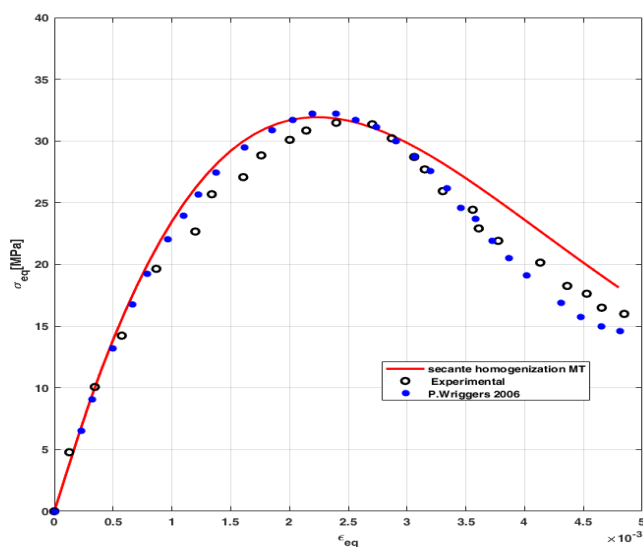


FIGURE 3.5 – Comportement du béton ordinaire en compression par l'homogénéisation sécante : comparaison avec les résultats de Wriggers [74] et de Cordes [25].

### 3.8.2 Comportement du béton ordinaire en traction

Le but de cet exemple est de simuler la réponse du béton en traction uniaxiale en utilisant l'homogénéisation sécante. Le béton est considéré comme un composite à deux phases, la première est la matrice mortier qui obéit à la loi d'endommagement de Mazars, tandis que la deuxième phase est constituée de granulats qui sont supposés linéaires élastiques, le comportement du béton en traction est simulé en approche déformation. Les résultats de notre modèle seront comparés à ceux expérimentaux donnés par Hordijk [1].

Les propriétés mécaniques du mortier et des granulats, à savoir le module de Young et le

coefficient de Poisson, ainsi que les paramètres du modèle de Mazars, sont donnés dans le tableau 3.2

TABLE 3.2 – Paramètres des constituants du béton.

Phase	E(MPa)	$\nu$	$\varepsilon_D^0$	$A_t$	$B_t$	$\beta$
Mortier	16000	0.2	$10^{-4}$	0.9	3000	1
Granulat naturel	60000	0.18	/	/	/	/

La figure 3.6 montre la contrainte équivalente  $\sigma_{eq}$  de traction du béton en fonction de la déformation équivalente  $\varepsilon_{eq}$  appliquée, on voit bien que le modèle arrive à décrire bien le comportement du béton en traction, mais la comparaison des résultats numériques à ceux expérimentaux Hordijk [1], montre que le modèle estime de façon satisfaisante le comportement du composite avant le pic des contraintes mais surestime légèrement la réponse mécanique dans la phase post pic, le modèle estime un pic de contrainte presque égale à celui de l'expérimentale, également, la déformation au pic est en bonne concordance avec celle expérimentale.

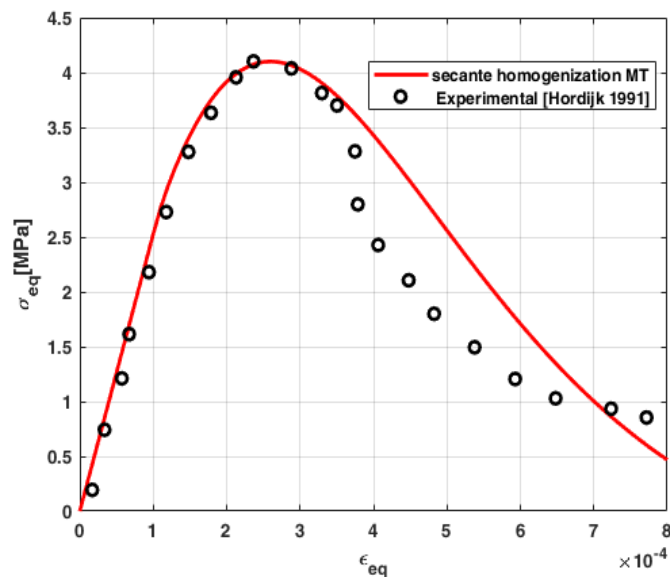


FIGURE 3.6 – Modélisation du comportement du béton en traction : comparaison avec l'expérimental [1].

### 3.9 Modélisation du comportement du béton à base d'agrégats recyclés

On considère un volume élémentaire représentatif du béton recyclé (V), constitué d'une matrice qui est le nouveau mortier, et de deux types d'inclusions, qui sont les granulats recyclés (GR) et les granulats naturels (GN), à savoir que la forme, les propriétés, et l'orientation des deux types d'inclusions sont différentes, , alors pour obtenir les propriétés effectives du béton recyclé, on va faire appel à l'homogénéisation multi phases, inspirée de [8, 53], cette stratégie sera composée de trois étapes d'homogénéisation.

La première a comme objectif de déterminer les propriétés effectives du granulat recyclé (GR) en utilisant le modèle GEEE développé dans [22], car il est considéré comme un matériau à deux phases, constitué d'un granulat d'origine (GO) de rigidité  $\mathbb{C}^{GO}$  entouré partiellement ou globalement par une couche de vieux mortier (VM) de rigidité  $\mathbb{C}^{VM}$  alors cette étape permet d'avoir un granulat recyclé équivalent  $GR_{eq}$  de rigidité  $\mathbb{C}_{GR}^{eq}$ , donnée explicitement par l'équation 3.53.

$$\mathbb{C}_{eq}^{GR} = \mathbb{C}^{VM} + f_{GO}[(\mathbb{C}^{GO} - \mathbb{C}^{VM})^{-1} + (\mathbb{P}^{GO} - f_{GO}\mathbb{P}^{eq})]^{-1} \quad (3.53)$$

Avec :

$$\begin{aligned} \mathbb{P}^{GO} &= \mathbb{S}^{GO}(\mathbb{C}^{VM})^{-1} \\ \mathbb{P}^{eq} &= \mathbb{S}^{eq}(\mathbb{C}^{VM})^{-1} \end{aligned}$$

$\mathbb{C}^{VM}$  et  $\mathbb{C}^{GO}$  désigne la rigidité du vieux mortier (VM) et du granulat d'origine (GO) et  $f_{GO}$  la fraction volumique du granulat d'origine par rapport au volume du granulats recyclé, et  $\mathbb{P}^{GO}$  l'opérateur de Grenn.

En deuxième étape, le volume élémentaire représentatif du béton recyclé est décomposé en grains  $G_i$ , chaque grain est composé d'une matrice qui est le nouveau mortier (NM), et d'une famille d'inclusions, qui est soit les granulats naturels  $GN$  ou les granulats recyclés équivalents  $GR_{eq}$ . Un champ de déformation macroscopique  $\mathbf{E}$  est imposé au VER sur son contour  $dV$ , le champ  $\mathbf{E}$  est égale à la moyenne des déformation dans le VER du béton recyclé :

$$\langle \varepsilon \rangle_{VER} = \mathbf{E} \quad (3.54)$$

En suppose que chaque grain  $G_i$  est soumis à un champ de déformation  $\langle \varepsilon(y) \rangle_{G_i}$  avec :

$$\langle \varepsilon(y) \rangle_{G_i} = \mathbf{E} \quad (3.55)$$

La loi de comportement de chaque grain  $G_i$  peut s'écrire par une formulation sécante comme suit :

$$\langle \sigma \rangle_{G_i} = \mathbb{C}_{homG_i}^{sct} : \langle \varepsilon \rangle_{G_i} \quad (3.56)$$

Le tenseur de rigidité sécant homogène de chaque grain, est déterminé avec le schéma d'homogénéisation à deux phases de Mori Tanaka :

$$\mathbb{C}_{homG_i}^{sct} = \mathbb{C}_{NM}^{sct} + f_i(\mathbb{C}_i^{sct} - \mathbb{C}_{NM}^{sct}) : [\mathbb{I} + f_{NM}\mathbb{S}_{Esh}(\mathbb{C}_{NM}^{sct})^{-1} : (\mathbb{C}_i^{sct} - \mathbb{C}_{NM}^{sct})]^{-1} \quad (3.57)$$

$\mathbb{C}_{NM}^{sct}$  est le tenseur de rigidité sécant de la phase nouveau mortier, et  $\mathbb{C}_i^{sct}$  est le tenseur de rigidité de l'inclusion ( $GN$  ou  $GR_{eq}$ ),  $\mathbb{I}$  le tenseur identité d'ordre quatre,  $\mathbb{S}_{Esh}$  est le tenseur d'Eshelby.

Dans cette deuxième étape d'homogénéisation, l'effet de l'orientation des inclusions dans la matrice sur les propriétés macroscopiques sera pris en compte [48], en considérant différents types d'orientation (aléatoire, aligné, axisymétrique), la distribution aléatoire où les inclusions sont orientées au hasard suivant les trois directions, sera représentée par les angles d'Euler  $(\alpha, \beta, \gamma)$ , qui permettent le passage du repère local  $(x, y, z)$  de l'inclusion au repère globale  $(x'', y'', z'')$  via trois rotations, tandis que la distribution alignée et axisymétrique sera représentée par la fonction de distribution des orientations ODF  $\lambda(\alpha, \gamma)$ .

Pour une distribution aléatoire, la transformation du tenseur de localisation des déformations dilué  $\mathbb{A}^{dilu}$  du repère local au repère global sera déterminée comme suit :

$$\langle \mathbb{A}_{ijkl}^{dilu} \rangle = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} a_{im} a_{jn} a_{kp} a_{lq} \mathbb{A}_{mnpq}^{dilu} \sin(\beta) d\beta d\alpha d\gamma \quad (3.58)$$

$$\mathbb{A}_{mnpq}^{dilu} = [\mathbb{I} + \mathbb{S}^{Esh} (\mathbb{C}_{NM}^{sct})^{-1} (\mathbb{C}_i^{sct} - \mathbb{C}_{NM}^{sct})]^{-1} \quad (3.59)$$

Dans la troisième étape, le volume élémentaire représentatif est considéré comme un agrégat constitué de plusieurs grains  $G_i$ , chaque grain est caractérisé par sa rigidité homogène  $\mathbb{C}_{homG_i}^{sct}$  calculée dans la deuxième étape. L'agrégat obtenu est un composite multiphasés, qui est homogénéisé avec le modèle de Voigt ou de Reuss.

### Voigt

Dans ce modèle l'hypothèse de base, est que le champ de déformation est uniforme dans l'agrégat, la rigidité homogénéisée est obtenue comme suit :

$$\mathbb{C}_{hom}^{sct} = \sum_{i=1}^N f_{G_i} \mathbb{C}_{homG_i}^{sct} \quad (3.60)$$

### Reuss

L'hypothèse de base de ce modèle est que le champ des contraintes est uniforme dans l'agrégat. La rigidité macroscopique effective peut être écrite comme suit :

$$\mathbb{C}_{hom}^{sct} = \sum_{i=1}^N f_{G_i} (\mathbb{C}_{homG_i}^{sct})^{-1}]^{-1} \quad (3.61)$$

## 3.9.1 Comportement des phases constitutive du béton recyclé

Dans ce paragraphe, on présente les lois de comportement qui régissent chaque phase qui constitue le béton recyclé.

### Phases granulats

Les granulats naturels  $GN$  et les granulats recyclés équivalents  $GR_{eq}$ , représentent les phases renforts ou inclusions dans le béton recyclé, dans notre modèle, le comportement

des  $GN$  et  $GR_{eq}$  est supposé élastique linéaire, donc la contrainte moyenne dans ces deux phases est liée linéairement à la moyenne de la déformation.

### Matrice mortier

Le nouveau mortier peut être régi par la loi de comportement endommageable de Mazars [42], largement utilisée dans la littérature, pour décrire le comportement élastique endommageable de ce matériau.

Le modèle de MAZARS a été élaboré dans le cadre de la mécanique de l'endommagement. La contrainte en fonction de la déformation est donnée par la relation suivante :

$$\bar{\sigma}^{(NM)} = \mathbb{C}_{sct}^{(NM)} (\bar{\varepsilon}^{(NM)}) \quad \bar{\varepsilon}^{(NM)} = (1 - D) \mathbb{C}^{(NM)} \bar{\varepsilon}^{(NM)} \quad (3.62)$$

Avec :

$\mathbb{C}^{(NM)}$  La matrice de rigidité.

$D$  La variable d'endommagement.

$\varepsilon_{eq}$  La déformation élastique.

La variable d'endommagement  $D$ , résulte d'une combinaison d'un endommagement de traction  $D_t$  et d'un endommagement de compression  $D_c$ .

$$D = \alpha_t^\beta D_t + (1 - \alpha_t)^\beta D_c \quad (3.63)$$

Les coefficients d'endommagement de traction et de compression sont définis par les équations suivantes dès lors que  $\varepsilon_{eq} > \varepsilon_D^0$  :

$$D_c = 1 - \frac{(1 - A_c)}{\varepsilon_{eq}} - A_c \exp(-B_c (\varepsilon_{eq} - \varepsilon_D^0)) \quad (\text{Borné entre 0 et 1})$$

$$D_t = 1 - \frac{(1 - A_t)}{\varepsilon_{eq}} - A_t \exp(-B_t (\varepsilon_{eq} - \varepsilon_D^0)) \quad (\text{Borné entre 0 et 1})$$

Avec :  $A_c, A_t, B_c, B_t$  des paramètres matériaux.

