

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
Université Djillali Liabès
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil & Travaux Publics



Thèse

Optimisation des bétons légers incorporant des granulats issus du broyage des pneus usés

Présentée au
Département de Génie Civil & Travaux Publics, UDL, Sidi Bel
Abbès

Pour obtenir
Le diplôme de **doctorat en sciences**

Spécialité : **Génie civil**
Option : **Géotechnique et matériaux**

Par
Mr. RAHALI Bachir

Soutenue le **15 NOVEMBRE 2018** devant la Commission d'examen

Jury MM.

Aissa ASROUN	UDL Sidi Bel Abbés	Professeur	Président
Yassine SENHADJI	Université Mascara	Maitre de conférence Rang A	Examineur
Youcef HOUMADI	C.U.A.T Ain Temouchent	Maitre de conférence Rang A	Examineur
Habib TROUZINE	U.D.L Sidi Bel abbes	Professeur	Encadreur
Sidi Med AISSA MAMOUNE	C.U.A.T Ain Temouchent	Professeur	Invité

DEDICACES

Je dédie cette thèse

A la mémoire de mon défunt père, ma mère,

A ma femme, et notre fils Abderrahmane Ahmed Moncef,

Enfin, à ma tendre famille, mes neveux et nièces,

REMERCIEMENTS

Le présent travail a été réalisé au laboratoire de Génie civil et environnement du département de génie civil, faculté de Technologie de l'université de Sidi Bel Abbés.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Mr TROUZINE Habib, Professeur au département de génie civil de l'université de Sidi Bel Abbés qui, en tant qu'encadreur, a permis l'aboutissement de ce travail. Je le remercie pour son aide scientifique et qui par son expérience et sa compétence m'a transmis sa passion pour ce sujet.

A ces remerciements, je souhaite associer Mr AISSA MAMOUNE Sidi Mohammed, Professeur au centre universitaire d'Ain Temouchent, pour sa direction scientifique, ses conseils, sa confiance et son encouragement pour ce travail.

Je suis gré à Mr ASROUN Aissa, Professeur de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Je tiens à adresser toute ma gratitude à Mr HOUMADI Youcef d'avoir accepté d'examiner ma thèse.

Je tiens également à remercier Mr SENHADJI Yassine d'avoir accepté d'examiner ma thèse.

Enfin, une grande pensée pour féliciter et remercier du fond du cœur ma famille et pour le soutien et les encouragements sans faille tout au long de cette thèse, qu'ils trouvent ici l'expression de mon respect et de ma gratitude.

RESUME

L'emploi des granulats de caoutchouc (G.C) comme inclusion dans une matrice cimentaire confère au composite certains avantages. Alors que les études expérimentales peuvent être longues, délicates et coûteuses, l'outil de prédiction permet d'analyser aisément leur influence et apparaît ainsi comme un outil complémentaire précieux et moins onéreux. Ce travail propose une double approche en termes de prédictions pour la caractérisation du comportement élastique des bétons incorporant des granulats de caoutchouc issus du broyage des pneus usés (B.I.G.C). Partant de certains critères, la prédiction des propriétés mécaniques telles que la résistance en compression et le module d'élasticité a été abordée par une étude statistique au préalable qui s'est avérée insuffisante. Pour pallier à cette difficulté, la méthode des réseaux de neurones artificiels (R.N.A) est utilisée. Une confrontation aux données expérimentales issues de la littérature fait ressortir de bons résultats en termes de critères de performance. Dans la seconde phase de notre contribution, un nouveau modèle de prédiction a été élaboré en se basant sur la solution exacte dédiée aux milieux dilués infinis. Le composite B.I.G.C est traité en tant que système concentré dont on ne peut trouver la solution exacte. De nouvelles équations du module d'élasticité ont été dérivées en utilisant le schéma différentiel réservé aux systèmes dilués infinis. Les résultats obtenus confrontés aux travaux expérimentaux issus de la littérature et aux prédictions obtenues par la méthode des réseaux de neurones montrent que celles-ci sont bien encadrées par les limites obtenues par le modèle.

Mots Clés : Granulats de caoutchouc, prédiction, réseaux de neurones artificiels, résistance en compression, module d'élasticité, composite particulier

ملخص

ان استخدام حبيبات المطاط (G.C) كتعزيز في مصفوفة الاسمنتية يعطي للمركب مزايا معينة. الا ان الدراسات التجريبية يمكن أن تكون طويلة وحساسة ومكلفة، فإن أداة التنبؤ تجعل من السهل تحليل تأثيرها، وبالتالي تظهر كأداة مكملة وأقل تكلفة. نقترح هذه الأطروحة منهجاً ثنائياً من حيث التنبؤات الخاصة بتوصيف السلوك المرن للخرسانة المتضمنة حبيبات المطاط من طحن الإطارات المستعملة (B.I.G.C). على أساس معايير معينة، تم تناول التنبؤ بالخواص الميكانيكية مثل قوة الضغط ومعامل المرونة بواسطة دراسة إحصائية أولية أثبتت أنها غير كافية. للتغلب على هذه الصعوبات، يتم استخدام طريقة الشبكات العصبية الاصطناعية (R.N.A). وتظهر المواجهة مع البيانات التجريبية من المؤلفات نتائج جيدة من حيث معايير الأداء في المرحلة الثانية من مساهمتنا، تم تطوير نموذج جديد للتنبؤ بناء على الحل الدقيق المخصص لبيئات نهائية. يتم التعامل مع المركب B.I.G.C كنظام مركز لا يمكن العثور على حل دقيق له. تم اشتقاق معادلات معامل مرونة جديدة باستخدام المخطط التفاضلي لأنظمة مخففة لانهاية. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها من العمل التجريبي من الأدبيات والتنبؤات التي تم الحصول عليها من خلال طريقة الشبكات العصبية أنها مؤطرة بشكل جيد بالحدود التي تم الحصول عليها بواسطة النموذج.

الكلمات الرئيسية: ركام المطاط، التنبؤ، الشبكات العصبية الاصطناعية، قوة الانضغاط، معامل المرونة، مركب معين

ABSTRACT

The use of rubber granules as inclusion in a cement matrix gives to the composite some advantages. While experimental studies can be long, delicate and expensive, the prediction tool makes it easy to analyze their influence and thus appears as a valuable and less expensive complementary tool. This work proposes a dual approach in terms of predictions for the characterization of the elastic behavior of concretes incorporating rubber granules from the grinding of used tires (B.I.G.C). On the basis of certain criteria, the prediction of mechanical properties such as compressive strength and modulus of elasticity was addressed by preliminary statistical study which proved to be insufficient. To overcome this difficulty, the method of artificial neural networks is used. A comparison with experimental data from the literature shows good results in terms of performance criteria. In the second phase of the contribution, a new prediction model was developed based on the exact solution dedicated to infinitely diluted systems. The B.I.G.C composite is treated as concentrated system whose exact solution cannot be found. New elastic modulus equations were derived using the differential scheme for infinitely dilute system. The results obtained from the experimental work resulting from literature and the predictions obtained by the neural network method show that they are well framed by the limits obtained by the model.

KEYWORDS:

Rubber aggregate, prediction, artificial neural networks, compressive strength, modulus of elasticity, particular composite.

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1 ILLUSTRATION DE LA SEGREGATION DANS LE BETON [TUR 08].	15
FIGURE 1.2 EFFET DE L'INCORPORATION DES GRANULATS DE CAOUTCHOUC SUR LA TENEUR EN AIR OCCLUS [GAR 07]	16
FIGURE 1.3 AFFAISSEMENT DES B.I.G.C [ELC 15]	17
FIGURE 1.4 MASSE VOLUMIQUE DES MORTIERS AUTO-PLAÇANT AVEC ET SANS G.C [UYG 10].	18
FIGURE 1.5 INFLUENCE DU DOSAGE EN G.C SUR LA TENEUR EN AIR OCCLUS [CUO 10].	18
FIGURE 1.6 INFLUENCE DU TAUX DE CAOUTCHOUC SUR LE CONTENU D'AIR OCCLUS[KHA 99]	19
FIGURE 1.7 INFLUENCE DU DOSAGE EN G.C SUR LA RESISTANCE EN TRACTION PARFENDAGE[CUO 10].	20
FIGURE 1.8 RESISTANCE EN TRACTION DES BETONS PERMEABLES EN FONCTION DU TAUX D'INCORPORATION DU CAOUTCHOUC [GES 14].	21
FIGURE 1.9 INFLUENCE DU DOSAGE EN G.C SUR LA RESISTANCE EN COMPRESSION A 7 ET 28 JOURS (BAP DONT LE SABLE DE 0-4MM EST REMPLACE PAR DES G.C DE 0-4MM) [GAR 07]	23
FIGURE 1.10 INFLUENCE DES G.C SUR LA RESISTANCE EN COMPRESSION A L'AGE DE 28 JOURS[CUO 10]	25
FIGURE 1.11 RESULTATS DES ESSAIS SUR LE MODULE D'ELASTICITE [SON 10]	29
FIGURE 1.12 RESULTATS OBTENUS POUR LE MODULE D'ELASTICITE EN FONCTION DU TAUX DE SUBSTITUTION [GAN 09]	30
FIGURE 1.13 EFFET DES G.C SUR LE MODULE D'ELASTICITE ET LA RESISTANCE EN COMPRESSION [SUK 12]	31
FIGURE 1.14 INFLUENCE DU DOSAGE EN G.C SUR LE MODULE D'ELASTICITE A 28 JOURS[CUO 10]	32
FIGURE 1.15 COURBES FORCE- FLECHE ET CHARGE FLEXION [TUR 08]	34
FIGURE 1.16 COURBE « FORCE-FLECHE », INFLUENCE DU TAUX DE SUBSTITUTION EN G.C [CUO 10]	34
FIGURE1.17 COURBE TRACTION DEPLACEMENT [NGU 10]	35
FIGURE1.18 EVOLUTION DU RETRAIT TOTAL DES MORTIERS EN FONCTION DES TAUX D'INCORPORATION DES G.C [TUR 05].	37
FIGURE 1.19 EFFET DU RETRAIT SUR LES DIFFERENTS MELANGES ADOPTES[SUK 12]	37
FIGURE 1.20 EVALUATION DE L'INDICE DE FRAGILITE (BI), [ERK 95],[WU 98]	40
FIGURE 1.21 EFFET DES G.C SUR L'INDICE DE FRAGILITE [CUO 12]	40
FIGURE 1.22 INFLUENCE DE LA PRESENCE DE G.C SUR LA DUREE DE VIE-DIAGRAMME DE WÖHLER[CUO 12]	41
FIGURE 1.23 EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LA RESISTANCE EN COMPRESSION [CUO 10]	43

FIGURE 1.24 EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LA RESISTANCE EN TRACTION[CUO 10]	43
FIGURE 1.25 EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LE MODULE D'ELASTICITE[CUO 10]	44
FIGURE 2.1 NEURONE ARTIFICIEL	49
FIGURE 2.2 POIDS DANS UN NEURONE FORMEL	50
FIGURE 2.3 TOPOLOGIE DES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS.	51
FIGURE 2.4 PERCEPTRON MONOCOUCHE	52
FIGURE 2.5 PERCEPTRON MULTICOUCHE	53
FIGURE 2.6 ILLUSTRATION DE LA FONCTION D'ACTIVATION	53
FIGURE 3.1 INFLUENCE DES G.C. SUR LA RESISTANCE EN COMPRESSION [GAN 09]	66
FIGURE 3-2 EFFET DES G.C SUR LA RESISTANCE EN COMPRESSION A 28 JOURS, [CUO 10]	67
FIGURE 3-3 COURBES DE REGRESSION NON LINEAIRES DE LA RESISTANCE EN COMPRESSION EN FONCTION DU SUPERPLASTIFIANT[RAH 18]	73
FIGURE 3-4 COURBES DE REGRESSION NON LINEAIRES DE LA RESISTANCE EN COMPRESSION EN FONCTION DU RATIO W/C [RAH 18]	73
FIGURE 3-5 COURBES DE REGRESSION NON LINEAIRES DE LA RESISTANCE EN COMPRESSION EN FONCTION DU SQUELETTE GRANULAIRE [RAH 18]	74
FIGURE 3-6 RESULTATS OBTENUS PAR LE MODELE DE RESEAU DE NEURONES RNA POUR LES PHASES D'APPRENTISSAGE (TRAINING), DE VALIDATION, TEST ET DE L'ENSEMBLE[RAH 18].	75
FIGURE 3-7 DISTRIBUTION D'ERREUR POUR LES PHASES D'APPRENTISSAGE, DE VALIDATION ET DE TEST[RAH 18].	77
FIGURE 3-8 COURBE EXPRIMANT LA RESISTANCE A LA COMPRESSION EN FONCTION DU SQUELETTE GRANULAIRE [RAH 18].	77
FIGURE 3-9 VARIATION DE LA MASSE VOLUMIQUE DU BETON INCORPORANT DES G.C.	78
FIGURE 4.1 RESULTATS DES ESSAIS DU MODULE D'ELASTICITE	83
FIGURE 4.2 INFLUENCE DU DOSAGE EN G.C SUR LE MODULE D'ELASTICITE A 28 JOURS [CUO 10] ...	83
FIGURE 4.3 VARIATION DU MODULE D'ELASTICITE EN FONCTION DU SQUELETTE GRANULAIRE	90
FIGURE 4.4 VARIATION DU MODULE D'ELASTICITE EN FONCTION DU SUPERPLASTIFIANT.....	90
FIGURE 4.5 VARIATION DU MODULE D'ELASTICITE EN FONCTION DU RATIO EAU/CIMENT	91
FIGURE 4.6 RESULTATS OBTENUS PAR LE MODELE DE RESEAU DE NEURONES RNA POUR LES PHASES, TRAINING, VALIDATION, TEST ET L'ENSEMBLE	92
FIGURE 4.7 REPRESENTATION DES ERREURS ENTRE LES VALEURS EXPERIMENTALES ET PREDITES EN FONCTIONS DES INSTANCES	93
FIGURE 4.8 COURBE EXPRIMANT LE MODULE D'ELASTICITE EN FONCTION DU SQUELETTE GRANULAIRE	94
FIGURE 5.1 PREDICTION PAR LE MODELE DU MODULE D'ELASTICITE DU COMPOSITE EN FONCTION DE LA FRACTION VOLUMIQUE	110