$D$  est la variable d'endommagement, elle est comprise entre 0, pour un matériau sain, et 1 pour un matériau rompu. L'endommagement est piloté par la déformation équivalente  $\varepsilon_{eq}$ , qui permet de traduire un état triaxial par un état uniaxial équivalent. Comme les extensions sont primordiales dans le phénomène de la fissuration du béton, la déformation équivalente introduite est définie à partir des valeurs propres positives du tenseur des déformations, soit :

$$\sqrt{\langle \varepsilon \rangle_+ : \langle \varepsilon \rangle_+}$$

Dans le repère principal du tenseur de déformations :

$$\sqrt{\langle \varepsilon_1 \rangle_+ + \langle \varepsilon_2 \rangle_+ + \langle \varepsilon_3 \rangle_+}$$

Sachant que la partie positive  $\langle \varepsilon \rangle_+$  est définie de telle sorte que si  $\varepsilon_i$  est la déformation principale dans la direction (i) :

$$\begin{aligned} \langle \varepsilon_i \rangle_+ &= \varepsilon_i \quad \text{si } \varepsilon_i > 0 \\ \langle \varepsilon_i \rangle_+ &= 0 \quad \text{si } \varepsilon_i < 0 \end{aligned}$$

Le coefficient  $\alpha_t$  qui réalise le couplage entre l'endommagement en traction et l'endommagement en compression est égale à 0 en l'absence totale de la traction, et égale à 1 en l'absence totale de la compression.

$$\alpha_t = \frac{\sum_{i=1}^{i=3} | \langle \varepsilon_i \rangle + \varepsilon_{ti} |}{\varepsilon_{eq}^2}$$

Où  $\varepsilon_{ti}$ , est la composante principale de la déformation créée par les contraintes principales positives, sous forme tensorielle, elle s'écrit :

$$\varepsilon_t = \frac{1 + \nu}{\mathbf{E}} (\langle \tilde{\sigma} \rangle_+) - \frac{\nu}{\mathbf{E}} tr(\langle \sigma \rangle_+)$$

$\tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}/(1 - D)$  Étant les contraintes effectives au sens de la mécanique de l'endommagement. Le coefficient  $\beta$  est un paramètre du matériau qui permet, lorsqu'il est supérieur à 1, d'améliorer la réponse en cisaillement (par rapport à la version originelle de la loi où  $\beta$  avait la valeur 1).

### 3.9.2 Algorithme général

Nous présentons la combinaison entre la stratégie d'homogénéisation sécante d'un composite multiphasés, dans notre cas qui est le béton recyclé, avec les lois de comportement de chaque constituant, la matrice nouveau mortier ( $NM$ ) obéi à la loi élastique endommageable de Mazars, et les deux types d'inclusions, les granulats naturels  $GN$  et les granulats recyclés  $GR_{eq}$  restent linéaires élastiques. Dans la formulation sécante, on calcule la contrainte macroscopique  $\Sigma$  et le tenseur de rigidité  $C_{hom}^{sct}$ , à l'itération  $(n + 1)$ , les données sont la déformation macroscopique appliquée  $\mathbf{E}_{n+1}$ . Les propriétés de chaque phase du béton recyclé ( $NM, GN, GR_{eq}$ ) sont connues à l'étape précédente ( $n$ ). Dans la suite, afin de simplifier la notation, le domaine d'un pseudo-grain  $G_i$  est désigné par  $\omega$ , ses constituants sont notés par  $\omega_{NM}$  pour la matrice mortier, et  $\omega_i$  pour la phase inclusion ( $GN$ ) ou ( $GR_{eq}$ ).

- Boucle sur chaque pseudo grain  $\omega$ 
  - Voigt en homogénéisation finale  $\langle \varepsilon \rangle_\omega = \mathbf{E}$ .
  - Initialisation dans la phase matrice nouveau mortier  $\langle \varepsilon \rangle_{\omega_{NM}} = \mathbf{E}$ .
    - Appeler le modèle de Mazars avec  $\langle \varepsilon \rangle_{\omega_{NM}}$  comme argument, ce modèle nous donne la rigidité sécante de la matrice  $\mathbb{C}_{NM}^{sct}$  et la contrainte moyenne  $\langle \sigma \rangle_{NM}$ .
    - Calculer le tenseur de rigidité sécant  $\mathbb{C}_{hom}^{sct}$ .
    - Calculer le tenseur de concentration de la déformation dans la phase matrice .

$$A_{NM} = \frac{1}{f_{NM}} (\mathbb{C}_{NM}^{sct} - \mathbb{C}_i)^{-1} (\mathbb{C}_{hom}^{sct} - \mathbb{C}_i)$$

- Calculer la déformation dans la phase matrice  $NM$ .

$$\varepsilon_{NM} = A_{NM} : \mathbf{E}$$

- Calculer le tenseur de concentration de la déformation dans la phase inclusion.

$$A_i = \frac{1}{f_i} (\mathbb{C}_i - \mathbb{C}_{NM}^{sct})^{-1} (\mathbb{C}_{hom}^{sct} - \mathbb{C}_{NM}^{sct})$$

- Calculer la déformation dans la phase inclusion.

$$\langle \varepsilon \rangle_{\omega_i} = A_i : \mathbf{E}$$

- Vérifier la comptabilité des déformations dans la phases matrice .

$$\varepsilon_{NM} =? \langle \varepsilon \rangle_{\omega_{NM}}$$

- Si oui pas plus d'itérations sur ce pseudo grain.
- Sinon, effectuer une nouvelle itération avec.

$$\langle \varepsilon \rangle_{\omega_{NM}} = \varepsilon_{NM}$$

- Après convergence on détermine la rigidité homogène sécante du pseudo grain avec Mori Tanaka  $\mathbb{C}_{homG_i}^{sct}$ .

$$\mathbb{C}_{homG_i}^{sct} = \mathbb{C}_{NM}^{sct} + f_i (\mathbb{C}_i^{sct} - \mathbb{C}_{NM}^{sct}) : [\mathbb{I} + f_{NM} \mathbb{S}_{Esh}(\mathbb{C}_{NM}^{sct})^{-1} : (\mathbb{C}_i^{sct} - \mathbb{C}_{NM}^{sct})]^{-1}$$

- Calculer le module sécant du VER et la contrainte macroscopique.

$$\mathbb{C}_{hom}^{sct} = \sum_{i=1}^N f_{G_i} \mathbb{C}_{homG_i}^{sct}$$

$$\Sigma = \mathbb{C}_{hom}^{sct} : \mathbf{E}$$

### 3.10 Conclusion

Dans ce chapitre, le modèle d'homogénéisation linéaire est étendue au domaine non-linéaire, pour décrire le comportement des matériaux élastiques endommageables, cela est possible via le couplage d'une méthode de linéarisation avec les lois de comportements des différentes phases du matériau. Le problème non linéaire est décomposé en une succession de problème linéaire à chaque pas de chargement par une formulation sécante. L'avantage d'une telle démarche se manifeste par les relations linéaires entre les champs de contraintes et de déformations à chaque pas de chargement permettant de préserver les symétries matérielles en particulier l'isotropie. Le couplage entre la linéarisation sécante avec la méthode d'homogénéisation à champ moyen Mori Tanak, permet de décrire le comportement non linéaire des composites à deux phases. Plusieurs tests de simulation de comportement des composites à deux phases sont faites.

Un algorithme permettant la modélisation de comportement du béton recyclé est présenté. A chaque pas de chargement, les propriétés des phases constitutives sécantes sont déterminées et utilisées pour prédire les contraintes ou les déformations effectives du composite. Plusieurs modèles d'homogénéisation linéaires ont été exploités : le modèle de Mori-Tanaka, le modèle de Voigt et le modèle GEEE adapté aux inclusions multicouches.



## CHAPITRE 4

---

4.1	Introduction . . . . .	66
4.2	Matériaux du béton . . . . .	66
4.2.1	Le liant hydraulique . . . . .	66
4.2.2	Les granulats . . . . .	67
4.3	Confection du béton au laboratoire . . . . .	70
4.4	Essai sur le béton frais . . . . .	71
4.5	Essai sur le béton durci . . . . .	71
4.5.1	Essai non destructif . . . . .	72
4.5.2	Essai destructif . . . . .	72
4.6	Résultats et discussion . . . . .	74
4.6.1	Béton à l'état frais . . . . .	74
4.6.2	: Béton à l'état durci . . . . .	75
4.7	Conclusion . . . . .	82

---

## 4.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de bien décrire et de présenter les différentes étapes et manipulations réalisées au laboratoire, à savoir la caractérisation physique et mécanique des granulats naturels GN et recyclés GR utilisés dans la fabrication du béton, en effectuant plusieurs tests d'identification comme l'analyse granulométrique, l'essai Los Angeles, et aussi la détermination de la densité et l'absorption des granulats naturels et recyclés. Le béton confectionné dans notre étude est du type ordinaire qui sera utilisé dans le domaine du génie civil, ou la résistance visée à l'âge de 28 jours est de 25 MPa, pour la formulation du béton on utilise la méthode de Dreux Gorisse pour déterminer la quantité des différents composants nécessaires pour  $1\text{m}^3$  de béton.

Le béton confectionné est testé à l'état frais et à l'état durci, à l'état frais, l'essai au cône d'Abrams mesure la consistance et la maniabilité du béton, et à l'état durci, l'essai ultrason détermine la compacité du matériau, les essais destructifs à l'état durci, comme l'essai en compression, donne la résistance maximale en compression du béton ainsi que son comportement, et la même chose pour le teste de flexion à quatre pointes.

Dans cette étude, quatre échantillons de béton sont préparés, le premier est un béton naturel BN préparé uniquement avec des granulats naturels, les trois autres échantillons sont le béton recyclé BR, dans lequel les granulats naturels GN sont substitués par des granulats recyclés GR avec différents taux de remplacement (25%, 50%, 75%).

## 4.2 Matériaux du béton

Pour la confection du béton, on utilise des granulats naturels GN et des granulats recyclés GR, et un liant hydraulique (ciment CEM II).

### 4.2.1 Le liant hydraulique

Le ciment utilisé dans cette étude est produit par l'entreprise LAFARGE du type CPJ-CEM II/B 42,5 N, est aussi conforme à la norme Algérienne (NA) et européenne (EN 197-1), sa finesse suivant la méthode de Blaine est de  $3700\text{-}5200\text{ g/cm}^2$ .

TABLE 4.1 – Composants du liant hydraulique.

Composant	Pourcentage %
Clinker	80 à 94%
calcaire	6 à 10%
Constituants secondaires	0 à 5 %



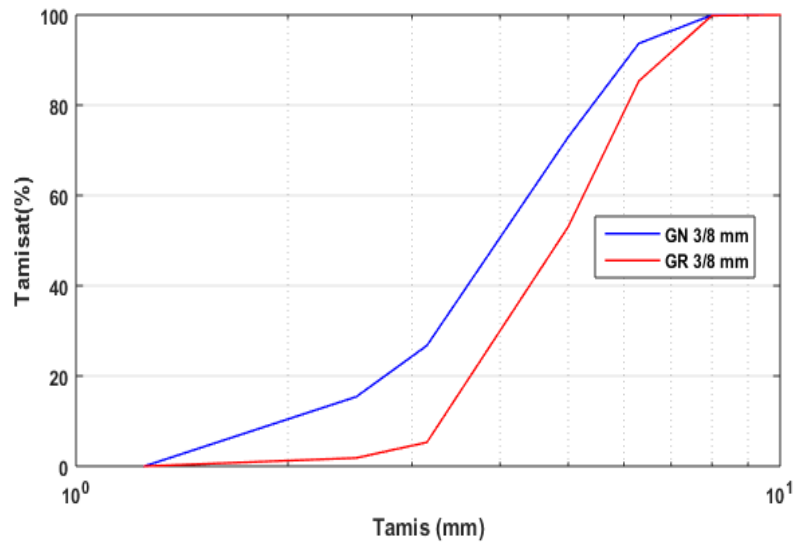


FIGURE 4.2 – Courbe granulométrique du gravier naturel et recyclé (3/8mm).

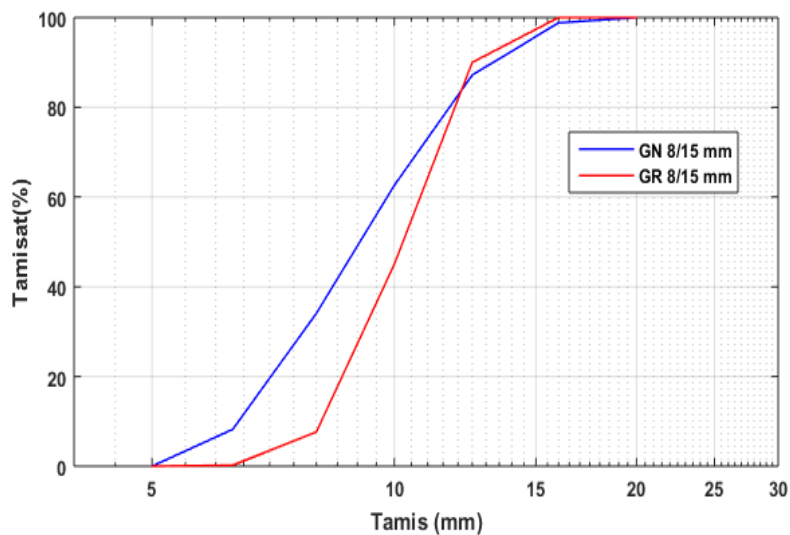


FIGURE 4.3 – Courbe granulométrique du gravier naturel et recyclé (8/15mm).

TABLE 4.2 – Propriétés des granulats naturels (GN) et des granulats recyclés (GR).