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Module d'élasticité à 28 jours en fonction du dosage en G.C [Cuo 10].....	32
Tableau 1.2 Influence de la présence des G.C sur la durée de vie-Diagramme de Wöler [Cuo 10]..	42
Tableau 2.1 Modèles de fonctions d'activation.....	55
Tableau 3.1 Résultats expérimentaux obtenus par [Ges 10].....	63
Tableau 3.2 Résultats expérimentaux obtenus par [Ges 15].....	64
Tableau 3.3 Résultats expérimentaux obtenus par [Ngu 10].....	65
Tableau 3-4 Résultats expérimentaux obtenus par [Gan 09].....	66
Tableau 3-5 Résistances de la résistance en compression obtenus par [Cuo 10].....	67
Tableau 3-6 Résistances expérimentaux obtenus par [Cuo 10].....	67
Tableau 3-7 Résultats de l'analyse descriptive [Rah 18].....	70
Tableau 3-8 Corrélation bi-variee entre les différents paramètres.....	71
Tableau 3-9 Coefficients de détermination R^2 pour les différents modèles utilisés.....	72
Tableau 3-10 Valeurs statistiques du modèle de réseau RNA proposé.....	74
Tableau 4.1 Module d'élasticité à 28 jours en fonction du dosage en G.C. [Cuo 10].....	84
Tableau 4.2 Résultats de l'analyse descriptive.....	86
Tableau 4-3 Corrélation bi-variee entre les différents paramètres.....	88
Tableau 4-4 Coefficients de détermination R^2 pour les différents modèles utilisés.....	89
Tableau 4.5 Valeurs statistiques proposées pour le modèle RNA.....	94
Tableau 5-1 Données expérimentales : substitution avec des G.C	102
Tableau 5-2. Données expérimentales : substitution avec des G.C grossiers.....	104
Tableau 5-3 Données expérimentales : substitution avec des G.C fins et grossiers simultanément.....	104
Tableau 5-4 Tableau récapitulatif des caractéristiques mécaniques.....	106

DEDICACES-----	1
REMERCIEMENTS-----	2
RESUME-----	3
ABSTRACT-----	4
LISTE DES FIGURES-----	5
LISTE DES TABLEAUX-----	7
-----	11
INTRODUCTION GENERALE-----	11

CHAPITRE 1

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES BETONS INCORPORANT DES GRANULATS DE CAOUTCHOUC ISSUS DES PNEUS USAGES 13

1.1	<i>Introduction</i> -----	14
1.2	<i>Propriétés des bétons incorporant les granulats issus du broyage des pneus usagés (B.I.G.C)</i> -----	14
1.2.1	Propriétés à l'état frais-----	14
1.2.1.1	Ouvrabilité-----	15
1.2.1.2	Masse volumique-----	17
1.2.1.3	Air Occlus-----	18
1.3	<i>Propriétés à l'état durci</i> -----	19
1.3.1	Résistance en traction-----	19
1.3.2	Résistance en compression-----	21
	Cas des mortiers-----	21
	Niveau de substitution jusqu'à 15%-----	21
	Niveau de substitution jusqu'à 35%-----	22
	Niveau de substitution jusqu'à 60%-----	22
	Cas des bétons-----	23
	Niveau de substitution jusqu'à 15%-----	23
	Niveau de substitution jusqu'à 25%-----	23
	Niveau de substitution jusqu'à 33,33%-----	24
	Niveau de substitution jusqu'à 50%-----	25
	Niveau de substitution jusqu'à 100%-----	26
1.3.3	Module d'élasticité-----	27
	Cas des mortiers-----	27
	Niveau de substitution jusqu'à 15%-----	27
	Niveau de substitution jusqu'à 35%-----	27
	Niveau de substitution jusqu'à 60%-----	28
	Cas des bétons-----	28
	Niveau de substitution de 15%-----	28
	Niveau de substitution de 25%-----	30
	Niveau de substitution de 33,3%-----	30
	Niveau de substitution de 50%-----	31
	Niveau de substitution de 100%-----	32
1.3.4	Traitement des granulats de caoutchouc-----	33
1.3.5	Capacité de déformation-----	33
1.3.6	Retrait-----	37
1.3.7	Ténacité et Fragilité-----	39
1.3.8	Comportement a la fatigue-----	41
1.3.9	Effet de la température, résistance au feu et isolation thermique-----	42
1.4	<i>Conclusion</i> -----	45

CHAPITRE 2

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA METHODE DES RESEAUX DE NEURONES 46

2.1	Introduction	47
2.2	Revue bibliographique	47
2.3	Neurone formel	49
2.4	Poids et connexions	49
2.5	Présentation des réseaux de neurones	50
2.6	Architecture des réseaux	50
2.6.1	Réseau en propagation « FEED-FORWARD »	51
2.6.2	Réseau en propagation « FEED-BACK »	51
2.7	Perceptron monocouche	52
2.8	Perceptron multicouche (PMC)	52
2.9	Fonction d'activation	53
2.10	Apprentissage	56
2.10.1	Apprentissage supervisé	56
2.10.2	Apprentissage non supervisé	56
2.11	Fonction Performance	57
2.11.1	Coefficient de corrélation « R »	57
2.11.2	Erreur quadratique moyenne (Mean-Squared-Error) « MSE »	57
2.11.3	Erreur absolue moyenne (Mean-Absolute-Error) « MAE »	58
2.12	Valorisation de la méthode R.N.A dans le cas des Bétons incorporant les granulats de caoutchouc.	58
2.13	Conclusion	59

CHAPITRE 3

METHODE DES RESEAUX DE NEURONES APPLIQUEE A LA PREDICTION DE LA RESISTANCE EN COMPRESSION 60

3.1	Mise en œuvre du réseau de neurones pour la prédiction de la résistance en compression : Application du réseau de neurone au cas étudié	61
3.2	Introduction	61
3.3	Détermination des entrées/sorties du réseau de neurones	68
3.4	Elaboration de la structure du réseau	68
3.5	Apprentissage	68
3.5.1	Algorithme de Levenberg-Marquardt	69
3.5.2	Fonction de transfert	69
3.6	Validation et test	69
3.7	Fonction performance	69
3.8	Résultats et discussion	69
3.9	Conclusion	78

CHAPITRE 4

METHODE DES RESEAUX DE NEURONES APPLIQUEE A LA PREDICTION DU MODULE D'ELASTICITE 80

4.1	Mise en œuvre du réseau de neurones pour la prédiction du module d'élasticité : Application du réseau de neurone au cas étudié	81
4.2	Introduction	81
4.3	Détermination des entrées/sorties du réseau de neurones	84
4.4	Elaboration de la structure du réseau	85
4.5	Apprentissage	85
4.5.2	Algorithme de Levenberg-Marquardt	85

4.5.2	Fonction de transfert	85
4.6	Validation et test	86
4.7	Fonction performance	86
4.8	Résultats et discussion	86
4.9	Conclusion	95

CHAPITRE 5

PREDICTION DU MODULE D'ELASTICITE PAR LA THEORIE DES COMPOSITES PARTICULIERS	96	
5.1	Introduction	97
5.2	Revue bibliographique	97
5.3	Synthèse des travaux considérés	101
5.4	Description et hypothèses sur les phases	105
5.4.1	Matrice	105
5.4.2	Renfort ou inclusion	105
5.5	Proposition de nouvelles équations de prédiction	106
5.6	Développement de nouvelles équations pour les systèmes concentrés	107
5.7	Résultats et discussion	110
5.8	Conclusion	111
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE	113	
BIBLIOGRAPHIE	116	

Introduction générale

La valorisation des pneus usagés a longtemps été un sujet important. Leur stockage, bien que classé comme des déchets non dangereux, représentent un danger pour l'environnement. La mise en place de nouvelles voies de valorisation des pneumatiques non réutilisables s'avère particulièrement opportune. Leur apport dans le béton constitue une voie de valorisation et de recherche assez intéressante. Les caractéristiques mécaniques telles que la résistance en compression et le module d'élasticité des bétons légers incorporant des granulats issus du broyage des pneus usés sont des valeurs parfois coûteuses et difficilement mesurable expérimentalement. Afin de modéliser ces caractéristiques d'une façon proche de la réalité, il faut prendre en compte la variabilité de tous les paramètres intervenants et influents. Le désir de développer une prédiction capable d'accomplir des tâches intelligentes dans la modélisation et l'optimisation des caractéristiques mécaniques dans un temps court, est l'origine du développement d'un outil à base de la méthode des réseaux de neurones. Ce type d'analyse est très utile pour la maîtrise des caractéristiques, la réduction de la variabilité et le risque de réduire les performances en contrôlant en amont les paramètres influents.

Dans notre thèse, partant des résultats expérimentaux issus de la littérature, des études théoriques sont menées à l'effet d'enrichir les connaissances des bétons légers incorporant des granulats issus du broyage des pneus usés (B.I.G.C) lorsque les granulats de caoutchouc sont associés aux matrices cimentaires.

Ce mémoire de thèse est présenté en cinq chapitres.

Le premier chapitre est dédié à une synthèse détaillée de différents travaux expérimentaux consacrés aux propriétés mécaniques des bétons incorporant des granulats issus du broyage des pneus usés. Une première analyse des études existantes portant sur les propriétés à l'état frais est effectuée. Les travaux issus de la littérature montrent l'influence des granulats de caoutchouc (G.C) sur les bétons lorsqu'ils sont utilisés en substitution des granulats naturels en ciblant trois caractéristiques principales : ouvrabilité, la masse volumique et l'air occlus. Une deuxième analyse des études réalisées porte sur les caractéristiques mécaniques à l'état durci. Parmi ces caractéristiques, la résistance à la traction. L'accent est mis ensuite sur les principales caractéristiques qui importe l'ingénieur à savoir la résistance en compression et le module d'élasticité. Ces deux paramètres ont été largement détaillés aussi bien pour les mortiers que pour

les bétons. D'autres caractéristiques ont fait l'objet de description tels que le traitement des granulats de caoutchouc, la capacité de déformation, le retrait, la ténacité, la fragilité, le comportement à la fatigue, effet de la température, la résistance au feu et finalement l'isolation thermique. Toutes ces caractéristiques ont été passées en revue à l'effet d'évaluer l'impact des G.C sur les matrices cimentaires tels que les mortiers ou les bétons avec différentes manières de substitution des agrégats naturels par des granulats de caoutchouc (G.C).