Matériau	SN 0/3 mm	GN 3/8 mm	GN 8/15 mm	GR 3/8 mm	GR 8/15 mm
M-V apparente ( $Kg/m^3$ )	1680	1486	1481	1212	1258
M-V absolue ( $Kg/m^3$ )	2670	2565	2565	2521	2521
Absorption (%)	2.87	1.42	0.89	5.5	4.95
CLA (%)	/	30.49	33.24	30.1	34.74
Module de finesse	3.05	/	/	/	/

D'après le tableau 4.2, la masse volumique apparente et absolue des granulats recyclés est inférieure à celle des granulats naturels, l'absorption des GN (3/8mm) et GN (8/15mm) est

de 1,42% et 0,89%, et l'absorption des GR (3/8mm) et GR (8/15mm) est de 5,5% et 4,95%, on remarque que l'absorption des granulats recyclés représente cinq fois l'absorption des granulats naturels, la diminution du poids et l'augmentation de l'absorption des granulats recyclés sont attribuées directement à la pâte cimentaire attachée autour du granulats d'origine, cette pâte cimentaire présente des propriétés différentes que celles de granulats qu'il entoure, elle contient des vides et des pores qui font réduire le poids d'une part, et d'autre part augmente la capacité d'absorption.

Le coefficient Los Angeles (CLA) du gravier recyclé (8/15mm) est supérieur à celui du gravier naturel (8/15mm) de 4.4%, cela est attribué à la pâte cimentaire attachée au granulats recyclé qui présente une faible résistance à l'usure, tandis que le CLA du gravier naturel (3/8mm) et le CLA de gravier recyclé (3/8mm) présentent une légère différence, alors leur résistance à la fragmentation est presque la même.

### Eau de gâchage

L'eau utilisée est l'eau disponible au niveau du laboratoire qui est une eau de robinet potable.

### Formulation de béton

La formulation des échantillons est déterminée par la méthode de Dreux Gorisse. L'objectif de cette méthode est de déterminer en fonction de la maniabilité et de la résistance, la nature et la quantité des matériaux nécessaires pour la confection d'un mètre cube (1m<sup>3</sup>) de béton (eau, ciment, sable, gravier en (kg/m<sup>3</sup>)). Le béton confectionné est un béton plastique qui a une résistance de 25 MPa à l'âge de 28 jours, et qui est utilisé dans le domaine du génie civil. La substitution des granulats naturels par les granulats recyclés est une substitution volumique.

TABLE 4.3 – Formulations des échantillons ( BN, BR25, BR50, BR75 ).

Matériau	BN	BR25	BR50	BR75
Ciment (kg)	400	400	400	400
Eau (kg)	228	228	228	228
SN(0/3) (kg)	616,77	616,77	616,77	616,77
GN(3/8) (kg)	169,29	126,9675	84,645	42,32
GR(3/8) (kg)	0	41,5965	83,193	124,8
GN(8/15) (kg)	1049,6	787,19	524,799	262,4
GR(8/15) (kg)	0	249,8166	499,6332	749,45

### 4.3 Confection du béton au laboratoire

Pour avoir des matériaux propres, démunis de toutes impuretés, les graviers sont lavés puis séchés dans une étuve pendant 24H à une température de 105 °C. Dans ce travail quatre échantillons du béton sont réalisés comme il est bien montré dans le tableau 4.3.

- **BN** : Béton naturel, préparé uniquement avec des granulats naturels, et sert comme référence pour notre étude.

- **BR25** : Béton recyclé, où 25% des granulats naturels GN sont remplacés par des granulats recyclés GR.

- **BR50** : Béton recyclé, où 50% des granulats naturels GN sont remplacés par des granulats recyclés GR.

- **BR75** : Béton recyclé, où 75% des granulats naturels GN sont remplacés par des granulats recyclés GR.

Les moules utilisés pour confectionner les différentes éprouvettes sont huilés afin de faciliter le décoffrage, tous les échantillons sont préparés dans les mêmes conditions, en suivant les étapes ci-dessous :

1. Préparation des matériaux (eau, ciment, sable, gravier).
2. Humidifier les parois du malaxeur.
3. Mettre les matériaux dans le malaxeur en commençant de plus gros diamètres au plus petit.
4. Malaxer les matériaux à l'état sèche pendant 30 secondes.
5. Ajouter 10% d'eau du gâchage et malaxer pendant 30 secondes.
6. Ajouter le reste d'eau du gâchage et malaxer pendant une minute et 30 secondes.



FIGURE 4.4 – Matériaux du béton.

### Géométrie et conservation des éprouvettes

Les éprouvettes utilisées pour les essais de compression sont cylindriques, de diamètre  $D=16\text{cm}$  et de hauteur  $H=32\text{cm}$ , et les éprouvettes utilisées pour les essais de flexion quatre points sont de forme prismatique, de largeur de  $l=8\text{cm}$  et une hauteur de  $H=10\text{cm}$  et d'une longueur  $L=40\text{cm}$ , pour le teste de flexion à quatre points, deux séries de poutres ont été préparés, la première est avec une entaille d'épaisseur  $e=3\text{mm}$  et d'une hauteur  $h=4\text{cm}$ , tandis que la deuxième sérié ne possède aucune entaille. Les éprouvettes sont coulées dans des moules en acier, après sont conservées au laboratoire à une température de  $25^\circ\text{C}$  pendant 24 heures, après décoffrage les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'au jour du teste qui est à l'âge de 28 jours.

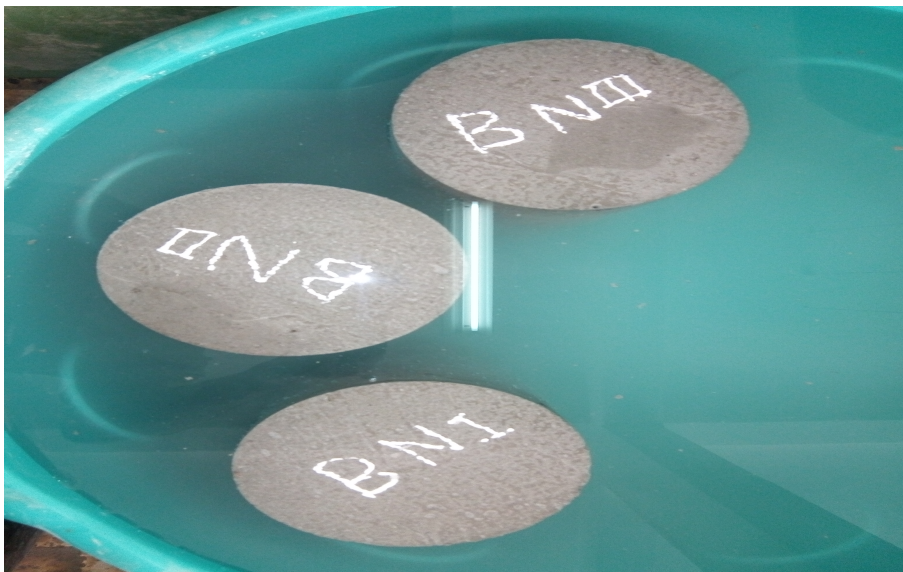


FIGURE 4.5 – Conservation des éprouvettes.

### 4.4 Essai sur le béton frais

L'essai au cône d'Abrams sert à déterminer la consistance du béton en mesurant la valeur de l'affaissement au cône d'Abrams sous l'effet du poids propre du béton. Pour réaliser ce teste on aura besoin d'une plaque d'appui et d'un cône tronconique, aussi une tige de piquage, cet essai est réalisé sur les différentes formulations du béton (BN, BR25, BR50, BR75).

### 4.5 Essai sur le béton durci

Ces essais sont divisés en deux types, le premier type est non destructif, et le deuxième est destructif, ils seront réalisés sur le béton à l'état durci, leur objectif est d'évaluer les propriétés mécaniques du béton, et de déterminer l'influence de l'ajout des granulats recyclés



FIGURE 4.6 – Description d'essai d'affaissement.

GR sur la compacité et la résistance mécanique du béton.

#### 4.5.1 Essai non destructif

L'ultrason est un essai non destructif qui permet d'évaluer la qualité du matériau, via la détermination de la vitesse de propagation d'ondes longitudinales, à savoir que cette vitesse est d'autant plus élevée que le matériau est compact et résistant. Le principe est de mesurer le temps mis par une onde ultrason à parcourir une distance  $L$  connue, l'appareil qui nous permet la réalisation de ce teste est composé de :

- Un générateur d'impulsions électriques.
- Paire de transducteurs.
- Un amplificateur.
- Un dispositif électronique de mesure de temps permettant de mesurer la durée écoulée entre le départ d'une impulsion générée par le transducteur - émetteur et son arrivée au transducteur - récepteur.

La vitesse moyenne de propagation d'onde est le résultat de la division de la longueur du trajet sur le temps mis par l'onde.

#### 4.5.2 Essai destructif

Dans la campagne expérimentale, deux essais mécaniques sont utilisés sur des éprouvettes du béton, le premier essai est la compression uni-axial, le deuxième est l'essai de flexion à quatre points.

### Essai de compression sur éprouvettes cylindriques

L'objectif principal de cet essai est de déterminer la résistance maximale en compression du béton à l'âge de 28 jours, et le comportement qui est en fonction de la contrainte et la déformation, ainsi que le module de Young initiale  $E_{b0}$ .

Le teste de compression est réalisé à l'aide d'une presse hydraulique de capacité de charge de 2000 KN, l'éprouvette de béton est soumise à un chargement progressif, avec un pas de chargement de 0.5 KN/seconde, la force appliquée est affichée sur l'écran de la machine et le raccourcissement du béton est donné par des comparateurs, pour chaque pas de chargement, on enregistre la force et la déformation correspondante.



FIGURE 4.7 – Essai de compression uni axial.

### Essai de flexion quatre points

L'essai de flexion en quatre points sert à déterminer la résistance et le comportement en flexion du béton, le teste est réalisé sur des poutres prismatiques avec et sans entaille. La machine avec laquelle on a réalisé ce test est du type IBERTESTE de capacité maximale de 200 KN, l'effort de flexion est appliqué progressivement sur la poutre avec une vitesse de chargement de 0,3 KN/seconde, l'effort et le déplacement correspondant sont donnés automatiquement par l'ordinateur relié à la machine.



FIGURE 4.8 – Dispositif d'essai de flexion quatre points

## 4.6 Résultats et discussion

### 4.6.1 Béton à l'état frais

Les résultats d'essai d'affaissement au cône d'Abrams permettent d'évaluer l'effet des granulats recyclés GR sur les paramètres du béton frais, et aussi les propriétés rhéologiques. D'après les résultats présentés dans la figure 4.9, le béton naturel BN préparé uniquement avec des granulats naturels présente un affaissement de 8,5 mm et le béton BR25 possède un affaissement de 7,5mm, alors tous les deux s'agissent d'un béton plastique, le béton recyclé BR50 à un affaissement de 5mm, donc sa consistance est ferme, et le béton recyclés BR75 possède un affaissement de 2,5mm, donc il s'agit d'un béton ferme.

D'après les résultats, on constate que le béton naturel BN et le béton recyclé BR25 ont la même consistance, donc une substitution de 25% des granulats naturels GN par des granulats recyclés GR n'affecte pas l'état du béton frais, mais l'augmentation de la substitution engendre une diminution significative de l'affaissement et un changement au niveau de la consistance, ces remarques sont attribuées à l'ajout des granulats recyclés, qui présentent une absorption élevée due aux vides présents dans la pâte du ciment adhérent au granulats d'origine, à savoir que l'augmentation de taux de substitution des GN par des GR fait augmenter la porosité, cette dernière absorbe une quantité d'eau de gâchage, ce qui entraîne la diminution de l'affaissement et change la consistance du béton.

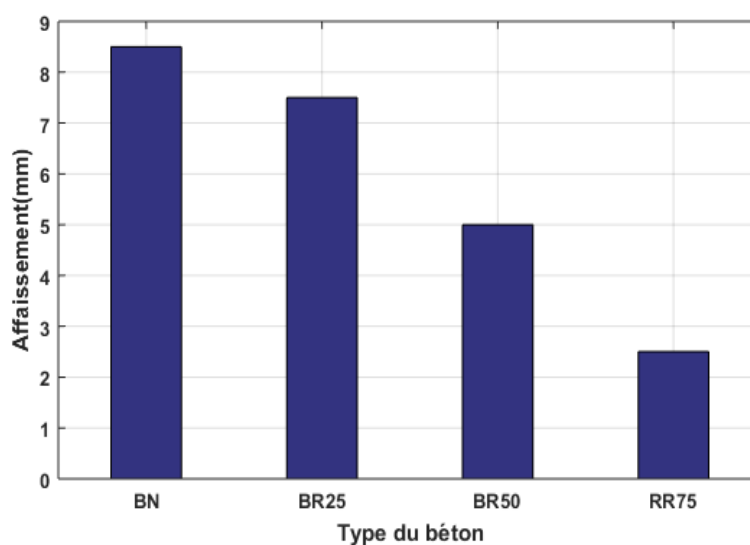


FIGURE 4.9 – Affaissement au cône d'Abrams.

#### 4.6.2 : Béton à l'état durci

##### Comportement en compression

La résistance à la compression  $f_{c28}$  des différents bétons (BN, BR25, BR50, BR75) est déterminée à l'âge de 28 jours, sur des éprouvettes cylindriques de diamètre  $D=16\text{mm}$  et d'une hauteur  $H=32\text{mm}$ . Le but c'est d'appréhender l'effet de l'incorporation des granulats recyclés sur la résistance à la compression, tout en gardant le même rapport E/C, les résultats sont montrés sur la figure 4.10 sous forme d'histogramme.