Le deuxième chapitre traite l'utilisation de la méthode des réseaux de neurones et son utilisation dans différentes applications en tant qu'outil de prédiction. La compréhension et l'amélioration des caractéristiques mécaniques des B.I.G.C nécessitent une optimisation des paramètres qui affectent ces caractéristiques. Cette méthode fera l'objet d'applications dans les chapitres suivants. Son utilisation est d'autant plus justifiée lorsqu'une étude statistique s'avère insuffisante pour décrire le comportement. Par conséquent, son utilisation devient indispensable pour palier à cette insuffisance. Peu d'auteurs ont utilisés cette méthode. L'idée dans notre contribution est de mettre en valeur certains paramètres significatifs pour aborder la problématique de la prédiction dans le cas des bétons incorporant des G.C.

Le troisième chapitre est une application de la méthode des réseaux de neurones aux bétons incorporant des granulats de caoutchouc en vue de prédire la résistance en compression. Elle est explicitée tout d'abord pour étudier la sensibilité de certains paramètres sur le comportement des B.I.G.C. Se basant sur la conception d'un modèle de réseau de neurone et en opérant à une confrontation aux résultats expérimentaux issus de la littérature, la pertinence du modèle est mise en avant en utilisant des paramètres de performance.

De manière similaire, le chapitre quatre traite la prédiction du module d'élasticité, en utilisant la méthode des réseaux de neurones. La pertinence du modèle est évaluée en confrontant les prédictions obtenues aux résultats expérimentaux issus de la littérature. Le modèle est conçu en utilisant les mêmes paramètres que ceux exploités dans le troisième chapitre.

Dans la continuité de l'application de la méthode des réseaux de neurones, le chapitre cinq traite les bétons incorporant des G.C comme des composites particuliers. La conception d'un modèle de prédiction du module d'élasticité est confrontée d'une part aux résultats expérimentaux issus de la littérature et d'autre part aux résultats de prédiction obtenues dans le chapitre quatre.

Enfin, on donne une conclusion générale et les perspectives de ce travail.

CHAPITRE 1

Revue bibliographique sur les bétons incorporant des granulats de caoutchouc issus des pneus usagés

1.1 Introduction

Avec la croissance du parc automobile, un gisement énorme de pneus usagés tant en volume qu'en poids, s'est constitué à travers le monde. Le stockage et l'élimination des pneumatiques usagés sont devenus des préoccupations pour l'environnement. En effet, les pneus étant inflammables, ils représentent un risque pour la santé et l'environnement en cas d'incendies (émissions de gaz toxiques et de liquide huileux) ou de dépôts sauvages (refuges pour les moustiques potentiellement porteurs de virus...). Les pneus offrent aux moustiques des lieux de développement favorables. Avec les prévisions de croissance mondiale du pneumatique, la demande en matières premières va augmenter dans les décennies à venir. La mise en place de nouvelles voies de valorisation des pneumatiques usagés s'avère particulièrement opportune, soit par rechapage, soit par une valorisation énergétique ou par une valorisation matière dans les domaines des travaux publics et de génie civil. Parmi les applications actuelles dans le domaine du génie civil on peut citer : les bassins de rétention, revêtement des sols industriels, les sols de sécurité pour les aires de jeux, les sols sportifs ou récréatifs, les matériaux pour l'isolation phonique et particulièrement le béton qui est le domaine auquel on s'intéresse. L'adjonction de ces granulats dans les matériaux à base cimentaire comme les bétons ou les mortiers permet d'identifier une nouvelle valeur ajoutée et de nouvelles perspectives d'applications.

1.2 Propriétés des bétons incorporant les granulats issus du broyage des pneus usagés (B.I.G.C)

1.2.1 Propriétés à l'état frais

Le choix des granulats dans le béton, joue un rôle majeur pour l'obtention de propriétés à l'état frais. Il s'agit de se renseigner sur le potentiel d'utilisation de ces renforts comme granulats dans le béton. Les principaux essais qui permettent de contrôler les caractéristiques d'un béton et d'évaluer la rhéologie à l'état frais sont l'ouvrabilité, la masse volumique et la détermination de l'air occlus du béton.

1.2.1.1 Ouvrabilité

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité. Il est nécessaire d'ajuster sa granulométrie afin d'améliorer l'ouvrabilité du mélange. Des études ont mis en évidence les difficultés lors de l'introduction de ces G.C dans les mélanges de béton ou de mortier notamment à l'état frais. En effet, les G.C étant des matériaux très légers (1200 kg/m^3) en comparaison avec d'autres constituants tels que le sable (2600 kg/m^3), ces derniers ont tendance à remonter rapidement en surface (cf. figure 1-1). Ainsi, l'utilisation d'un agent de viscosité est fortement recommandée afin de limiter les risques de ségrégation.

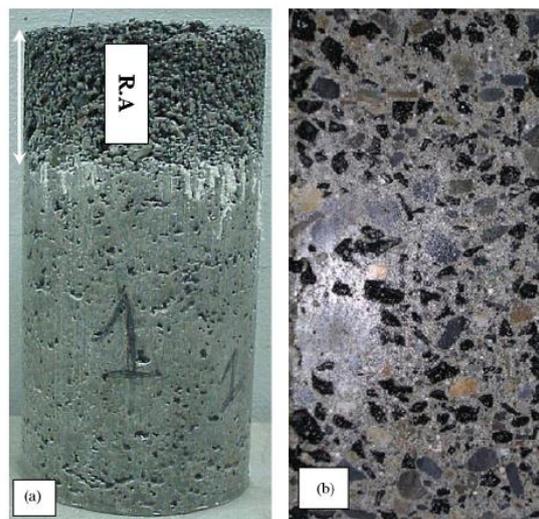


Figure 1.1 Illustration de la ségrégation dans le béton [Tur 08].

- a. Concentration élevée de granules de caoutchouc à la surface supérieurs du cylindre si les additifs ne sont pas utilisés.
- b. Effet d'un agent de viscosité qui permet d'éviter la ségrégation des G.C.

Les granules de caoutchouc ont la caractéristique d'être hydrophobe ce qui engendre un comportement particulier lors du malaxage. Les G.C auront tendance à repousser l'eau lors du malaxage en entraînant avec eux de l'air et ainsi augmenter de façon significative la proportion de l'air occlus dans le mélange (cf. figure 1-2). Par ailleurs, certains auteurs affirment que la taille des G.C dans le mélange à une incidence sur la teneur en air occlus alors que d'autres affirme le contraire.

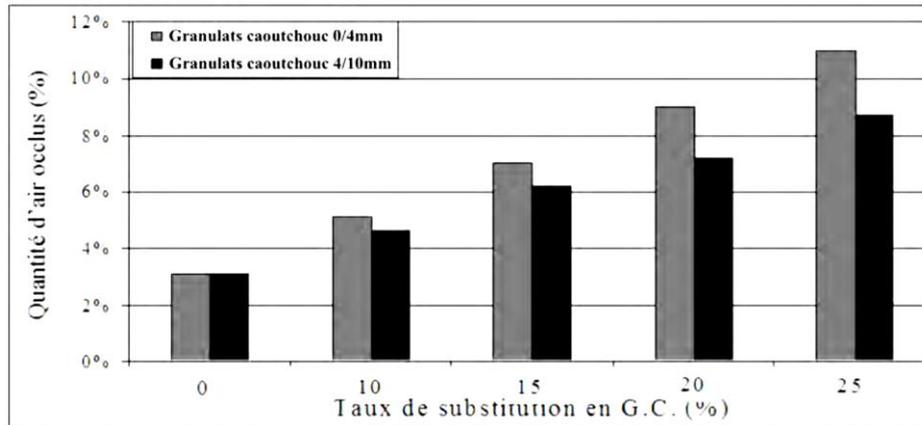


Figure 1.2 Effet de l'incorporation des granulats de caoutchouc sur la teneur en air occlus [Gar 07]

La maniabilité des bétons ou des mortiers mélangés aux G.C diminue avec la proportion de ces derniers.

Aiello[Aie 10] ont étudié les propriétés mécaniques des bétons incorporant des G.C issus du broyage des pneus usagés en deux étapes. Dans la première étape, les bétons caoutchoutés ont été réalisés avec des fractions de caoutchouc de 20 mm en remplacement des gros agrégats naturels. Dans la seconde étape, les bétons caoutchoutés ont été réalisés avec des fractions de caoutchouc comprises entre 10 mm et 20 mm en remplacement des agrégats naturels fins. Ces auteurs ont observés que l'ouvrabilité du béton frais est légèrement améliorée par la substitution partielle de G.G grossiers ou fins. Les B.I.G.C peuvent être mélangés, coulés et vibrés en utilisant des équipements et des procédures adaptés au béton conventionnel. Les auteurs ont constaté un comportement très fluide. Leurs résultats s'accordent avec ceux reportées en littérature par Raghavan[Rav 98], ou les composites cimentaires associés aux G.C atteignaient une maniabilité similaire ou meilleure que celle des mortiers de contrôle.

Garros[Gar07] a montré que l'adjonction de G.C dans les bétons auto-plaçant entraîne une modification des bétons à l'état frais particulièrement la chute de l'étalement. L'auteur a déduit que l'augmentation du dosage en G.C était préjudiciable aux propriétés rhéologiques, et conduisait à des mélanges plus visqueux avec des seuils de cisaillement plus importants.

Cuong [Cuo10] a montré dans sa thèse que l'adjonction des G.C issus du broyage, moins sphériques et plus rugueux utilisés en substitution de sable roulé moins rugueux entraîne une perte importante de la maniabilité. Aussi, l'auteur à constater que compte tenu de la différence de

répartition du squelette granulaire des G.C et du sable, en particulier avec une teneur en fines moins importantes pour les G.C, cela affectait la rhéologie des B.I.G.C et leur maniabilité.

1.2.1.2 Masse volumique

Concernant la masse volumique, Cuong[Cuo 10] a montré que lorsque le sable (de densité 2,67) est substitué par un volume identique en G.C de densité plus faible (1,2), cette propriété diminue naturellement avec l'augmentation du taux de substitution en G.C.

Elchalakani[Elc 15] a étudié l'impact des G.C et les propriétés à l'état frais d'un béton normal et d'un béton à haute résistance. Dans les deux cas les B.I.G.C présentaient une bonne maniabilité par rapport au béton de référence lorsque les quantités des adjuvants étaient bien définies (cf. figure 1-3).

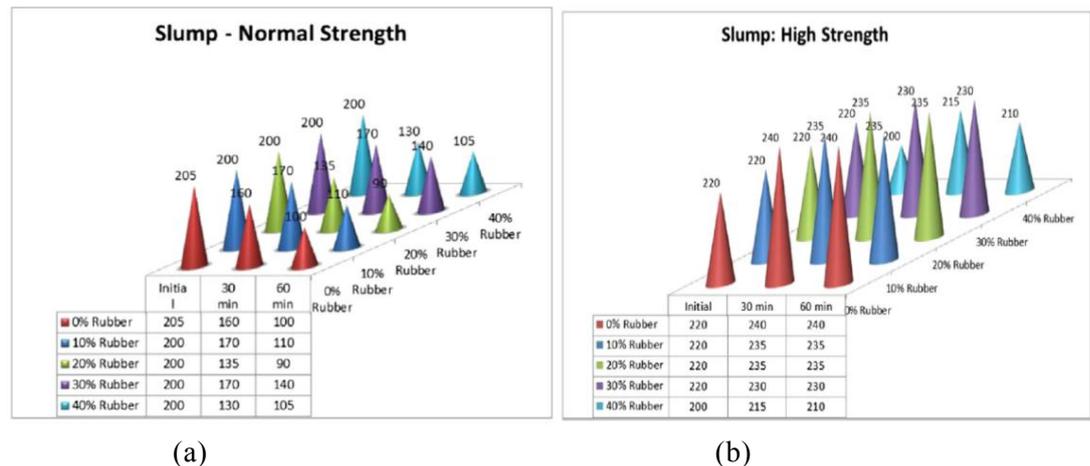


Figure 1.3 Affaissement des B.I.G.C [Elc 15]

- a. Béton à résistance normale.
- b. Béton à haute résistance.

L'étude réalisée par Uygunoglu[Uyg 10] a montré une chute de la masse volumique lorsque le sable est substitué par des G.C à des taux de 10%, 20%, 30%, 40% et 50% (cf. figure 1-4). La masse volumique diminue avec l'augmentation du ratio w/p (eau/poudre). Lorsque w/p=0,40, la chute variait de 1600 kg/m³ et 1900 kg/m³. Lorsque w/p=0,51, la chute de la masse volumique était comprise entre 1325 kg/m³ et 1800 kg/m³. La chute de la masse volumique est justifiée par la faible densité des G.C.