La résistance à la compression du béton naturel est de 27,13 MPa, et celle du béton recyclé BR25 est de 26,43 MPa, avec une diminution de 2,6% par rapport à celle du BN, et la résistance à la compression du béton BR50 et BR75 est de 25,65 MPa et 24,183 MPa, respectivement, d'où la diminution de la résistance à la compression du béton BR50 et BR75 est de 5,45% et 8,44% , respectivement, alors on constate que l'ajout des granulats recyclés GR fait diminuer la résistance à la compression à l'âge de 28 jours [55] , et la résistance du béton recyclé diminue avec l'augmentation de taux de substitution des granulats naturels GN par des granulats recyclés GR [51] , cette diminution de la résistance est attribuée directement aux propriétés mécaniques et physiques des granulats recyclés, car ces dernières sont de moindre qualité par rapport à celle des granulats naturels. Effectivement, les granulats naturels sont produits après concassages des roches naturelles (exemple calcaire) dont la résistance à la compression est supérieure ou égale à 50 MPa, tandis que les granulats recyclés utilisés dans notre étude proviennent après concassage des déchets de la démolition où la résistance du béton source est inconnue et loin d'atteindre la résistance d'une roche naturelle, aussi l'un des paramètres qui affecte la résistance du béton est la composition des granulats, la pâte de ciment adhérente autour du granulat recyclé contient des pores et des fissures qui font diminuer les propriétés mécaniques.

La figure 4.11 montre la courbe contrainte-déformation de tous les échantillons, le comportement est déterminé par l'essai de compression uni axial, d'après la figure 4.11 les courbes

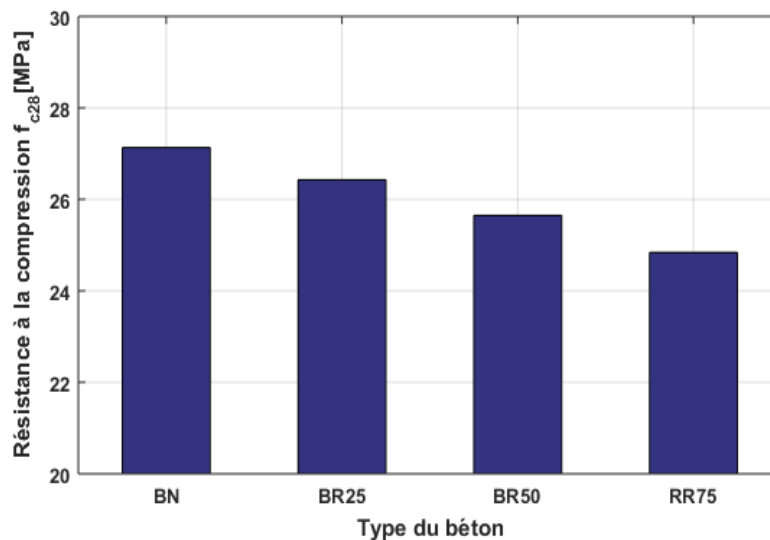


FIGURE 4.10 – Résultats du la compression

de comportement présentent trois parties, la première est la partie linéaire et la deuxième est la partie non linéaire de la branche ascendante, et la troisième partie représente la branche descendante [50], on remarque que la courbe de comportement du béton change avec l'incorporation des granulats recyclés GR, et aussi une réduction de la contrainte au pic [75], on remarque aussi que l'augmentation du taux de remplacement fait augmenter la déformation au pic, et aussi la courbure de la phase post-pic du béton recyclé présente un aplatissement par rapport à celle du béton naturel BN, cela peut être justifié par la diminution de la résistance du béton lorsqu'on remplace les granulats naturels GN par des granulats recyclés GR, ainsi que la diminution du module élastique du béton recyclé, aussi la présence d'interfaces entre le nouveau mortier-granat naturel, ancien mortier-granat d'origine, ancien mortier-nouveau mortier induit le développement des micro fissures au niveau de ces interfaces [27].

Dans la figure 4.12, le déplacement en pic des contraintes est donné en fonction du remplacement des granulats naturels GN par des granulats recyclés GR, on observe que le pic des déformations de tous les échantillons du béton est plus ou moins de 2%, qui est généralement la déformation au pic du béton. On constate que l'ajout des granulats recyclés affecte la déformation au pic, à savoir que l'augmentation du taux de remplacement fait augmenter la déformation au pic. Cela peut être justifié par le comportement mécanique des granulats recyclés, qui présentent des déformations plus élevées par rapport aux granulats naturels lors d'un chargement.

Les images présentées en figure 4.13 et 4.14 et 4.15 et 4.16 présentent les échantillons de béton à la fin de l'essai de compression, au niveau du béton naturel BN on observe des fissures principales qui traversent le long du cylindre et aussi des fissures fines, toutes les fissures sont verticales et parallèles à la charge de compression, et la partie supérieure de l'échantillon ne présente aucun endommagement. Le béton recyclé BR25 dont 25% des granulats naturels sont substitués par des granulats recyclés GR, les fissures sont légèrement influencées par la présence des GR, dont on remarque une petite augmentation d'épaisseur des fissures principales, et aussi de leur nombre, et des fissures fines apparaissent au niveau

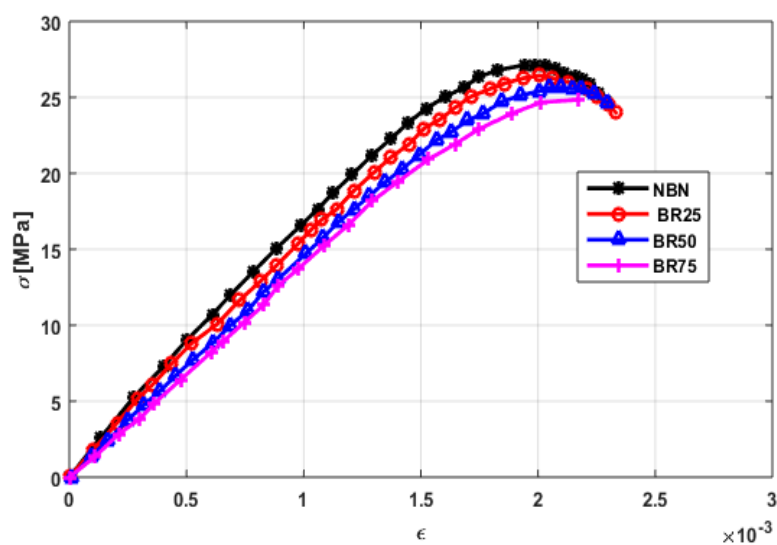


FIGURE 4.11 – Comportement des échantillons du béton BN, BR25, BR50, BR75 en compression uni axial. Contrainte en fonction de la déformation.

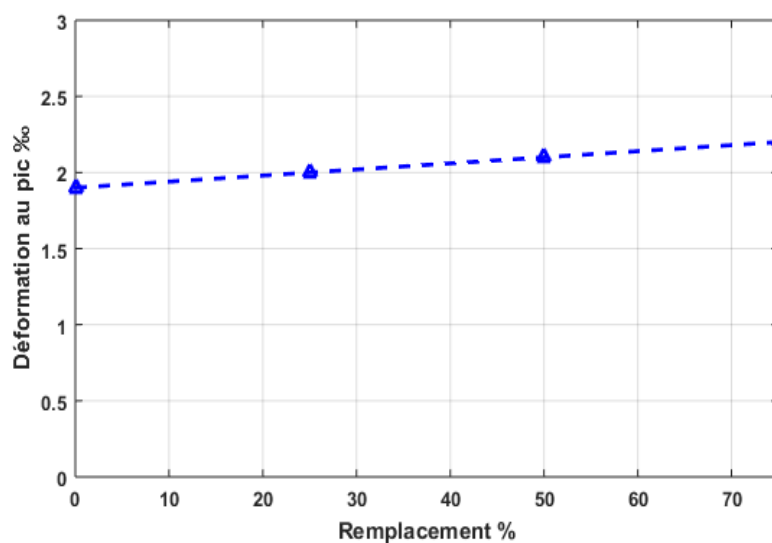


FIGURE 4.12 – Déformation au pic du chargement en fonction de taux de remplacement des granulats naturels GN par des granulats recyclés GR.

de la partie supérieure de l'échantillon. Au niveau des échantillons BR50 et BR75, l'ouverture des fissures est très remarquable, et des fissures horizontales perpendiculaires au sens du chargement commencent à apparaître, et des fissures sont développées dans la partie supérieure de l'échantillon.



FIGURE 4.13 – Propagation des fissures suivant le sens de compression BN.



FIGURE 4.14 – Propagation des fissures suivant le sens de compression BR25.



FIGURE 4.15 – Propagation des fissures suivant le sens de compression BR50.



FIGURE 4.16 – Propagation des fissures suivant le sens de compression BR75.

On conclut que l'incorporation des granulats recyclés induit un changement au niveau de la propagation des fissures, les bétons recyclés BR développent des fissures superficielles différentes de celles du béton naturel BN, ceci peut être expliqué par le chemin que les fissures suivent, au niveau du béton naturel BN, les fissures passent généralement par les zones faibles qui sont l'interface entre granulat naturel-nouveau mortier, mais au niveau du béton recyclé les fissures peuvent se développer dans trois interfaces, granulat naturel-nouveau mortier, ancien mortier-nouveau mortier, granulat d'origine-ancien mortier.

## Module élastique

Le module de Young est l'une des propriétés mécaniques qui dépend des phases qui constituent le béton, d'après la figure 4.17, les modules de Young des bétons recyclés BR25 et BR50 et BR75, sont inférieurs à celui du béton naturel BN [4]. La diminution du module de Young est fonction du taux de remplacement, pour un taux de substitution de 25%, la diminution est de 9%, et pour un remplacement de 50% et 75%, la diminution est de 15% et 10%, respectivement [59]. Cette diminution est attribuée aux granulats recyclés qui présentent des faibles caractéristiques mécaniques par rapport à celle des GN, à savoir que la présence de la vieille pâte cimentaire dans le GR induit une diminution de la rigidité [3].

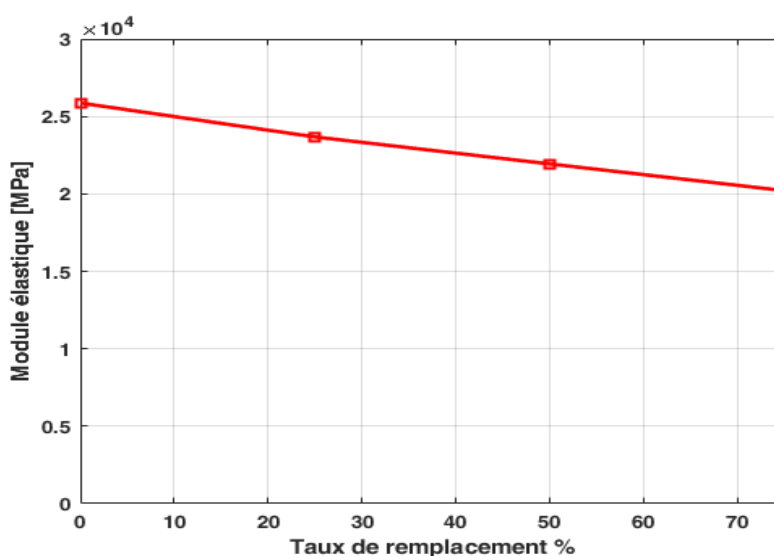


FIGURE 4.17 – Module de Young en fonction de taux de remplacement des GN par des GR.

## Vitesse ultrason

Le but de cet essai dans cette étude est d'évaluer l'effet des granulats recyclés GR sur la propagation des ondes ultrason à travers le béton, les résultats du béton naturel BN et des bétons recyclés (BR25, BR50, BR75) sont montrés dans la figure 4.18. Le béton naturel BN a montré des résultats de meilleure qualité, comme l'ont indiqué certains travaux de recherche [3], les valeurs de la vitesse ultrason diminuent avec l'augmentation du taux de remplacement des GN par des GR, la diminution observée au niveau du béton BR75 est de 4%, et pour un remplacement des GN par des GR qui ne dépasse pas les 50% la diminution de la vitesse ultrason est légère, à savoir qu'un remplacement de 25% et 50% induits une diminution de 1% et 3%.

Tous les échantillons présentent une vitesse ultrason qui dépasse les 4500 m/s, donc ces vitesses sont classées dans la plage des excellentes valeurs, l'augmentation du remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés engendre la diminution de la qualité du béton, cela peut entraîner une augmentation des pores et des vides dans le béton recyclé, à

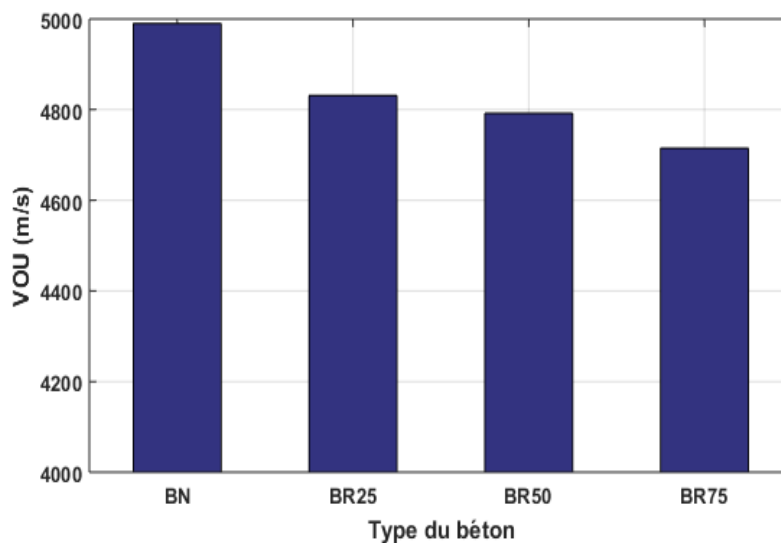


FIGURE 4.18 – Module de Young en fonction de taux de remplacement des GN par des GR.

savoir que les vides et les pores affectent la transmission des ondes ultrason dans le béton, ce qui provoque la diminution de la vitesse.

### Densité

La masse volumique des différents échantillons est montrée dans la figure 4.19, d'après les résultats, la masse volumique du béton recyclé BR est inférieure à celle du béton naturel BN, qui est due à l'utilisation des granulats recyclés GR qui ont une densité inférieure à celle des granulats naturels [34, 56], le remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés avec un taux de 25%, la diminution de la masse volumique est estimée à 0,02%, alors il n'est pas vraiment significatif, et pour un remplacement de 50% et 75%, la diminution est de 0,35% et 0,2%, successivement.

La densité du béton naturel BN et celle du béton recyclé (BR25, BR50, BR75) sont liées aux caractéristiques des granulats naturels GN et recyclés GR, les granulats recyclés présentent une densité inférieure à celle des granulats naturels et une absorption élevée, et cela influe sur la masse volumique du béton [54]. La pâte de ciment attachée au granulat d'origine est la cause de la diminution de la densité des granulats recyclés, cette pâte adhérente présente des pores et des vides, donc tout ça engendre une diminution de la masse volumique du béton recyclé [56].

### Comportement en flexion à quatre points

Les tests de flexion à quatre points sont réalisés sur deux séries de poutres, la première série est avec entaille, la deuxième série est sans entaille. Les valeurs de la résistance à la flexion à quatre points des poutres avec entaille sont montrées dans les figures 4.20 et 4.21. Les résultats montrent que les bétons recyclés possèdent une résistance à la flexion

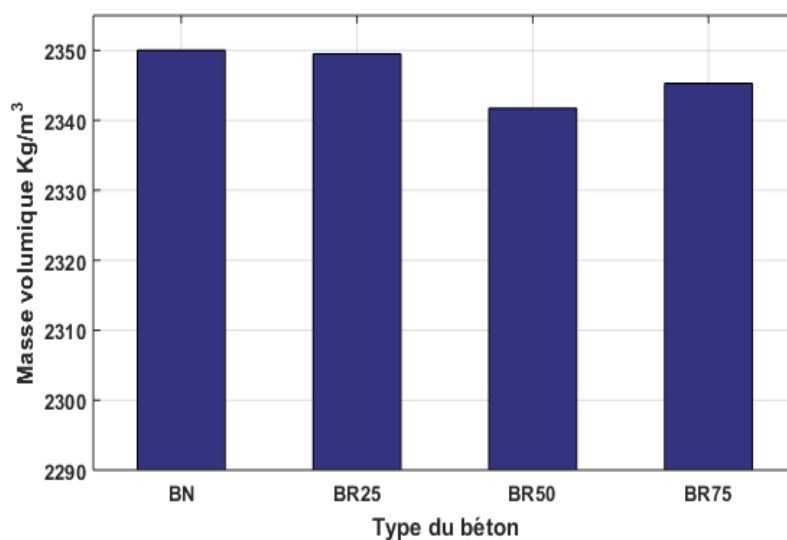


FIGURE 4.19 – Masse volumique des échantillons du béton (BN, BR25, BR50, BR75).

inférieure à celle du béton naturel. La résistance à la flexion du béton BR25 est de 3.22 KN, elle est inférieure de 5% par rapport à celle du béton naturel BN. La résistance des bétons BR50 et BR75 sont de 2.93 KN et 2.73 KN, d'où la diminution de la résistance par rapport à celle du BN est estimée à 13% pour le BR50 et 13% pour le BR75. La résistance à la flexion à quatre points des poutres sans entaille est largement supérieure à la résistance des poutres avec entaille, le béton naturel montre une résistance de 17.92 KN, la résistance du béton BR25 est presque proche de celle de BN, elle est de 17.05 KN, mais la diminution de la résistance des bétons recyclés BR50 et BR75 est significative, le BR50 a une résistance de 14.55 KN, donc une diminution de 18 %, et la résistance du BR75 est de 11.62 KN, la diminution est de 35%.

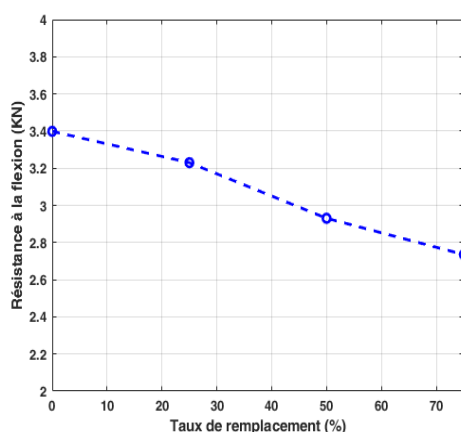


FIGURE 4.20 – Résistance à la flexion quatre points des poutres avec entaille

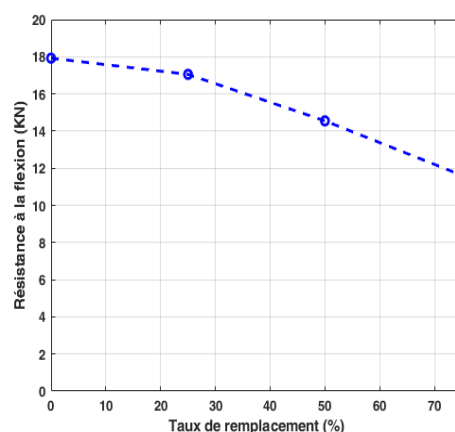


FIGURE 4.21 – Résistance à la flexion quatre points des poutres sans entaille.

Le comportement en flexion des poutres avec et sans entaille est montrées dans les

deux figures 4.22 et 4.23, dont les courbes tracées montrent la force appliquée et la flèche correspondante. On observe que le comportement de tous les échantillons (BN, BR25, BR50, BR75) est constitué de deux parties, la première est une ligne droite jusqu'au pic, dont la flèche augmente avec l'augmentation de l'effort appliqué, puis la phase poste pic, ou la phase descendante. D'après les résultats, les granulats recyclés ont une influence sur le comportement en flexion du béton.

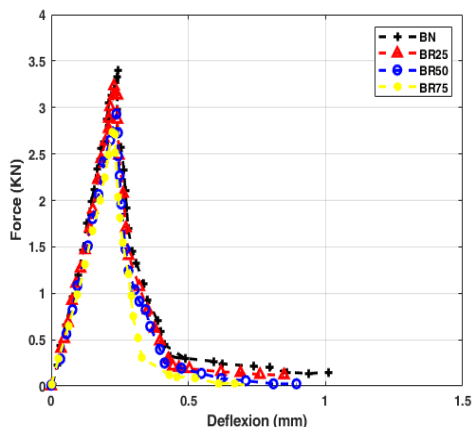


FIGURE 4.22 – Courbe force flèche des poutres avec entaille.

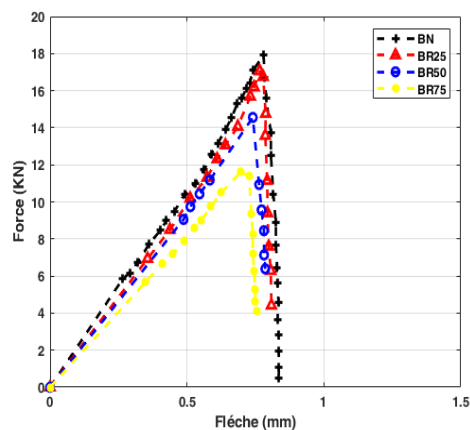


FIGURE 4.23 – Résistance à la flexion quatre points des poutres sans entaille.

D'après les résultats, les granulats recyclés GR ont une influence sur le comportement en flexion du béton. Les figures 4.22 et 4.23 montrent une diminution de la résistance lorsque les granulats naturels GN sont substitués par des granulats recyclés GR avec différents taux de remplacement. Pour les poutres avec entaille, la résistance à la flexion du béton naturel BN est de 3,39 KN, et celle du BR25 est 3,22 KN, donc la diminution de la résistance à la flexion est de 5%, et ceux du BR50 et de BR75 sont de 2,93KN et de 2,73 KN, respectivement. Pour la série des poutres sans entaille la résistance en flexion du béton naturel BN est de 17,92 KN, et ceux du béton recyclé BR25 et BR50 sont de 17,05 KN et 14,55 KN, la diminution de la résistance est de 4,9% et 13%, respectivement, la résistance à la flexion du béton BR75 est de 11,62 KN, la diminution est de 35%. L'ajout des granulats recyclé induit une diminution de la résistance à la flexion. La résistance à la flexion est influencée par les propriétés élastiques des granulats, sachant que le module élastique des granulats recyclés est inférieur à celui des granulats naturels, cela induit une diminution de la résistance.

## 4.7 Conclusion

Ce chapitre décrit les détails et les résultats de la campagne expérimentale. Les essais d'identification des propriétés physiques et mécaniques des granulats naturels et recyclés sont réalisés, à savoir l'analyse granulométrique, la résistance à l'usure, l'absorption, la masse volumique. Quatre échantillons de béton sont confectionnés, BN et BR25 et BR50 et BR75. Les propriétés du béton frais sont mesurées par l'affaissement du cône d'Abrams, la

consistance devient ferme avec l'augmentation de taux de remplacement. Les propriétés du béton à l'état durci sont déterminées par deux essais, la compression uni axiale et la flexion en quatre points. L'ajout des granulats recyclés influe sur le comportement en compression, la résistance au pic diminue, et la déformation maximale augmente. Aussi la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation du taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés.



## **Première partie**

### **Validation de modèle numérique**



## CHAPITRE05

---

5.1	Exemples de simulation numérique . . . . .	88
5.1.1	Hypothèse pour les granulats naturels et recyclés dans le béton . . . . .	88
5.1.2	Loi Mazars . . . . .	88
5.2	Simulation numérique du béton recyclé . . . . .	90
5.2.1	Propriétés linéaires du béton recyclé . . . . .	90
5.2.2	Simulation d'essais expérimentaux de compression . . . . .	91
5.2.3	Résultats de la simulation avec la littérature Xiao et al [75] . . . . .	94
5.3	Conclusion . . . . .	97

---

## 5.1 Exemples de simulation numérique

Dans cette partie d'étude, le modèle d'homogénéisation multi phase proposée dans la le chapitre 3 est conforté aux résultats qu'on a obtenus dans notre campagne expérimentale, dans laquelle, le comportement du béton recyclé en compression uniaxiale est modélisé numériquement. Ensuite on compare la simulation de ce modèle à d'autres résultats tiré de la littérature [75], afin d'évaluer et d'analyser la validation de l'approche proposée de cette étude.

### 5.1.1 Hypothèse pour les granulats naturels et recyclés dans le béton

Le véritable GR ou GN peut être supposé de forme sphéroïdale et réparti de manière aléatoire dans le nouveau mortier. Une mesure statistique de la largeur minimale et maximale des granulats naturels ou recyclés après analyse par tamisage montre que le rapport d'aspect est compris entre 0,5 et 2. Pour justifier le choix de la forme sphériques des granulats, nous comparons les propriétés effectives de deux bétons : le premier contient des granulats sphériques, et le second contient des agrégats sphéroïdaux. Les deux granulats sont répartis aléatoirement dans le nouveau mortier. La figure 5.1 présente le module de Young normalisé en ce qui concerne le rapport d'aspect, des formes d'inclusion aplaties à allongées pour les deux bétons. Nous observons que les valeurs du module de Young normalisé du béton avec des granulats sphéroïdaux orientés aléatoirement convergent vers celles avec des granulats sphériques. On peut noter que lorsque le rapport hauteur/largeur est compris entre [0,5 et 2], la différence n'est pas significative, comme le montre la figure 5.1. Dans la simulation, par souci de simplicité, la forme des agrégats est considérée comme sphérique.

### 5.1.2 Loi Mazars

À partir de l'essai expérimental sur l'éprouvette de béton, nous visons à identifier les paramètres nécessaires du modèle de Mazars appliqué au nouveau mortier. Dans notre analyse, nous supposons que tous les granulats introduits dans le mortier pour préparer l'ensemble du béton restent élastiques dans tous les chemins de chargement en compression. Comme détaillé dans la section précédente, les paramètres du modèle Mazars sont  $A_c^{NM}$ ,  $B_c^{NM}$ ,  $\varepsilon_D^{NM}$ . Comme le suggère cette loi, ces paramètres fluctuent par rapport aux valeurs raisonnables énoncées dans le modèle de Mazars [42] identifié dans notre algorithme.

$$R_{er} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\sigma^{exp}(\varepsilon(i)) - \Sigma_{11}^{hom}(\varepsilon(i), A_c^{NM}, B_c^{NM}, \varepsilon_D^{NM})]^2 \quad (5.1)$$

$R_{er}$  : Erreur totale.

$\sigma^{exp}$  : Contrainte expérimentale dans la direction du chargement.  $\Sigma_{11}^{hom}$  : Contrainte numérique estimée par le modèle d'homogénéisation dans la direction du chargement, en fonc-

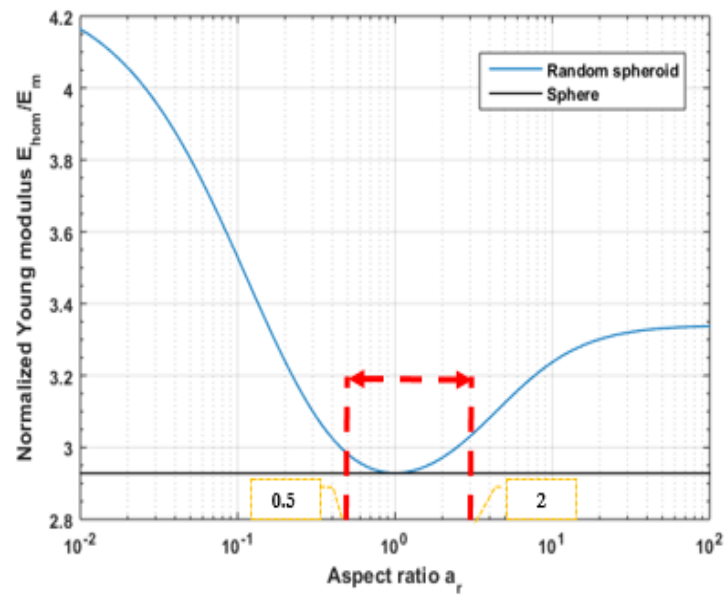


FIGURE 5.1 – Module de Young normalisé en fonction du rapport d’aspect.

tion du chargement de déformation imposé  $\epsilon(i)$  et des paramètres du modèle  $A_c^{NM}$ ,  $B_c^{NM}$ .  
 N : Nombre d’étape de chargement.