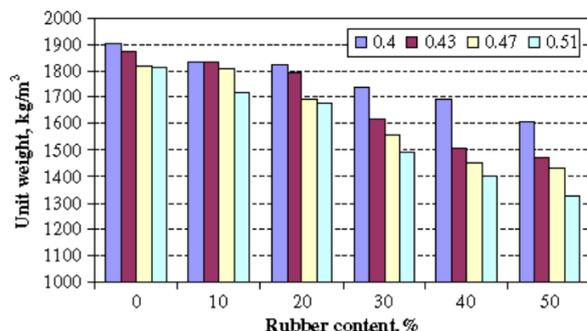


Figure 1.4 Masse volumique des mortiers auto-plaçant avec et sans G.C [Uyg 10].

1.2.1.3 Air Occlus

S'agissant de la teneur en air occlus, Cuong [Cuo 10] a noté qu'elle augmente avec le volume des G.C, comme l'illustre la figure 1-5, la teneur en air occlus accompagnant les taux de substitution des G.C. Cette tendance est attribuée à la nature hydrophobe du G.C qui fait qu'il emprisonne l'air lors de la phase de malaxage (cf. figure 1-5) d'où une augmentation de la porosité.

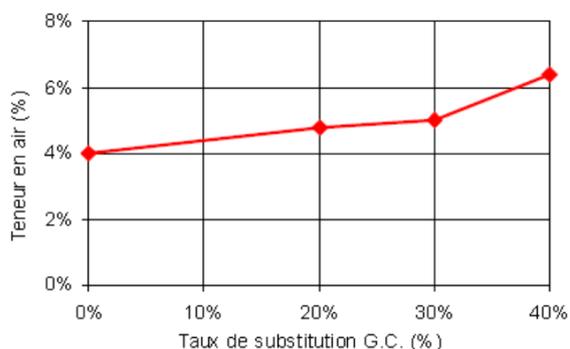
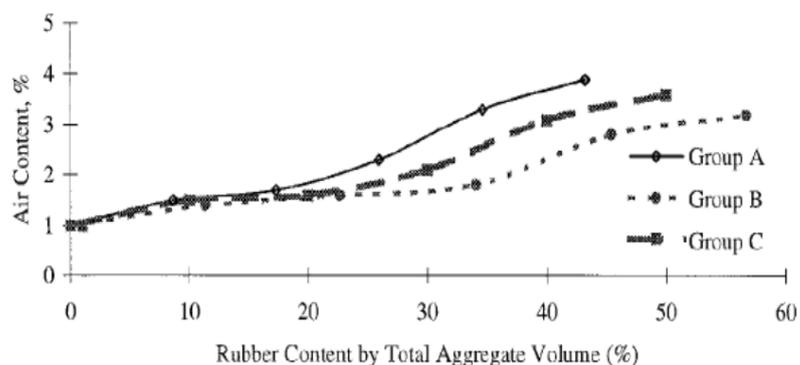


Figure 1.5 Influence du dosage en G.C sur la teneur en air occlus [Cuo 10].

Khatib [Kha 99] ont constaté que l'incorporation des G.C entraînait une augmentation de l'air occlus lorsque le sable et le gravier sont substitués par des G.C respectivement (groupe A et B). Le groupe C correspond à un béton pour lequel le sable et le gravier sont substitués par des G.C fins et grossiers (cf. figure 1-6).



F

figure 1.6 Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus[Kha 99]

1.3 Propriétés à l'état durci

1.3.1 Résistance en traction

Turatsinze[Tur06] ont noté que l'incorporation des G.C était préjudiciable pour les B.I.G.C. En effet, l'adjonction de 30% de G.C en substitution de sable de dimensions similaires entraînait une chute de 60% de la résistance en traction.

Dans d'autres travaux, Turatsinze[Tur07] ont noté que l'incorporation des G.C était préjudiciable pour les bétons incorporant des granulats issus du broyage des pneus usés (B.I.G.C). En effet, l'adjonction de 30% de G.C en substitution de sable de dimensions similaires entraînait une chute de 70% de la résistance en traction en comparaison avec les mortiers de référence.

Ganjian [Gan09] ont mentionné que pour un taux de substitution de 7,5% des G.C, la réduction de la résistance en traction était de 44% et 24% pour une substitution des agrégats naturels grossiers et fins par des granulats de caoutchouc grossiers et fins respectivement, et ce comparativement au béton de référence. L'utilisation d'un matériau tel que le caoutchouc qui dispose d'une certaine souplesse laisse penser que celui-ci constituerait une barrière contre la propagation des fissures dans le béton. Cependant, les résultats ont montré le contraire de cette hypothèse. Les auteurs l'ont justifié par :

- Zone d'interface entre le caoutchouc et le ciment qui peut agir comme une micro-fissure due à une faible liaison entre les deux matériaux. La zone d'interface accélère la dégradation du béton
- L'examen visuel a montré que la ségrégation entre la pâte de ciment et le caoutchouc laisse supposer que le caoutchouc agit comme une cavité.

Coung[Cuo 10] dans sa thèse a montré que la résistance en traction diminue avec le volume des G.C. Un taux de substitution de 20% et 40% en G.C entraînait une chute de résistance en traction de 27% et 53% respectivement (cf. figure 1-7).

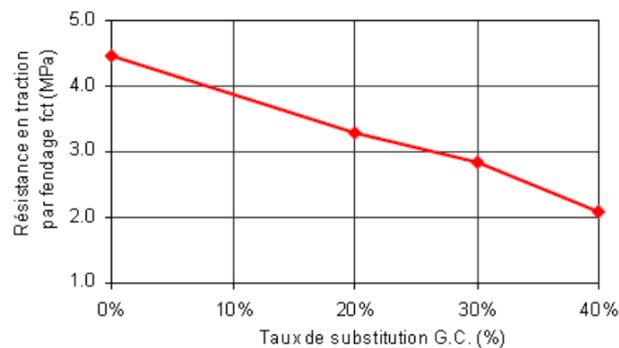


Figure 1.7 Influence du dosage en G.C sur la résistance en traction par fendage[Cuo 10].

Gesoglu[Ges 14] ont étudiés les propriétés mécaniques des B.I.G.C.perméables lorsque les gros agrégats naturels étaient substitués par des G.C très fins, fins et grossiers à des taux de 5%, 10% et 20% par rapport au volume total des agrégats. Leurs résultats montrent que les agrégats de caoutchouc semblent avoir deux rôles importants : les petits granulats de caoutchouc isolent d'une part les granulats entre eux et d'autre part isolent les granulats de la pâte de ciment créant ainsi des liens plus faibles dans le mélange. La résistance en traction du béton de contrôle a été réduite de 2,1 MPa à 0,7 MPa(chute de 66%) lorsque les agrégats sont substitués par des G.C grossiers et très fins simultanément à un taux d'incorporation de 10% chacun. Le deuxième constat est lié aux granulats grossiers de caoutchouc qui jouent un rôle de fibres de renforcement pour ce type de béton perméable. La chute de la résistance en traction était de l'ordre de 22% pour un taux de substitution de 10% en G.C grossiers (cf. figure 1-8)

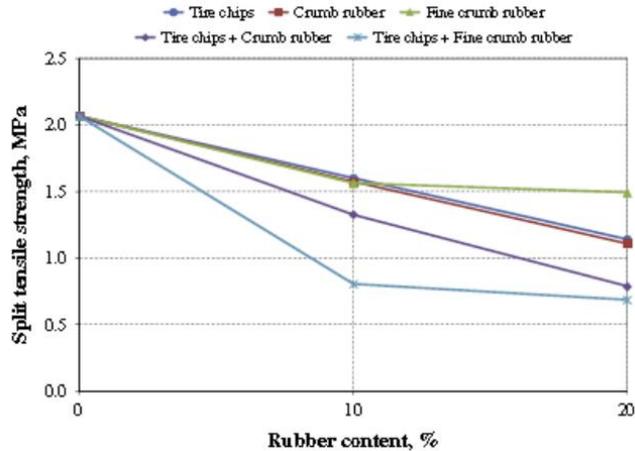


Figure 1.8 Résistance en traction des bétons perméables en fonction du taux d'incorporation du caoutchouc [Ges 14].

1.3.2 Résistance en compression

Lorsqu'on se réfère aux données bibliographiques tous les auteurs qui ont travaillé sur les matériaux cimentaires incorporant les G.C s'accordent à confirmer l'effet très préjudiciable des granulats de caoutchouc sur la résistance en compression justifié par un grand nombre de paramètres : le type et dosage des matériaux utilisés, leur origine, la nature des granulats, la porosité etc...

Cas des mortiers

Niveau de substitution jusqu'à 15%

Al-Akhras[Akh04] ont étudié la cinétique de la résistance en compression des mortiers à 3, 7, 28 et 90 jours lorsque le sable est substitué par fines particules de caoutchouc en poids, à des taux de 2,5% ; 5% ; 7% et 10%. Les auteurs ont montré une amélioration au fil du temps de la résistance en compression de l'ordre de 12% ; 14% ; 23% et 40% avec des taux d'incorporation de 2,5% ; 5% ; 7% et 10% respectivement. La résistance augmente avec un accroissement des fines particules de caoutchouc.

Oikonomou[Oik09], en substituant dans les mortiers le sable par des G.C (dimension 0,75-1,18mm) à des taux de 2,5% ; 5% ; 7,5% ; 10% ; 12,5% et 15% en poids, les auteurs ont constatés une chute de la résistance

en compression de 24,12% ; 47,66% ; 60,37% ; 72,71% ; 76,2% et 78,99% respectivement.

Niveau de substitution jusqu'à 35%

Turatsinze[Tur06] ont constaté une chute de la résistance en compression des mortiers a 28 jours de 57,89% et 78,95% pour des taux de substitution de 20% et 30%, en volume, respectivement, lorsque le sable est substitué par des G.C de dimension maximale de 4 mm.

Aules[Aul 11], ont montré une réduction de la résistance en compression des mortiers de 23,81% ; 46,02% ; 53,97% ; 58,73% ; 59,52% et 57,93% pour des taux de substitution de 3% ; 10% ; 15% ; 20% ; 25% et 30%, en volume, respectivement, lorsque le sable (de dimension maximale 4,75 mm) est substitué par des G.C de dimension similaire.

Nguyen [Ngu10], ont montré une réduction de la résistance en compression a 28 jours des mortiers de l'ordre de 46,48% et 59% pour des taux de substitution de 20% et 30%, en volume, respectivement, lorsque le sable est substitué par des G.C de dimension similaire.

Niveau de substitution jusqu'à 60%

Gisbert [Gis14], ont indiqué une réduction de la résistance en compression des mortiers de l'ordre de 63,75% et 71,20% ; 77,74% et 90,22% pour des taux de substitution de 10% ; 20% ; 30% et 40%, en volume, respectivement, lorsque le sable grossier (80% des résidus retenus à 2.0mm) était substitué par des G.C de dimensions similaires. Les chutes sont de l'ordre de 73,77% ; 93,37% ; 93,75% et 96,82%, respectivement, lorsque le sable fin (80% des résidus retenus à 0,25mm) étaient substitués par des G.C de dimensions similaires.

Uygunoglu[Uyg 10], pour un rapport eau/ciment de 0,4, ont constaté une chute de la résistance en compression des mortiers de l'ordre de 8,36% ; 32,72% ; 41,41% ; 44,9% et 48,38% pour des taux de substitution de 10% ; 20% ; 30% ; 40% et 50%, en volume, respectivement, lorsque le sable de dimension comprise entre 0 et 4 mm étaient substitués par des G.C de dimensions comprises entre 1-4mm.

Turki[Tur 09 a-b], ont substitué dans les mortiers le sable naturel (dimension comprise entre 0-2mm) par des G.C (dimension comprise entre 1-4mm). La réduction de la résistance en compression dans ces mortiers était de l'ordre de 20,82% et 24,36% ; 42,74% ; 65,1% et 79,18% pour des taux de substitution de 10% ; 20% ; 30% ; 40% et 50%, en volume, respectivement.

Huang [Hua 13] et Eiras [Eir 14] ont indiqué une chute de la résistance en compression lorsque les granulats naturels sont substitués par des G.C. en volume.

Cas des bétons

Niveau de substitution jusqu'à 15%

Skripkiunas[Skr 07], ont montré une baisse de 1,46% de la résistance en compression lorsque le sable est remplacé par un taux d'incorporation des G.C de 3,2% (dimension comprise entre 0-1mm) par poids.

Holmes [Hol 14] quant à eux ont montré une baisse de la résistance en compression lorsque le sable est remplacé par un taux d'incorporation des G.C de 7,5% (dimension comprise entre 0,425-4,75 mm).