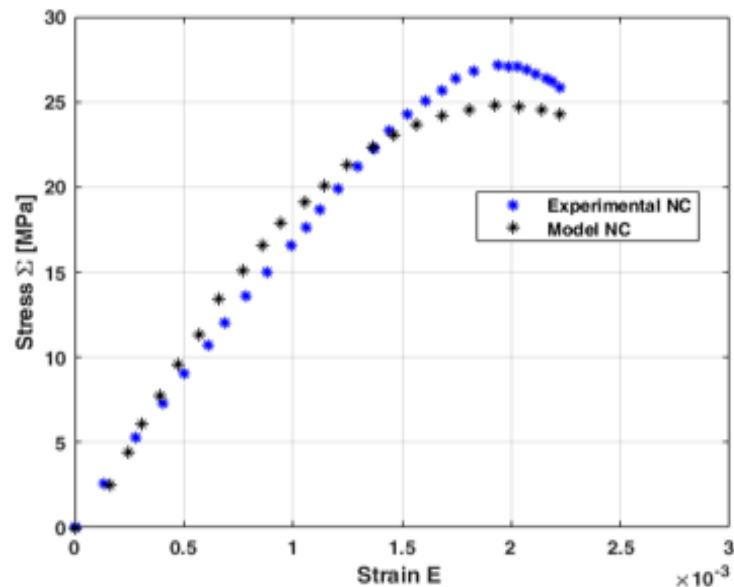


FIGURE 5.2 – Modélisation du comportement du béton naturel NC par rapport au comportement expérimental.

La figure 5.2, présente la superposition de la courbe contrainte déformation expérimentale du béton naturel BN et la courbe numérique obtenue par la méthode d’homogénéisation non linéaire, utilisant les paramètres de Mazars optimisés par rapport au nouveau mortier. Dans cette simulation numérique, nous supposons que le béton est composé d’un seul grain composé de nouveau mortier NM et de granulats naturels GN. Dans ce cas, les granulats

naturels restent élastiques, et leurs propriétés élastiques peuvent être tirées de la littérature [81]. Ensuite, les paramètres  $A_c^{NM}$ ,  $B_c^{NM}$ ,  $\epsilon_D^{NM}$  obtenus par la méthode d'identification utilisant la stratégie d'homogénéisation telle que décrite précédemment sont présentés dans le tableau 5.1

TABLE 5.1 – Propriétés mécaniques et paramètres de Mazars des différentes phases (NM, NA).

Phase	E(MPa)	$\nu$	$\epsilon_D^0$	$A_c$	$B_c$
Nouvea Mortier	18000	0.2	0.0001	1,5	400
Granulat naturel	60000	0.22	/	/	/

De même, nous appliquons la méthode d'identification à un autre essai de compression de béton recyclé issu des travaux de Xiao et al [75] en particulier, le résultat expérimental du béton naturel BN. Comme mentionné précédemment, le nouveau mortier NM obéi à la loi de Mazars, et le granulat naturel GN reste élastique. En utilisant les paramètres de NM de Mazars identifiés, répertoriés dans le tableau 5.2, la confrontation entre la simulation et les résultats expérimentaux est représentée sur la figure 5.3. Comme nous pouvons le constater, les paramètres de Mazars identifiés pour NM nous permettent de reproduire correctement les mesures expérimentales du BN.

TABLE 5.2 – Propriétés mécaniques et paramètres de Mazars des phases constitutives du béton recyclé

Phase	E(MPa)	$\nu$	$\epsilon_D^0$	$A_c$	$B_c$
Nouvea Mortier	19000	0.18	0.00012	1,1	350
Granulat naturel	60000	0.22	/	/	/

## 5.2 Simulation numérique du béton recyclé

Le modèle d'homogénéisation multiphasique proposé dans la section précédente est utilisé pour simuler les essais de compression de différents échantillons e BR et pour comparer les résultats numériques avec les données expérimentales. Tout d'abord, nous discutons des résultats numériques dans le cas de l'élasticité linéaire. Ensuite, nous les étendons à l'élasticité non linéaire. Enfin, nous confrontons le modèle proposé aux résultats expérimentaux rapportés dans les travaux de Xiao et al [75].

### 5.2.1 Propriétés linéaires du béton recyclé

Dans cette première application, toutes les phases sont considérées comme linéaires, élastiques, homogènes et isotropes. Les formes de GN et  $GR_{eq}$  sont supposées sphériques. Les propriétés mécaniques des phases sont résumées dans le tableau 5.3, et les propriétés

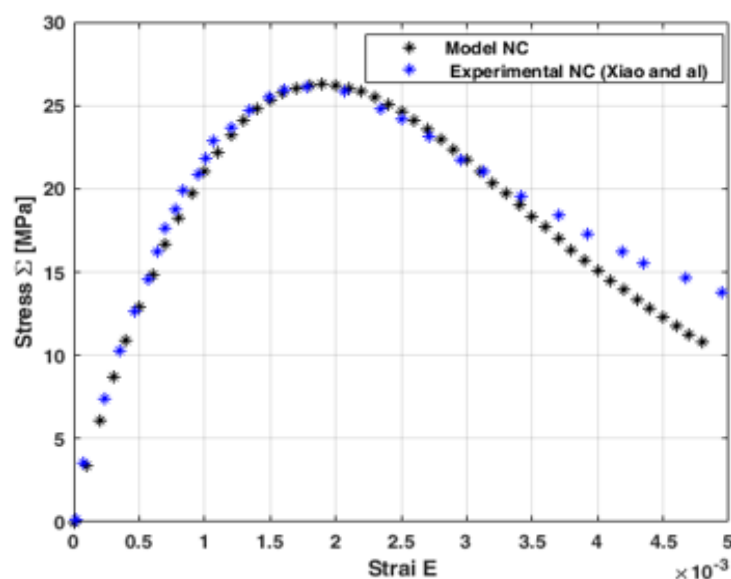


FIGURE 5.3 – Modélisation numérique et comportement expérimental [75].

élastiques du vieux mortier sont obtenues à partir de la littérature [81, 36]. Dans les simulations suivantes, la fraction volumique des GN est supposée être de 0,4. Nous commençons par le calcul du tenseur de rigidité effective du GR. Le tenseur de rigidité élastique effectif du BR est obtenu à partir de la loi de mélange des grains équivalents calculée à l'aide du modèle Mori-Tanaka.

TABLE 5.3 – Propriétés mécaniques des constituants du BR.

Phase	E(MPa)	$\nu$
Nouvea Mortier	18000	0.2
Granulat naturel	60000	0.12
Vieux mortier	14000	0.23

La figure 5.4 présente le module de Young effectif du béton recyclé par rapport aux taux de de granulats recyclés. Les données expérimentales sont également tracées à des fins de comparaison. On peut observer que l'écart maximum entre les résultats numériques et les valeurs expérimentales est inférieur à 5 %. Par conséquent, le modèle d'homogénéisation proposé est très précis pour prédire le comportement élastique linéaire du BR. De plus, la stratégie d'homogénéisation élastique développée dans cette étude est facile à mettre en œuvre.

## 5.2.2 Simulation d'essais expérimentaux de compression

Dans cette deuxième application, plusieurs simulations sont réalisées pour prédire le comportement en compression du béton recyclé pour des proportions variées des GR. En utilisant les paramètres identifiés présentés dans le tableau 5.1, nous simulons le compor-

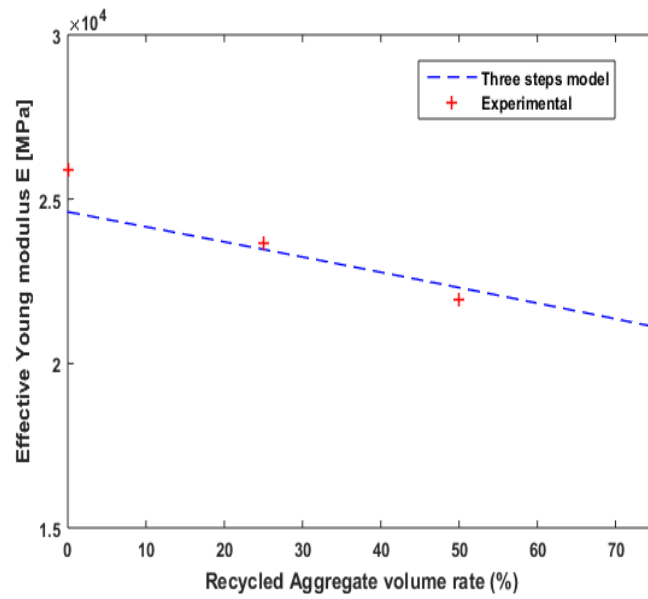


FIGURE 5.4 – Module de Young effectif du béton recyclé .

tement en compression des bétons recyclés BR25, BR50 et BR75 considérés ici comme des composites triphasés (NM, GN et GReq). La stratégie d'homogénéisation non linéaire décrite dans la section précédente est utilisée. Nous supposons que la nouvelle matrice du mortier obéit à la loi de Mazars [42] et que les granulats restent élastiques.

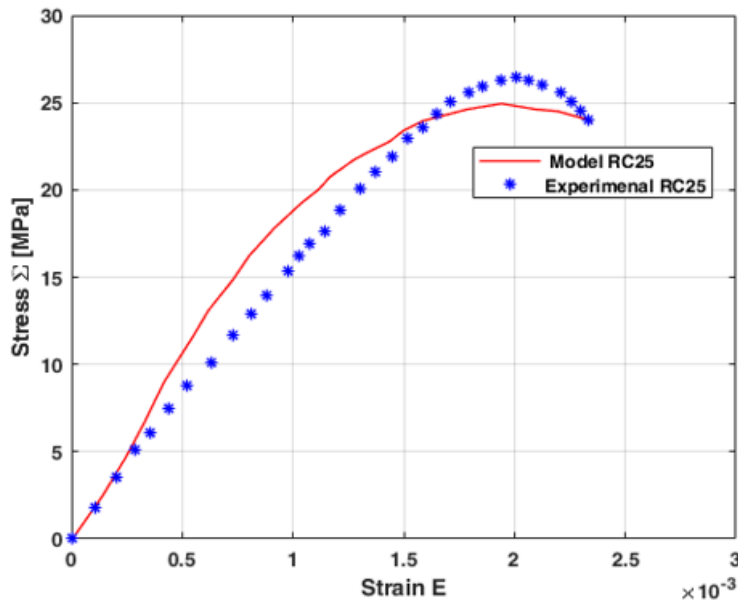


FIGURE 5.5 – Modélisation du comportement du béton recyclé BR25 par rapport aux résultats expérimentaux.

Les figures 5.5, 5.6 et 5.7 montrent les résultats de simulation numérique comparés aux résultats expérimentaux. Un bon accord a été obtenu. Le tableau 5.4 montre la contrainte maximale expérimentale et numérique et sa déformation correspondante pour les diffé-

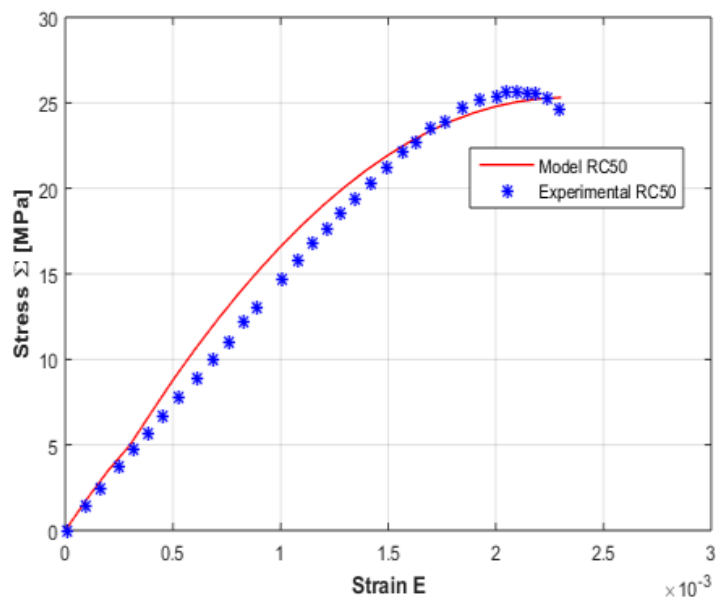


FIGURE 5.6 – Modélisation du comportement du béton recyclé BR50 par rapport aux résultats expérimentaux.

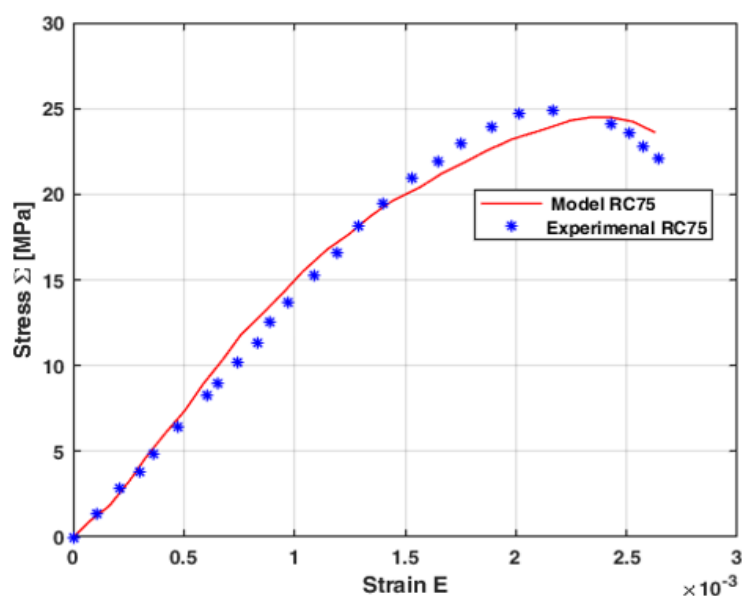


FIGURE 5.7 – Modélisation du comportement du béton recyclé BR75 par rapport aux résultats expérimentaux.

rents bétons recyclés étudiés. On peut remarquer que le modèle sous-estime légèrement la contrainte maximale autour de 6% d'erreur pour BR25. Pour BR50 et BR75, la différence entre la contrainte expérimentale et numérique est de l'ordre de 1%. Cependant, la différence entre la déformation au pic estimée par le modèle et celle expérimentale est généralement comprise entre 1% et 9%.