Pelissier[Pel 11], ont noté une réduction de la résistance en compression du B.I.G.C de 67%lorsque le sable est remplacé par un taux d'incorporation des G.C de 10% (dimension comprise < 4,8 mm), alors que pour Chunlin[Chu 11], la tendance baissière est de 5,73% avec un taux de substitution de 10%, lorsque le sable est remplacé par les G.C (dimension comprise entre 1-5mm).

Niveau de substitution jusqu'à 25%

Garros [Gar 07], a montré l'impact du dosage et de la taille des G.C sur le BAP. L'auteur a constaté une chute 86% de la résistance en compression pour un taux de 25% en G.C(cf. figure 1-9).

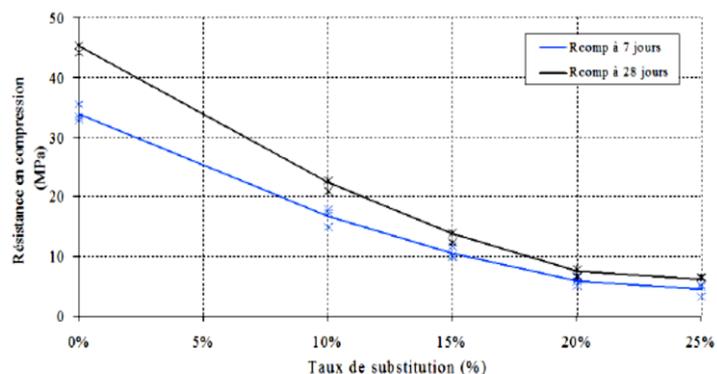


Figure 1.9 Influence du dosage en G.C sur la résistance en compression à 7 et 28 jours (BAP dont le sable de 0-4mm est remplacé par des G.C de 0-4mm) [Gar 07].

Eldin[Eld 93], ont montré une baisse de 85% et 65% lorsque le gravier et le sable sont substitués respectivement dans leur totalité. Les auteurs ont supposés que les G.C se comportent comme des trous, ce qui justifie cette chute.

Gesoglu[Ges 14], ont substitués partiellement les agrégats naturels par des G.C (dimension de 2 ou 4mm).Les auteurs ont constaté une chute de 18,94% et 44,1% de la résistance en compression pour des taux de 10% et 20% en G.C de dimensions 4 mm, respectivement. Pour des G.C de 2 mm, la chute de la résistance en compression était de 7,85% et 38,57 % pour des taux de 10% et 20% en G.C, respectivement.

Youssif[You 14], ont reportés une augmentation de la résistance en compression en remplaçant partiellement le sable par des G.C (dimension 1,18-2,36 mm) , a des taux de 5% et 10%, par volume, mais une chute de résistance en compression pour un taux de 20%. D'autre part, les taux de substitution en G.C de 5% ; 10% et 20% (dimension 0,15-2,36 mm), induisaient une chute de la résistance en compression de 18% ; 20% et 37% respectivement.

Thomas [Tho 14], ont constaté une chute de la résistance en compression de 3,53% ; 11,76% ; 12,94% ; 21,17% ; 29,41% ; 41,18% ; 94,52% et 52,94% pour des taux de substitution de sable de 2,5% ; 5% ; 7,5% ; 10% ; 12,5% ; 15% ; 17,5% et 20% en G.C de dimensions 1mm, respectivement. Les dimensions du G.C utilisées sont réparties comme suit : 40% de poudre de caoutchouc passant au tamis de 30, 35% de dimensions comprises entre 2-4mm et 25% de dimensions comprises entre 0,8-2mm.

Antil [Ant 14], Yung [Yun 13], Gesoglu [Ges 11] et Al-Tayeb [Tay 13] ont reporté une chute de résistance en compression lorsque les granulats naturels sont substitués par des G.C.

Niveau de substitution jusqu'à 33,33%

Rahman [Rah 12], ont indiqué une réduction de la résistance en compression en substituant partiellement le sable par des G.C (dimension comprise entre 1-4mm) dans les bétons auto-plaçant a des taux atteignant 28%, par volume.

Sukontasukkul[Suk 12], ont enregistré une chute de la résistance en compression en substituant partiellement le sable par des G.C grossier (passant au tamis 6) et des G.C fins (passant au tamis 26). Les B.I.G.C contenant les G.C grossiers ont des résistances en compression supérieures à ceux contenant des G.C fins. Les baisses de la résistance en compression sont de l'ordre de 42,48% ; 65,1% et 78,77% lorsque les taux de substitution en G.C grossier sont de 10% ; 20% et 30%, respectivement.

Niveau de substitution jusqu'à 50%

Valadres[Val 12], ont constaté une chute de la résistance en compression à 28 jours de 19,82% ; 35,15% et 51,89% pour des taux de substitution de sable de 12,5% ; 24,15% et 35,77% en G.C, par volume, respectivement.

Güneyisi[Gün 04] ont remarqué une chute de la résistance en compression à 90 jours pour des taux de substitution de sable de 2,5% ; 5% ; 10% ; 15% ; 25% et 50% en G.C. Les auteurs ont utilisés deux types de G.C : des granulats de caoutchouc fins de dimensions maximales de 4 mm en substitution des agrégats fins de dimensions 4mm et des G.C grossiers de dimensions comprises entre 10-40 mm en substitution des agrégats grossiers naturels, par rapport au volume total des agrégats. Pour un ratio de w/c (eau/ciment) de 0,6 la chute de la résistance en compression pour des taux de substitution de G.C grossiers de 2,5% ; 5% ; 10% ; 15% ; 25% et 50% en G.C était de 12,64% ; 22,86% ; 40,89% ; 54,83% ; 69,89% et 86,8%, respectivement. Les auteurs ont signalé que la résistance en compression peut être améliorée en remplaçant une partie du ciment par de la fumée de silice.

Cuong [Cuo 10], a confirmé la tendance baissière de la résistance en compression. Les résultats moyens obtenus à partir de trois essais montrent que la chute est de l'ordre de 38%, 59% et 72% pour des taux de substitution de 20% ; 30% et 40% par rapport au béton de référence (cf. figure 1-10). L'auteur justifie cette tendance baissière par la rigidité beaucoup plus faible du caoutchouc par rapport à celle des granulats naturels d'une part (argument évoqué par Li [Li 98], et d'autre part par le défaut d'adhérence entre le caoutchouc et la matrice ou à la mauvaise qualité de la zone de transition entre ces deux phases (argument évoqué par Garros, 2007).



Figure 1.10 Influence des G.C sur la résistance en compression à l'âge de 28 jours [Cuo 10]

L'auteur a évalué l'influence de la présence des G.C sur le développement de la résistance en compression en fonction du temps. La cinétique du développement de la résistance en compression indique à l'auteur que la différentiation se produit durant les premiers jours.

Dans d'autres travaux, certains auteurs ont tenté d'expliquer la faiblesse de l'interface entre les G.C et les mortiers. En effet, Raj [Raj 11], dans leur étude ont associé la faible résistance des B.I.G.C à l'interface ou la zone de transition entre le mortier à base de caoutchouc et les agrégats grossiers. Ces faibles interfaces agissent comme à l'origine des micro-fissurations dont la coalescence aboutit à une macro-fissuration.

Thomas [Tho 14], ont eux aussi associé la faible résistance dans les B.I.G.C aux surfaces lisses entre les G.C et la pâte de ciment. D'autre part, Taha[Tah 08], soutiennent cette hypothèse en plus de grande déformabilité du G.C par rapport à la pâte de ciment environnante, qui est à l'origine de l'initiation de la micro-fissuration. Cette supposition s'apparente avec la présence d'air dans un béton traditionnel. La troisième raison évoquée est celle de la densité de la matrice de béton qui dépend fortement de la densité, la taille et la dureté de l'agrégat

Niveau de substitution jusqu'à 100%

Turgut[Tur 08-p], ont reporté une réduction de la résistance en compression en substituant le sable par des G.C de dimensions comprises entre 0,075 et 4,75mm à des taux différents, en volume. La chute était de l'ordre de 12,54% ; 33,1% ; 57,49% ; 69,34% ; 81,18% et 84,67% pour des taux de substitution de 10% ; 20% ; 30% ; 40% ; 50% ;60% et 70%, respectivement.

Issa [Iss 13], ont préparé des bétons contenant du sable naturel et du sable concassé comme agrégat fins à des taux de 33,66% et 66,66% respectivement. Le sable concassé a été substitué par des G.C fins de dimensions comprises entre 0,075-2,54 mm à des taux de 15% ; 25% ; 50% et 100%, en volume. En outre, tous les agrégats fins sont remplacés par des G.C fins à un taux de 100%, par volume. Les résultats ont montré une réduction de la résistance en compression à l'âge de 7 et 28 jours. A 28 jours, la chute de la résistance en compression est de l'ordre de 17,85% ; 36% ; 58,15% ; et 83,69% pour une substitution des sables concassés à des taux de 15% ; 25% ; 50% et 100%, respectivement, alors qu'elle était de 96% pour une substitution complète des agrégats fins par des G.C.

1.3.3 Module d'élasticité

Cas des mortiers

Niveau de substitution jusqu'à 15%

Pedro [Ped 13], ont montré une réduction du module d'élasticité dans les mortiers, avec une substitution partielle du sable par des G.C (0-2mm). Lorsque les taux de substitution sont de 5%, 10% et 15%, la baisse du module d'élasticité était de l'ordre de 11,79% ; 28,23% et 31,74%, respectivement, alors qu'elle est de 20,16% ; 32,9% et 43,51%, respectivement à 90 jours.

Niveau de substitution jusqu'à 35%

Turatsinze [Tur 06], ont montré qu'une substitution partielle de sable dans les mortiers (dimension maximale de 4 mm) par des G.C de dimensions maximale similaires à des taux de 20% ; et 30%, en volume, engendrait une chute du module d'élasticité statique de 38,37% et 59,16% respectivement, alors que la chute du module d'élasticité dynamique était de l'ordre de 47,25% et 77,59% respectivement pour les mêmes taux.

Nguyen [Ngu 10], ont montré une réduction du module d'élasticité dans les mortiers, avec une substitution partielle du sable. Lorsque les taux de substitution sont de 20% et 30%, la baisse du module d'élasticité était de l'ordre de 36,51% et 47,3%, respectivement.

D'autres chercheurs tels qu'Abdull [Abd 11-a], confirment qu'une substitution de sable dans des mortiers par des G.C (dimension 2-2,36mm) a des taux allant de 0% à 30% et un rapport w/c (eau/ciment) de 0,4, entraînait une chute du module d'élasticité statique et dynamique avec un accroissement du taux d'incorporation des G.C.

Dans d'autres travaux, Abdull [Abd 11] confirment qu'une substitution de sable dans des mortiers par des G.C (dimension 2- 2,36 mm) a des taux allant de 0% à 35% par volume de sable et un rapport w/c (eau/ciment) de 0,3 ; entraînait une chute du module d'élasticité avec un accroissement du taux d'incorporation des G.C.

Niveau de substitution jusqu'à 60%

Gissbert[Gis 14], confirment qu'une substitution de sable dans des mortiers par des G.C (dimension 2- 2,36 mm) a des taux allant de 10% ; 20% ; 30%et40%, entraînant une chute du module d'élasticité de 35,27% ; 51,51% ; 65,97% ; 77,33% et 91% avec des G.C grossiers, respectivement, alors que la chute du module d'élasticité est de 55,28% ; 71,35% ; 92,19% ; 96,16% et 97,77% lorsque le sable naturel est substitué par G.C. fins aux taux indiqués, respectivement.

Uygunoglu[Uyg 10], ont reportés dans leur étude qu'avec une substitution partielle du sable naturel (dimension 0-4 mm) dans un mortier auto-plaçant par des G.C (dimension 1-4mm), par poids,engendrait une baisse du module d'élasticité dynamique de 47,4% avec un taux d'incorporation de 50% en G.C.

Turki[Tur 09-a], ont noté une réduction du module d'élasticité statique et dynamique dans des mortiers contenant des G.C (1-4mm, dimension maximale de 3,15 mm) en substitution du sable (dimension 0-2mm) par volume. La baisse du module d'élasticité statique était de l'ordre de 60%, 80% et 90,67% pour des taux d'incorporation de 10%, 20% et 50% respectivement. Alors que pour le module d'élasticité dynamique la chute était de l'ordre de 13,21%, 56,49% et 67,44% respectivement.

Cas des bétons

Niveau de substitution de15%

Skripkiunas[Skr 07], ont montré une baisse du module d'élasticité statique et dynamique dans le béton de l'ordre de 10,82% et 2,47%, respectivement, lorsque le sable naturel est substitué par des G.C de dimensions comprises entre 0-1mm, par poids.