D'après les résultats présentés dans les figures précédentes et dans le Tableau 5.4, on

TABLE 5.4 – Contraintes et déformations numériques et expérimentales

Type du béton	NC	BR25	BR50	BR75
Pic de contrainte expérimentale	27.13	26,43	25,65	24.84
Pic de contrainte numérique	24,75	24,95	25,31	24,48
Pic de déformation expérimentale	0,0019	0,002	0,0021	0,0022
Pic de déformation numérique	0,001922	0,0019	0,0023	00,0023

constate que le modèle numérique décrit bien le comportement du béton. La pente de la courbe contrainte-déformation numérique est proche de celle de la courbe expérimentale, le modèle numérique estime correctement la contrainte maximale. Cependant, la déformation numérique au pic est légèrement surestimée par rapport aux résultats expérimentaux.

### 5.2.3 Résultats de la simulation avec la littérature Xiao et al [75]

Dans cette dernière application, nous appliquons l'homogénéisation non linéaire pour simuler le comportement en compression des bétons recyclés étudiés expérimentalement dans [75]. Dans ce travail, 5 types de béton sont formulés à base de ciment Portland ordinaire ayant une résistance à la compression de 32,5 MPa. La formulation et les propriétés physiques des granulats naturels et des granulats recyclés sont reportées dans [75]. Les GR utilisés proviennent des déchets de béton provenant de la piste d'atterrissage d'un aéroport de Shanghai, en République populaire de Chine.

Le tableau 5.5 présente le pic de contrainte et de déformation expérimental et numérique, à partir des résultats, la contrainte et la déformation expérimentales de BN sont respectivement de 26,07 MPa et 0,0018, cependant les valeurs indiquées par le modèle sont de 26,25 MPa et 0,0019, et le modèle a surestimé la contrainte au pic et la déformation de 0,7% et 5%. Pour BR100, le pic de contrainte et de la déformation expérimentale sont respectivement de 23,56 MPa et 0,0023, alors que le modèle numérique estime une contrainte et une déformation au pic de 24,49 MPa et 0,0021, respectivement, alors la contrainte au pic est sous-estimée de 3 % et la déformation au pic est surestimée de 8%. La contrainte maximale estimée au pic est bien prédite, ainsi que la déformation ultime, dans la phase post-pic, même si la contrainte diminue, la déformation augmente, et donc le modèle prédit un comportement presque parfait.

TABLE 5.5 – Contraintes et déformations numériques et expérimentales.

Type du béton	BN	BR30	BR50	BR70	BR100
Pic de contrainte expérimentale	26.07	25.67	24.045	23,49	23.56
Pic de contrainte numérique	26,25	25,32	24,74	24,19	24,49
Pic de déformation expérimentale	0,0018	0,0016	0,0019	0,002	0,0023
Pic de déformation numérique	0,0019	0,002	0,002	0,0023	0,0021

Les figures 5.8, 5.9, 5.10 et 5.11 montrent les simulations numériques du comportement en compression de différents BR (BR30, BR50, BR70 et BR100) obtenues par le modèle d'ho-

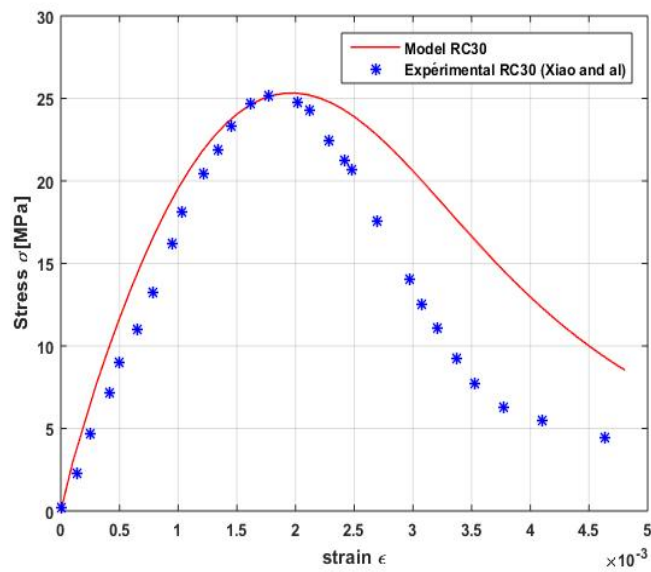


FIGURE 5.8 – Modélisation du comportement du béton recyclé BR30, comparaison avec l'expérimental [75].

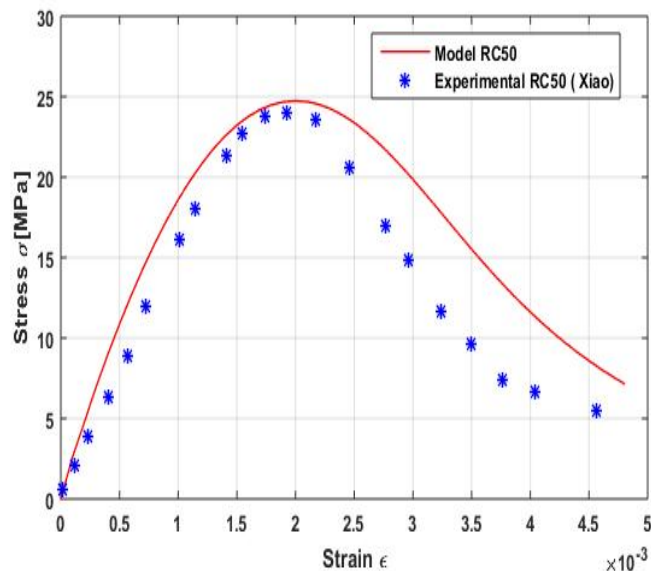


FIGURE 5.9 – Modélisation du comportement du béton recyclé BR50, comparaison avec l'expérimental [75].

mogénéisation sécante non linéaire, par rapport aux données expérimentales [75]. En phase linéaire, la pente numérique est quasiment identique à celle obtenue expérimentalement. Le modèle d'homogénéisation non linéaire proposé permet d'estimer correctement le comportement en compression notamment avant le pic quelle que soit la fraction des granulats recyclés dans le béton. De plus, les contraintes maximales des différents bétons sont correctement prédites. On constate que même si le modèle d'homogénéisation non linéaire reproduit un comportement d'adoucissement globalement correct après le pic, une sures-

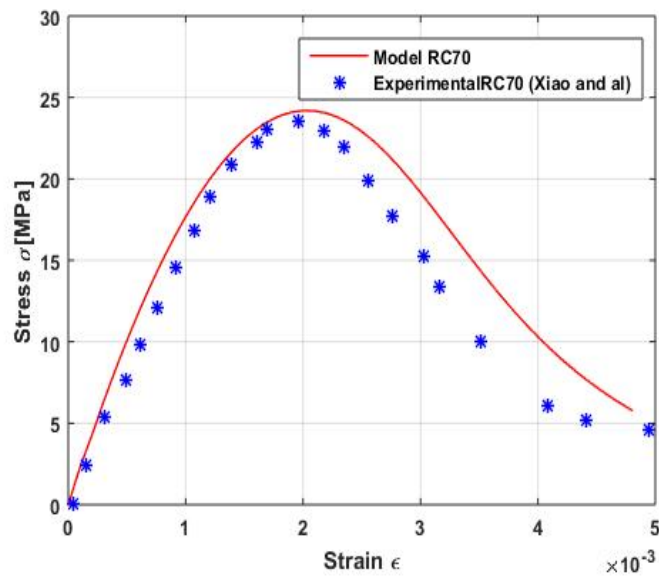


FIGURE 5.10 – Modélisation du comportement du béton recyclé BR70, comparaison avec l'expérimental [75].

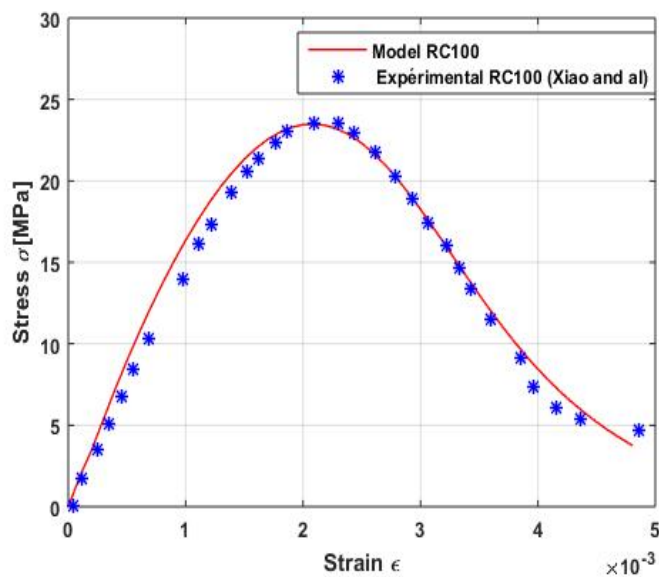


FIGURE 5.11 – Modélisation du comportement du béton recyclé BR100, comparaison avec l'expérimental [75].

timisation non négligeable peut être observée. Cette surestimation diminue lorsque la fraction de granulats recyclés augmente. Ces résultats encourageants concernent les résultats obtenus par une approximation des champs locaux par leur moyenne qui considère une linéarisation sécante classique qui tend à surestimer le comportement non linéaire par rapport à une linéarisation sécante modifiée [65, 57]. Comme déjà présenté précédemment, cette approximation relie le champ de contraintes linéarisé par la moyenne quadratique au champ de déformation local, pour la construction du modèle d'homogénéisation sécante

non linéaire. D'autres pistes d'amélioration peuvent également être envisagées, à savoir la prise en compte d'une loi de dommages avec la prise en compte des dommages latéraux concrets. La difficulté réside notamment dans l'étape d'identification des paramètres du modèle, étape essentielle pour son efficacité de prédiction.

### 5.3 Conclusion

Le modèle d'homogénéisation non linéaire développé en chapitre 3 est utilisé pour décrire le comportement du béton recyclé obtenue via des tests expérimentales, de plus d'autres résultats expérimentales issus de la littérature sont modélisés [75]. Le modèle de Mazars [42] est utilisé pour décrire le comportement de la phase mortier, et les granulats restent linéaire élastique. Les paramètres du modèle du Mazars sont identifiés en utilisant la méthode simplexe. Les simulations numériques encourageantes obtenues par le modèle d'homogénéisation non linéaire en adoptant une démarche sécante classique permettent de prédire le comportement adoucissant des réponses effectives du béton recyclé avant le pic de la contrainte maximale mais ne permettent pas de prédire correctement le comportement après le pic. On envisage dans un futur travail d'améliorer le modèle en utilisant la démarche sécante modifiée décrite dans ce travail ainsi que la démarche d'identification inverse des paramètres du modèle d'homogénéisation non linéaire.



# BIBLIOGRAPHIE

- [1] Hordijk D A. “Local approach to fatigue of concrete”. thèse de doctorat. 1991.
- [2] Ayodele ADESSINA et al. “Experimental and micromechanical investigation on the mechanical and durability properties of recycled aggregates concrete”. In : *Cement and Concrete Research* 126 (2019), p. 105900.
- [3] Gonzalez ANDREU et Etxeberria MIREN. “Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete”. In : *Construction and Building Materials* 52 (2014), p. 227-235.
- [4] Mahdi AREZOUMANDI et al. “Effect of recycled concrete aggregate replacement level on shear strength of reinforced concrete beams”. In : *ACI Materials Journal* 112.4 (2015), p. 559.
- [5] P BELIN et al. “Cement paste content and water absorption of recycled concrete coarse aggregates”. In : *Materials and Structures* 47 (2014), p. 1451-1465.
- [6] Yakov BENVENISTE. “A new approach to the application of Mori-Tanaka’s theory in composite materials”. In : *Mechanics of materials* 6.2 (1987), p. 147-157.
- [7] V BHIKSHMA et R KISHORE. “Development Of Stress- Strain Curves for Recycled Aggregate Concrete”. In : *ASIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (BUILDING AND HOUSING)* 11.2 (2010), p. 253-261.
- [8] Carolyn W CAMACHO et al. “Stiffness and thermal expansion predictions for hybrid short fiber composites”. In : *Polymer Composites* 11.4 (1990), p. 229-239.
- [9] P.Ponte CASTAÑEDA et J.R. WILLIS. “The effect of spatial distribution on the effective behavior of composite materials and cracked media”. In : *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 43.12 (1995), p. 1919-1951.
- [10] M. CASUCCIO et al. “Failure mechanism of recycled aggregate concrete”. In : *Construction and Building Materials* 22.7 (2008), p. 1500-1506. ISSN : 0950-0618. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.032>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061807000980>.
- [11] J. L. CHABOCHE. “Le Concept de Contrainte Effective Applique a l’Elasticite et a la Viscoplasticite en Presence d’un Endommagement Anisotrope”. In : *Colloques internationaux du CNRS* (1979), p. 737-760.
- [12] Farid DEBIEB et al. “Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates”. In : *Cement and Concrete Composites* 32.6 (2010), p. 421-426.
- [13] Hasan DILBAS, Mesut ŞİMŞEK et Özgür ÇAKIR. “An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume”. In : *Construction and Building materials* 61 (2014), p. 50-59.