Holmes [Hol 14], ont substitué partiellement le sable naturel par des G.C de dimensions comprises entre 0,425-4,75 mm à un taux de 7,5%. Les auteurs ont constaté une chute du module d'élasticité du béton.

Onuaguluchi[Onu 14], ont substitué partiellement les agrégats fins naturels dans des bétons par des G.C (dimensions de 2,3mm) à des taux de substitution de 5% ; 10% et 15%, en volume. Les résultats ont montré une chute du module d'élasticité de 14,51% ; 20,21% et 29,27% pour les taux sus indiqués, respectivement.

Les travaux de Son [Son 10], permettent de justifier cette tendance même avec des taux d'incorporation faibles. En effet, les auteurs ont étudié des B.I.G.C avec des résistances a 28 jours de 24 Mpa et 28 MPa

lorsque les taux de substitution est de 0,5% et 1% du poids total des agrégats (fraction volumique de 2,7 et 5,4) pour des dimensions maximales de 0,6 et 1,0 mm des G.C. Leurs résultats montrent qu'en incorporant 0,5-1,0 % de G.C dans des bétons de résistance 24 MPa et 28 MPa, une baisse du module d'élasticité de 10-15% est enregistrée(cf. figure 1-11).

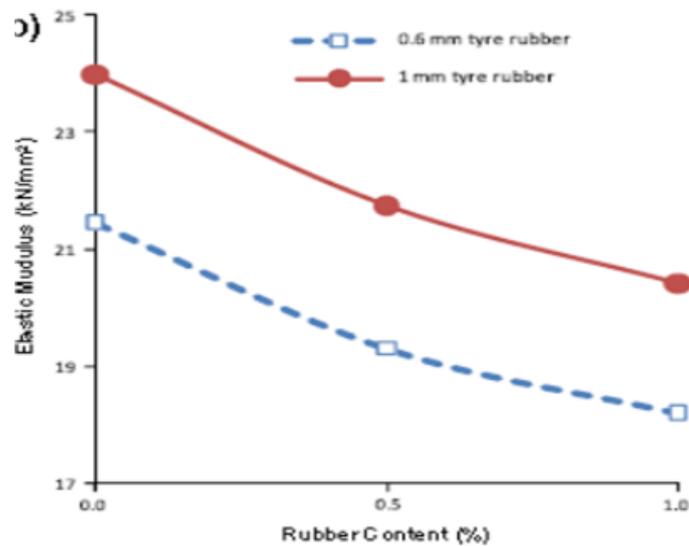


Figure 1.11 Résultats des essais sur le module d'élasticité[Son 10]

Ganjian[Gan 09], ont étudiés les performances des bétons incorporant des granulats de caoutchouc (B.I.G.C) lorsque les granulats naturels sont substitués par des G.C. issus du broyage des pneus usagés. Les G.C ont une granulométrie similaire à celle des agrégats naturels substitués (dimension maximale de 25 mm). Les quantités des granulats grossiers naturels ont été substitués par des G.C. a des taux fixés à 5% ; 7,5% et 10% par rapport au poids des granulats naturels. Les granulats de caoutchouc grossiers et fins ont substitué les agrégats grossiers naturels et le ciment, respectivement. Les auteurs ont montrés dans la figure 1-14 une réduction de 30% di module d'élasticité lorsque le taux d'incorporation des G.C était de 10%(cf. figure 1-12).

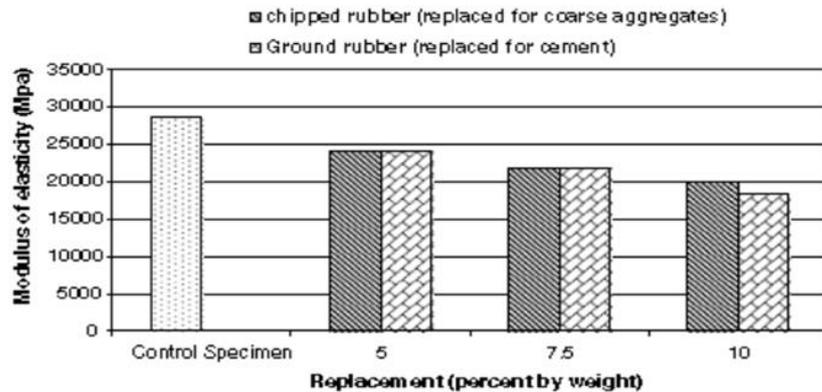


Figure 1.12 Résultats obtenus pour le module d'élasticité en fonction du taux de substitution [Gan 09]

Niveau de substitution de 25%

Gesoglu[Ges 14], ont substitué partiellement les agrégats naturels fins dans des bétons par des G.C (dimensions de 2mm ou 4mm) à des taux de substitution de 10% et 20%, par volume des agrégats. Les résultats ont montré que plus les taux de substitution des G.C augmentent et plus la chute du module d'élasticité est importante.

Al-Tayeb[Tay13], ont noté une réduction du module d'élasticité des bétons de l'ordre de 8,32% ; 15,1% et 22,2% pour des taux de substitution de sable de 5% ; 10% et 20% en G.C de dimensions 1mm, respectivement.

Niveau de substitution de 33,3%

Azmi[Azm 08], ont substitué partiellement le sable naturel dans des bétons par des G.C (dimensions de 2-2,35mm) à des taux de substitution de 10% ; 15% ; 20% et 30%, par volume. Les résultats ont montré une chute du module d'élasticité de 32,4% ; 41,19% et 45,93% pour des taux de substitution de 10% ; 15% ; 20% et 30% respectivement.

Sukontasukkul[Suk 12], ont montré une chute du module d'élasticité des bétons lorsque le sable naturel est substitué par des G.C à des taux de 10% ; 20% et 30%, en volume. Deux catégories de G.C ont été utilisées : des G.C grossiers (passant au tamis 6) et des G.C fins (passant au tamis 26).

Les auteurs ayant comparé l'effet de ces granulats larges avec d'autres granulats plus petits ont constaté que les échantillons de béton

contenant des G.C grossiers ont montré un module d'élasticité plus important que ceux incorporant des G.C fins. La réduction du module d'élasticité est de l'ordre de 17,95% ; 33,33% et 53,85% pour des taux de substitution de 10% ; 20% et 30%(cf. figure 1-13).

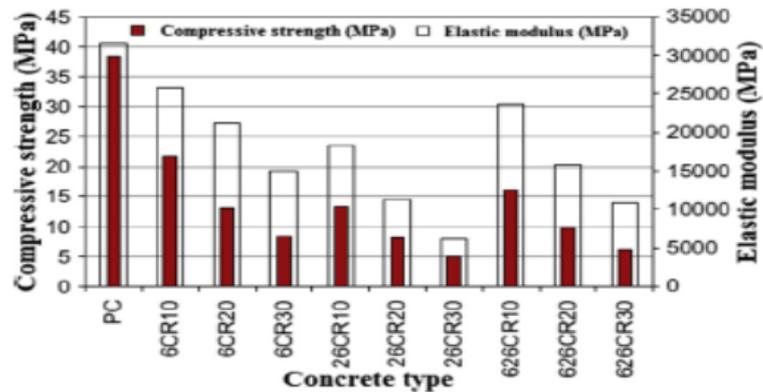


Figure 1.13 Effet des G.C sur le module d'élasticité et la résistance en compression [Suk 12]

Bignozzi[Big 06], ont reporté dans leur étude une réduction du module d'élasticité dynamique des bétons auto-plaçant lorsque le sable naturel est substitué par des G.C (dimensions de 0,5-2mm) utilisées à 55% et des G.C (dimensions de 0,5-0,7mm) utilisées à 45%, par volume. La réduction du module d'élasticité dynamique est de 19,39% et 27,57% pour les taux sus indiqués, respectivement.

Niveau de substitution de 50%

Valadares[Val 12], quant à eux ont notés une réduction du module d'élasticité de 15,76% ; 28,57% et 38,13% pour des taux de substitution de 12,5% ; 24,15% et 35,77% en G.C (dimension 0-4mm) lorsqu'ils sont utilisés en substitution du sable, par volume

Güneysi[Gun 04], ont constaté une réduction du module d'élasticité de 1,71% ; 12,39%, 16,92% ; 36,29% ; 61,32% et 81,57% pour des taux de substitution de 2,5% ; 5% ; 10% ; 15% ; 25% et 50% avec un rapport eau/ciment de 0,6 et lorsque le sable (dimension maximale de 4mm) et du gravier (dimensions 10-40mm) sont substitués partiellement en volume par des G.C. Ils ont notés aussi que les modules d'élasticité étaient plus grands en remplaçant une partie du ciment par de la fumée de silice.

L'effet préjudiciable des G.C sur le module d'élasticité a été mis en valeur par Cuong [Cuo 10] dont les résultats sont illustrés par la figure ci-dessous(cf. figure 1-14). Les résultats montrent une baisse de 41% et

51% du module d'élasticité lorsque le taux de substitution était de 20% et 40% respectivement du volume granulaire de sable est remplacé par des G.C(cf. Tableau 1-1).

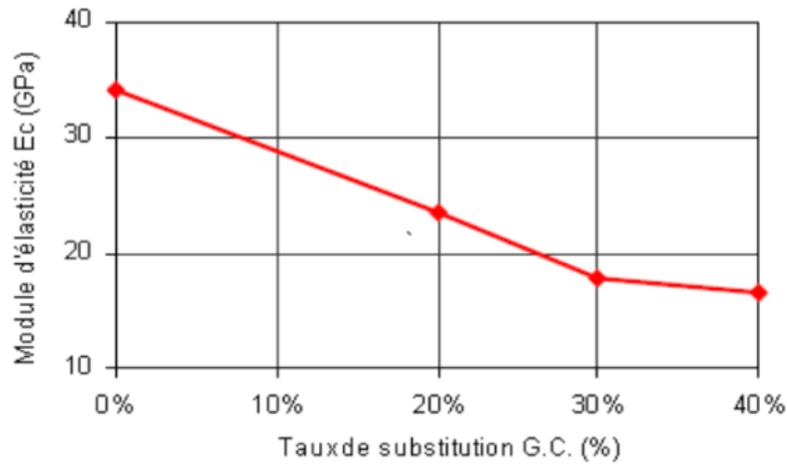


Figure 1.14 Influence du dosage en G.C sur le module d'élasticité à 28 jours [Cuo 10]

Béton	B0GC	B20GC	B30GC	B40GC
Module d'élasticité (GPa)	34,1	23,5	17,8	16,7
Dispersion (%)	2,4	5,6	4,7	3,1

Tableau 1-1 Module d'élasticité à 28 jours en fonction du dosage en G.C. [Cuo 10]

Niveau de substitution de 100%

Khaloo [Kha 08], ont reportés une réduction dans le module d'élasticité tangentiel lorsque le sable naturel de dimension maximale 4,75 mm a été substitué par des G.C de dimensions similaires. Les réductions observées sont de l'ordre de 84,8% ; 95,52% ; 98,51% et 99,46%, respectueusement.

1.3.4 Traitement des granulats de caoutchouc

Nombreux sont les chercheurs qui ont explorés le traitement des G.C pour améliorer l'adhérence entre le G.C et la pâte de ciment. Ils s'accordent à penser que la chute de résistance des B.I.G.C est essentiellement due à ce défaut d'adhérence. Les premières fissures apparaissent dans la zone de transition entre le G.C et la pâte de ciment.

La coalescence de ces microfissures entraîne des macro-fissures qui causent la rupture du béton. Guoqiang[Guo 04], ont montré que l'adhérence a été améliorée en traitant la surface des G.C à la solution alcaline(NaOH). En effet, L'immersion des G.C dans solution alcaline pendant 20 minutes entraînait une amélioration de la résistance à l'abrasion, à la flexion et l'énergie de fracture. Additionnement, ce prétraitement réduisait significativement la chute de résistance en compression. Une approche alternative avec l'utilisation d'acides carboxyliques à améliorer les propriétés adhésives de certains adjuvants qui, à leur tour renforcent les caractéristiques de liaison entre la pâte de ciment durcie et la surface des G.C en comblant les vides Lee [Lee 98]. D'autres auteurs ont notés que la chute du module d'élasticité était moindre en traitant le G.C par de l'acide sulfurique (H₂SO₄) (Colom[Col 06]). Pré-enduire le G.C avec la pâte de ciment avant de le mélanger au béton entraînait une augmentation de la résistance en compression entre 30% et 50% avec une légère amélioration de la résistance en flexion Al-Mashhadani[Al- 01].

1.3.5 Capacité de déformation

Jingfu[Jin 08], ont signalé que les échantillons de mortier et de béton caoutchoutés ont présentés une rupture ductile et une déformation significative avant fracture. Les déformations ultimes des échantillons de mortiers et de bétons caoutchoutés augmentent de plus de 2 à 4 fois celle des échantillons des bétons témoins.

Turatsinze[Tur 08], ont noté que la capacité de déformation d'un béton auto-plaçant incorporant des G.C. utilisés en substitution partiel des graviers était améliorée avant localisation des macros fissures. Par conséquent lorsque la résistance à la fissuration due à une déformation imposée est une priorité, l'incorporation des G.C s'avère être la solution la plus adaptée pour améliorer la durabilité. Cette capacité de déformation est

une caractéristique qui peut répondre à des applications particulières(cf. figure 1-15).

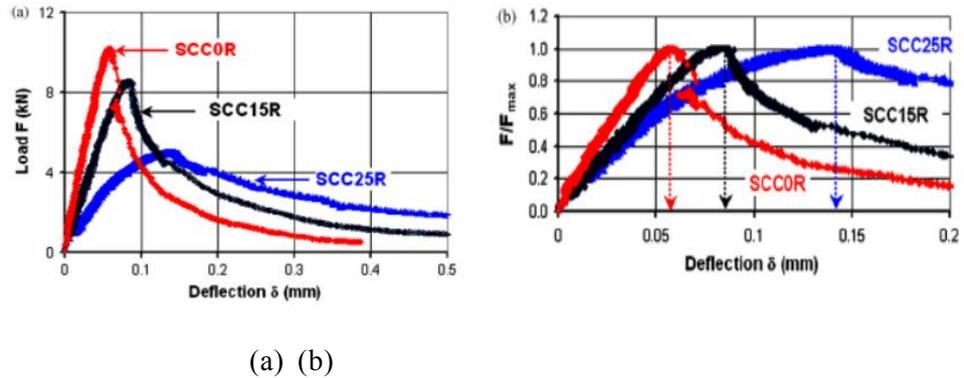
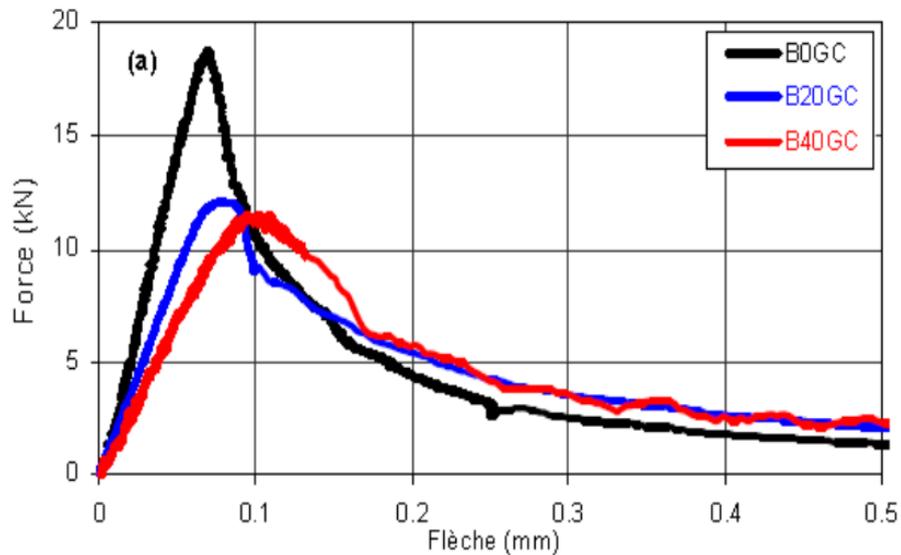


Figure 1.15 Courbes force- flèche et charge flexion [Tur 08]

- a. Courbes force-flèche en flexion- Effet des G.C sur la capacité de chargement
- b. Courbes charge-flexion- Effet des G.C sur la capacité de déformation

Cuong [Cuo 10], dans sa thèse a évalué la capacité portante ainsi que la flèche maximale et a déduit que la cette flèche maximale était un indicateur privilégié de la capacité de déformation du matériau (cf. figure 1-16). Ce constat a été fait par Turatsinze[Tur 05].



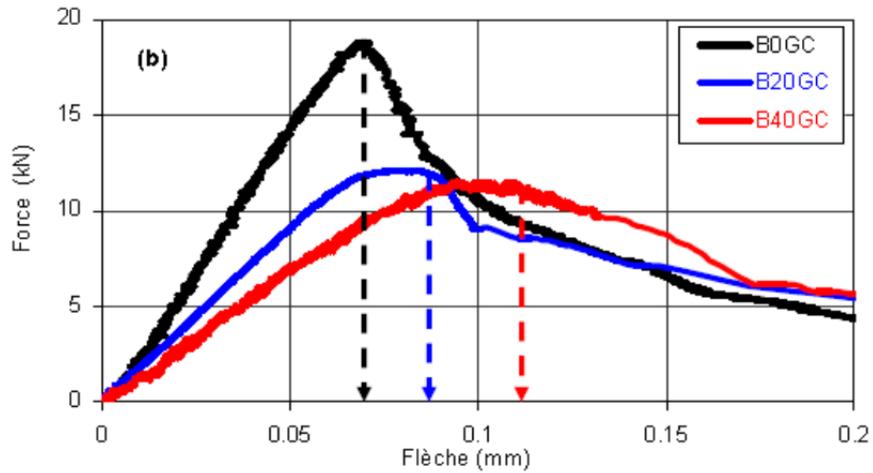
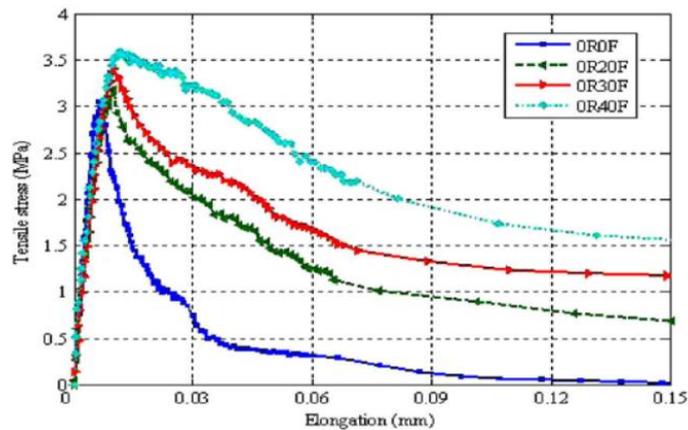
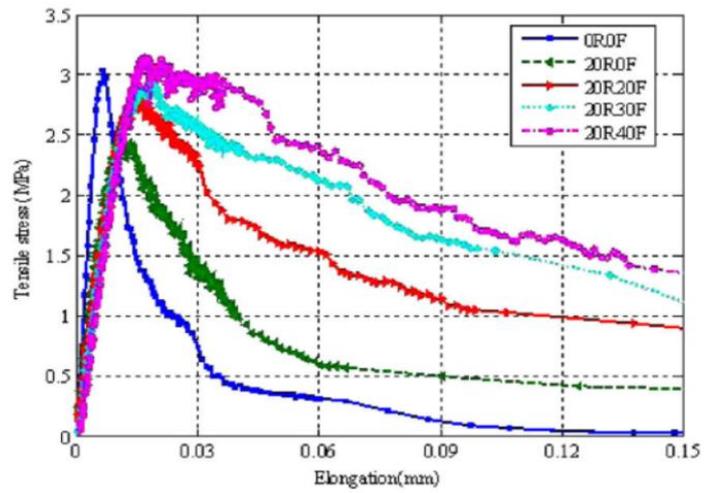


Figure 1.16 Courbe « Force-Fleche », influence du taux de substitution en G.C [Cuo 10]

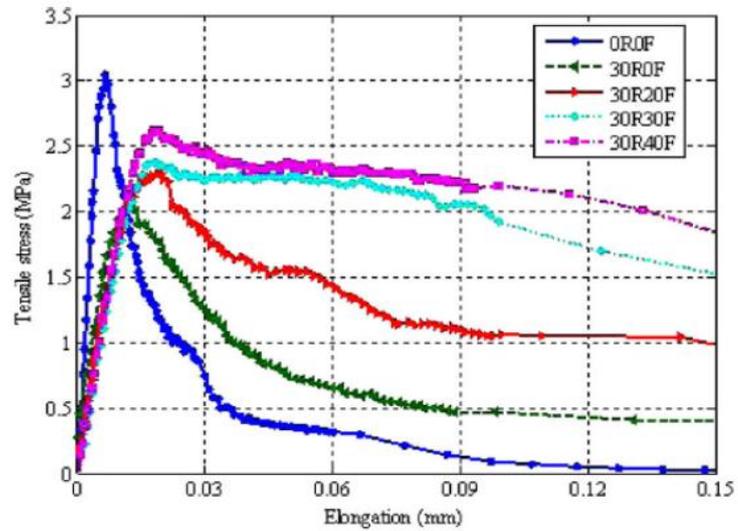
Des résultats similaires ont été obtenus par Nguyen [Ngu 10] qui ont montré que la capacité de déformation avant localisation de la macrofissuration est améliorée avec l'adjonction des G.C. Les agrégats peuvent être considérés selon les auteurs comme des zones faibles. Lorsque la microfissuration agit dans l'interface avec la pâte de ciment, la concentration de contrainte est réduite induisant une relaxation des contraintes : un mécanisme retardant la propagation des fissures (cf. figure 1-17).



(a)



(b)



(c)

Figure1.17 Courbe traction déplacement [Ngu 10]

- a. Béton de référence.
- b. Mélange pour un béton contenant 20% en G.C.
- c. Mélange pour un béton contenant 30% en G.C.

1.3.6 Retrait

Le phénomène de retrait dans le cas des B.I.G.C a été étudié par plusieurs chercheurs. Les résultats ont montré que le retrait dans les B.I.G.C était plus important que celui d'un béton de référence. Le retrait qui correspond à des variations dimensionnelles avant, pendant et après la prise des mortiers traduit la relation entre la rigidité des granulats et l'amplitude des variations dimensionnelles (cf. figure 1-18) (Turatsinze[Tur 05]).

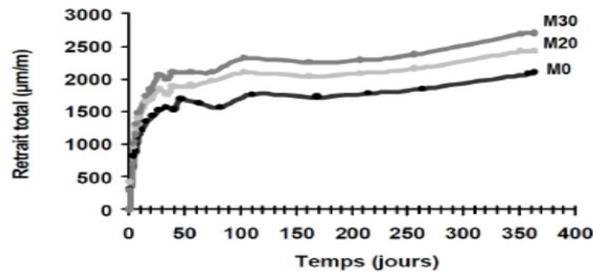
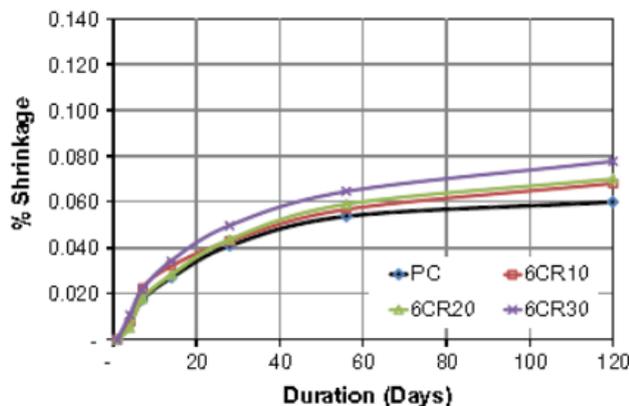
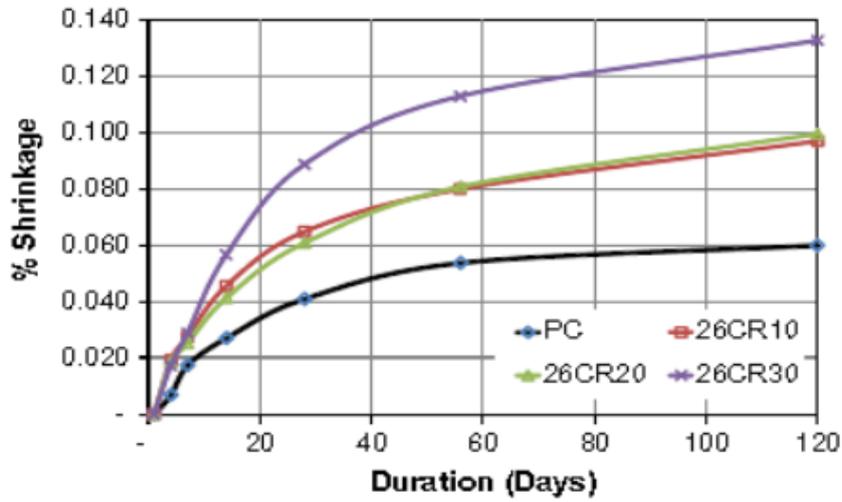


Figure 1.18 Evolution du retrait total des mortiers en fonction des taux d'incorporation des G.C [Tur 05].