- [14] Issam DOGHRI et Amine OUAAR. "Homogenization of two-phase elasto-plastic composite materials and structures: Study of tangent operators, cyclic plasticity and numerical algorithms". In : *International Journal of Solids and structures* 40.7 (2003), p. 1681-1712.
- [15] Issam DOGHRI et Laurent TINEL. "Micromechanics of inelastic composites with misaligned inclusions: numerical treatment of orientation". In : *Computer methods in applied mechanics and engineering* 195.13-16 (2006), p. 1387-1406.
- [16] JF DONG, QY WANG et ZW GUAN. "Material properties of basalt fibre reinforced concrete made with recycled earthquake waste". In : *Construction and Building Materials* 130 (2017), p. 241-251.
- [17] Zhen Hua DUAN et Chi Sun POON. "Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars". In : *Materials & Design* 58 (2014), p. 19-29.
- [18] ML DUNN et H LEDBETTER. "Elastic-plastic behavior of textured short-fiber composites". In : *Acta materialia* 45.8 (1997), p. 3327-3340.
- [19] F. FIOL et al. "The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical properties of structural self-compacting concrete". In : *Construction and Building Materials* 182 (2018), p. 309-323. ISSN : 0950-0618.
- [20] Lorena FRANCESCONI, Luisa PANI et Flavio STOCHINO. "Punching shear strength of reinforced recycled concrete slabs". In : *Construction and Building Materials* 127 (2016), p. 248-263.
- [21] Patrick FRANCIOSI et Gérard LORMAND. "Using the radon transform to solve inclusion problems in elasticity". In : *International Journal of Solids and Structures* 41.3-4 (2004), p. 585-606.
- [22] A. GHAZAVIZADEH et al. "A general and explicit Eshelby-type estimator for evaluating the equivalent stiffness of multiply coated ellipsoidal heterogeneities". In : *International Journal of Solids and Structures* 171 ((2019)), p. 103-116.
- [23] A. GRELAT. "Analyse non linéaire des ossatures hyperstatique en béton armé". In : *Université Paris VI* ().
- [24] Mayank GUPTA, Meenakshi SHARMA et Shashank BISHNOI. "Multiscale modelling of uniaxial compressive stress-strain behaviour of concrete using analytical homogenisation and damage mechanics". In : *Mechanics of Materials* 173 (2022), p. 104430.
- [25] Cordes H. "À propos de la courbe contrainte-déformation du béton impact de charge à court terme". thèse de doctorat. 1986.
- [26] Rodney HILL. "The essential structure of constitutive laws for metal composites and polycrystals". In : *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 15.2 (1967), p. 79-95.
- [27] Ivan S IGNJATOVIĆ, Snežana B MARINKOVIĆ et Nikola TOŠIĆ. "Shear behaviour of recycled aggregate concrete beams with and without shear reinforcement". In : *Engineering Structures* 141 (2017), p. 386-401.

- [28] J. W. JU. "On energy-based coupled elastoplastic damage theories: Constitutive modeling and computational aspects". In : *International Journal of Solids and Structures* 25.7 (1989), p. 803-833. ISSN : 0020-7683.
- [29] Andrés JUAN-VALDÉS et al. "Mechanical and microstructural characterization of non-structural precast concrete made with recycled mixed ceramic aggregates from construction and demolition wastes". In : *Journal of Cleaner Production* 180 (2018), p. 482-493. ISSN : 0959-6526.
- [30] Benyahi K. "Homogénéisation périodique et fiabilité des éléments de structures ( application aux matériaux composites)". thèse de doctorat. 2019.
- [31] L.M. KACHANOV. "Rupture time under creep conditions". In : *International journal of fracture* 97.1 (1999), p. 11-18.
- [32] Guo-Zheng KANG et Qing GAO. "Tensile properties of randomly oriented short - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fiber reinforced aluminum alloy composites: II. Finite element analysis for stress transfer, elastic modulus and stress-strain curve". In : *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 33.5 (2002), p. 657-667.
- [33] Kanish KAPOOR et al. "Effect of recycled aggregates on fresh and hardened properties of self compacting concrete". In : *Materials Today: Proceedings* 32 (2020), p. 600-607.
- [34] Hasan KATKHUDA et Nasim SHATARAT. "Shear behavior of reinforced concrete beams using treated recycled concrete aggregate". In : *Construction and Building Materials* 125 (2016), p. 63-71.
- [35] F KAZEMIAN, H ROOHOLAMINI et A HASSANI. "Mechanical and fracture properties of concrete containing treated and untreated recycled concrete aggregates". In : *Construction and Building Materials* 209 (2019), p. 690-700.
- [36] Markus KÖNIGSBERGER et Stéphanie STAQUET. "Micromechanical multiscale modeling of ITZ-driven failure of recycled concrete: effects of composition and maturity on the material strength". In : *Applied Sciences* 8.6 (2018), p. 976.
- [37] Shi-Cong KOU, Chi-Sun POON et Hui-Wen WAN. "Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates". In : *Construction and Building Materials* 36 (2012), p. 881-889.
- [38] Wai Hoe KWAN et al. "Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties". In : *Construction and Building Materials* 26.1 (2012), p. 565-573.
- [39] EF LEDESMA et al. "Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates". In : *Construction and building materials* 71 (2014), p. 289-298.
- [40] J. LEMAITRE. "Coupled elasto-plasticity and damage constitutive equations". In : *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 51.1 (1985), p. 31-49.
- [41] Stefania MANZI, Claudio MAZZOTTI et Maria Chiara BIGNOZZI. "Self-compacting concrete with recycled concrete aggregate: Study of the long-term properties". In : *Construction and Building Materials* 157 (2017), p. 582-590.

- [42] Jacky MAZARS et Gilles PIJAUDIER-CABOT. "CONTINUUM DAMAGE THEORY - APPLICATION TO CONCRETE". In : *Journal of Engineering Mechanics-asce* 115 (1989), p. 345-365. URL : <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:119906581>.
- [43] G MAZZUCCO et al. "Elastoplastic-damaged meso-scale modelling of concrete with recycled aggregates". In : *Composites Part B: Engineering* 140 (2018), p. 145-156.
- [44] Michael J MCGINNIS et al. "Strength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates". In : *Construction and Building Materials* 154 (2017), p. 258-269.
- [45] M.SARGIN. "Stress-strain relationship for concrete and the analysis of structural concrete sections". In : *University of Waterloo* ().
- [46] Muhammad J MUNIR et al. "Influence of concrete strength on the stress-strain behavior of spirally confined recycled aggregate concrete". In : *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. T. 829. 1. IOP Publishing. 2020, p. 012004.
- [47] Tien-Tung NGO et al. "Effect of cement and admixture on the utilization of recycled aggregates in concrete". In : *Construction and Building Materials* 149 (2017), p. 91-102.
- [48] GM ODEGARD et al. "Constitutive modeling of nanotube-reinforced polymer composites". In : *Composites science and technology* 63.11 (2003), p. 1671-1687.
- [49] Safiullah OMARY, Elhem GHORBEL et George WARDEH. "Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties". In : *Construction and Building Materials* 108 (2016), p. 163-174.
- [50] A. OUAAR et al. "Micromechanics of the deformation and damage of steel fiber-reinforced concrete". In : *International Journal of Damage Mechanics* 16.2 (2007), p. 227-260.
- [51] D PEDRO, J DE BRITO et L EVANGELISTA. "Mechanical characterization of high performance concrete prepared with recycled aggregates and silica fume from precast industry". In : *Journal of Cleaner Production* 164 (2017), p. 939-949.
- [52] Yijiang PENG et al. "Analysis of Tensile Strength and Failure Mechanism Based on Parallel Homogenization Model for Recycled Concrete". In : *Materials* 15.1 (2021), p. 145.
- [53] O PIERARD, C FRIEBEL et Issam DOGHRI. "Mean-field homogenization of multi-phase thermo-elastic composites: a general framework and its validation". In : *Composites Science and Technology* 64.10-11 (2004), p. 1587-1603.
- [54] J.V. PUTHUSSERY, R. KUMAR et A. GARG. "Evaluation of recycled concrete aggregates for their suitability in construction activities: An experimental study". In : *Waste management* 60 (2017), p. 270-276.
- [55] KN RAHAL et YT ALREFAEI. "Shear strength of longitudinally reinforced recycled aggregate concrete beams". In : *Engineering Structures* 145 (2017), p. 273-282.

- [56] Caroline Santana RANGEL et al. "Tension stiffening approach for interface characterization in recycled aggregate concrete". In : *Cement and Concrete Composites* 82 (2017), p. 176-189.
- [57] Eduardo A RODRIGUES et al. "A concurrent multiscale approach for modeling recycled aggregate concrete". In : *Construction and Building Materials* 267 (2021), p. 121040.
- [58] LP SAENZ, P DESAI et Krishnan S. "Équation pour la courbe contrainte-déformation de béton". In : *Journal of ACI* 9.64 (1964), p. 1369-35.
- [59] Sindy SEARA-PAZ et al. "Flexural performance of reinforced concrete beams made with recycled concrete coarse aggregate". In : *Engineering Structures* 156 (2018), p. 32-45.
- [60] Javier SEGURADO, Javier LLORCA et Caroline GONZÁLEZ. "On the accuracy of mean-field approaches to simulate the plastic deformation of composites". In : *Scripta Materialia* 46.7 (2002), p. 525-529.
- [61] Shahiron SHAHIDAN et al. "Utilizing construction and demolition (C&D) waste as recycled aggregates (RA) in concrete". In : *Procedia engineering* 174 (2017), p. 1028-1035.
- [62] Meenakshi SHARMA et Shashank BISHNOI. "Influence of properties of interfacial transition zone on elastic modulus of concrete: Evidence from micromechanical modeling". In : *Construction and Building Materials* 246 (2020), p. 118381.
- [63] Der-Hsien SHEN et Jia-chong DU. "Evaluation of building materials recycling on HMA permanent deformation". In : *Construction and building materials* 18.6 (2004), p. 391-397.
- [64] Marcelo Pedreira da SILVA et al. "The Behavior of Recycled Concrete through the Application of an Isotropic Damage Model". In : *Open Journal of Civil Engineering* 5.03 (2015), p. 339.
- [65] P. SUQUET. "Effective properties of nonlinear composites". In : *Continuum micromechanics* ((1997)), p. 197-264.
- [66] P. SUQUET. "Overall properties of nonlinear composites: a modified secant moduli theory and its link with Ponte Castañeda's nonlinear variational procedure". In : *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série II, Mécanique, physique, chimie, astronomie* 320.4 (1995), p. 563-571.
- [67] Sami W TABSH et Akmal S ABDELFAHAH. "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete". In : *Construction and building materials* 23.2 (2009), p. 1163-1167.
- [68] Zine el-abidine TAHAR et al. "Effect of cement and admixture on the utilization of recycled aggregates in concrete". In : *Construction and Building Materials* 149 (2017), p. 91-102. ISSN : 0950-0618.

- [69] Vivian WY TAM, Mahfooz SOOMRO et Ana Catarina Jorge EVANGELISTA. “A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017)”. In : *Construction and Building materials* 172 (2018), p. 272-292.
- [70] “The Cement Sustainability Initiative”. In : (2009). URL : <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:119906581>.
- [71] Job THOMAS, Nassif Nazeer THAICKAVIL et P.M. WILSON. “Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates”. In : *Journal of Building Engineering* 19 (2018), p. 349-365. ISSN : 2352-7102.
- [72] Luiz H Maccarini VEFAGO et Jaume AVELLANEDA. “Recycling concepts and the index of recyclability for building materials”. In : *Resources, conservation and recycling* 72 (2013), p. 127-135.
- [73] P. J. WITHERS. “The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion in a transversely isotropic medium, and its relevance to composite materials”. In : *Philosophical Magazine* 59.4 (2007), p. , 759-781.
- [74] P. WRIGGERS et S.O. MOFTAH. “Mesoscale models for concrete: Homogenisation and damage behaviour”. In : *Finite Elements in Analysis and Design* 42.7 (2006), p. 623-636.
- [75] Jianzhuang XIAO, Jiabin LI et Ch ZHANG. “Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading”. In : *Cement and Concrete Research* 35.6 (2005), p. 1187-1194. ISSN : 0008-8846.
- [76] Haifeng YANG et al. “Compressive stress–strain curve of recycled concrete under repeated loading”. In : *Construction and Building Materials* 387 (2023), p. 131598.
- [77] Yanya YAO. “Blending ratio of recycled aggregate on the performance of pervious concrete”. In : *Frattura ed Integrita Strutturale* 12.46 (2018).
- [78] Adel YOUNIS et Usama EBEAD. “Effects of Using Seawater and Recycled Coarse Aggregates on Plain Concrete Characteristics”. In : (2020).
- [79] Adel YOUNIS, Usama EBEAD et Simon JUDD. “Life cycle cost analysis of structural concrete using seawater, recycled concrete aggregate, and GFRP reinforcement”. In : *Construction and Building Materials* 175 (2018), p. 152-160.
- [80] Yong YU, Yu ZHENG et Xin-Yu ZHAO. “Mesoscale modeling of recycled aggregate concrete under uniaxial compression and tension using discrete element method”. In : *Construction and Building Materials* 268 (2021), p. 121116.
- [81] Hongru ZHANG et Yuxi ZHAO. “Integrated interface parameters of recycled aggregate concrete”. In : *Construction and Building Materials* 101 (2015), p. 861-877.
- [82] Chunheng ZHOU et Zongping CHEN. “Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate”. In : *Construction and Building Materials* 134 (2017), p. 497-506.