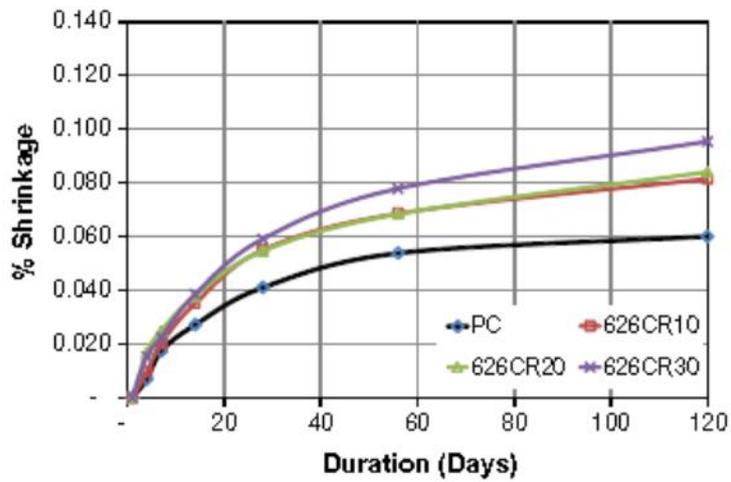
Sukontasukkul[Suk 12], ont évalué l'influence de la présence de G.C sur la cinétique de retrait. La présence des G.C entraine une augmentation du retrait. Plus le dosage en G.C est important, plus le retrait est élevé. Compte tenu de la nature flexible donc moins rigide des G.C, les contraintes internes sont réduites ce qui engendre un rétrécissement plus important (cf. figure 1-19).



(a)



(b)



(c)

Figure 1.19 Effet du retrait sur les différents mélanges adoptés[Suk 12]
a. Retrait pour un béton préparé par des G.C passant au tamis N°06.
b. Retrait pour un béton préparé par des G.C passant au tamis N°26.
c. Retrait pour un béton préparé par des G.C passant au tamis N°06 et N°26.

Bravo [Brav 12], ont montré que le retrait augmente en substituant partiellement le sable naturel dans le béton par des G.C de dimensions

similaires lorsque le taux de substitution est de 5% ; 10% et 15%, en volume. Le retrait a été évalué à 43% pour un taux de 15%.

A partir de l'analyse de la littérature, on peut noter que l'incorporation des G.C dans les mélanges augmente le retrait tel que rapporté par plusieurs chercheurs. Le retrait le plus important dans les mortiers ou les bétons est essentiellement dû à la faible résistance en compression et du module d'élasticité.

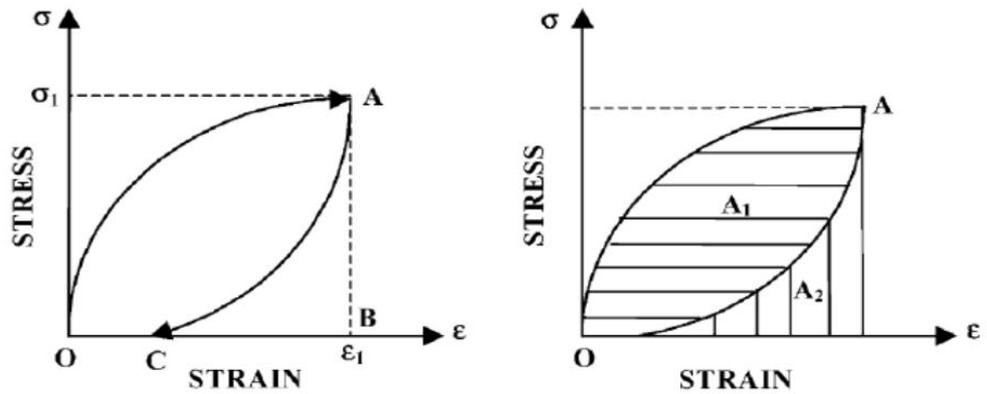
1.3.7 Ténacité et Fragilité

Sous une charge extérieure, les premières microfissures apparaissent dans la zone de transition entre les G.C et la pâte de ciment, une zone dont la résistance est beaucoup plus faible que celle des autres phases solides du composite. De la coalescence de ces microfissures, résulte une microfissure qui cause la rupture du béton. Lors de la microfissuration, une énergie est stockée dans le béton avant d'être libérée au moment de la rupture. Un essai de flexion trois points asservi à la vitesse de déplacement (flèche), sur une éprouvette entaillée, est nécessaire pour quantifier cette énergie de fracture.

Sukontasukkul[Suk 06], ont substitués le sable et les gros agrégats par des G.C à des taux de 10% et 20%. Les auteurs ont montrés que le B.I.G.C à une ténacité supérieure à celle du béton de référence et celle du béton incorporant 20% de G.C.

Najim[Naj 12], ont substitués partiellement le sable dans un béton autoplaçant par des G.C de dimensions comprises 2 et 6 mm a des taux de 0%, 5% , 10% et 15% par rapport au poids. Ils ont montrés une amélioration significative des indices de ténacité (I5, I10 et I20) pour l'ensemble des substitutions. Les augmentations de I10 étaient de l'ordre 53,94%, 16,94% et 33,64% pour les taux d'incorporation de 5%, 10% et 15% respectivement alors que l'augmentation de I20 était de l'ordre de 117,84%, 53,25% et 102,58% respectivement. Toutefois la plus grande valeur de la ténacité était obtenue pour un taux de substitution de 5%.

Cuong[Cuo 10], a évalué l'indice de fragilité (Brittleness Index-BI) du B.I.G.C en se basant sur la définition du BI par [Erk 95] et [Wu 98] (cf. figure 1-20). L'énergie plastique (non restituée) et l'énergie restituée sont obtenues pendant la rupture d'une éprouvette en compression comme illustré par les aires A1 et A2. Le BI est identifié au rapport A2/A1.



BC : Déformation élastique Indice de fragilité (BI)= A_2/A_1
 CO : Déformation plastique

Figure 1.20 Evaluation de l'indice de fragilité (BI), [Erk 95],[Wu 98]

Raj [Raj 11], ont noté un faible indice de fragilité des bétons auto-plaçant lorsque le sable (dimension maximale de 4,75 mm) est substitué par des G.C avec des taux d'incorporation de 5%, 10%,15% et 20% en volume.

Cuong [Cuo 12], ont constaté que l'incorporation dans le béton des G.C de dimension comprises entre 0-4 mm, en substitution du sable à des taux de 20%,30% et 40% en volume entraînait une réduction de la fragilité avec un accroissement du taux des granulats (cf. figure 1-21).

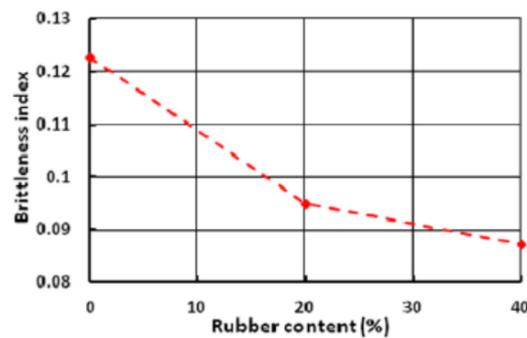


Figure 1.21 Effet des G.C sur l'indice de fragilité [Cuo 12]

Liu [Liu 13], Balaha [Bal 07], Taha [Tah 08], ont substitué du sable naturel par des G.C. Les auteurs ont constaté que la ténacité augmentait avec l'adjonction des G.C.

1.3.8 Comportement a la fatigue

Le comportement à la fatigue dans les bétons est étroitement lié à la durée de vie du matériau en d'autre terme jusqu'à sa rupture. Le but étant d'établir les diagrammes de « Stress-Number of cycles » (S-N) nommés encore diagrammes de Wöhler. Le dispositif expérimental de la fatigue est réalisé par un essai de flexion trois-points.

Cuong [Cuo 10] a étudié le phénomène de fatigue pour un béton de référence B0GC et un béton incorporant 40% de G.C (B40GC) en substitution du sable tout en traçant le diagramme de Wöhler (cf. figure 1-22). Une sollicitation cyclique a été appliquée et en fonction des taux de chargement (65%, 80% et 90%) l'auteur a analysé la cinétique de la fissuration (cf. Tableau 1-2).

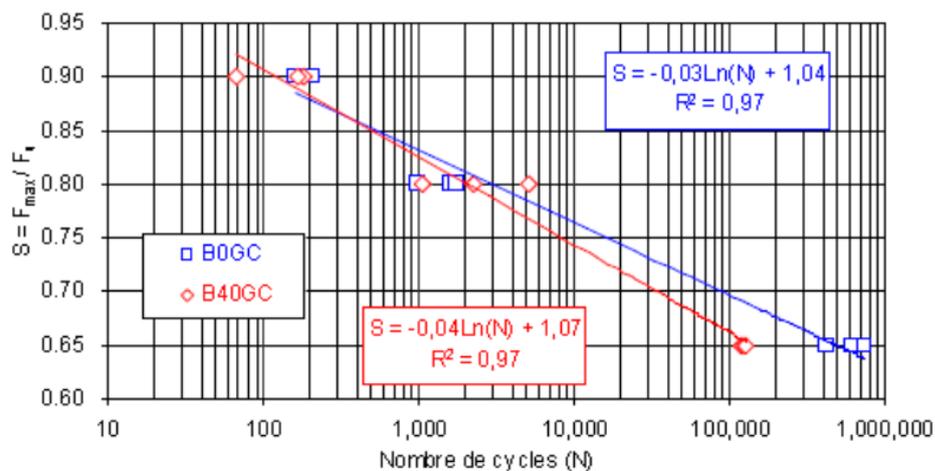


Figure 1.22 Influence de la présence de G.C sur la durée de vie-Diagramme de Wöhler [Cuo 12]

No	S = F _{max} / F _u	Nombre de cycles à la rupture (N)	
		B0GC	B40GC
1	0,90	180	67
2	0,90	163	185
3	0,90	210	165
4	0,80	995	2.305
5	0,80	1.600	5.103
6	0,80	1.788	1.055
7	0,65	749.174	120.011
8	0,65	620.122	122.532
9	0,65	426.209	127.005

Tableau 1.2 Influence de la présence de G.C sur la durée de vie-Diagramme de Wöhler [Cuo 10].

Pour des taux de charges 'S' de 65%, 80% et 90% les nombres moyens de cycles à la rupture du B40GC par rapport à B0GC sont de l'ordre de 0,2 ; 1,93 et 0,75.

Hernandez [Her 07], ont étudié les limites d'endurance des B.I.G.C. Une comparaison a été faite entre un béton de référence et un béton incorporant 3,5% du volume des G.C. Se basant sur la théorie de Westergaard, les auteurs ont calculés les épaisseurs de la couche de base des chaussées rigides en béton de référence et en béton incorporant 3,5% du volume des G.C en tenant compte d'un nombre de 106 cycles sous la charge d'un essieu de 13 tonnes. Les épaisseurs obtenues sont de 19,9 cm et 21,1 cm pour un béton de référence et un béton incorporant 3,5% de G.C. Sur la base de ces résultats, les auteurs ont préconisés l'utilisation des B.I.G.C pour une application de chaussées rigides.

1.3.9 Effet de la température, résistance au feu et isolation thermique

Parmi les nombreuses applications des G.C, on peut citer celui des chaussées pour lesquelles ces dernières sont soumises à des conditions climatiques.

Cuong [Cuo 10] dans sa thèse a étudié les effets d'une température élevée sur un matériau constitué deux phases. L'auteur a considéré deux

niveaux de température celle de 40° et celle de 70° pouvant simuler des températures réelles dans les couches de roulement exposées au rayonnement solaire. Les résultats ont montré que si la température au sein de l'éprouvette diminue de façon quasi-linéaire en fonction du temps, elle reste uniforme dans l'épaisseur du matériau.

Les résistances en compression et en traction par fendage ainsi que le module d'élasticité sont testées en fonction de la température d'étuvages telles que représentées ci-dessous (cf. figure 1-23,1-24,1-25).

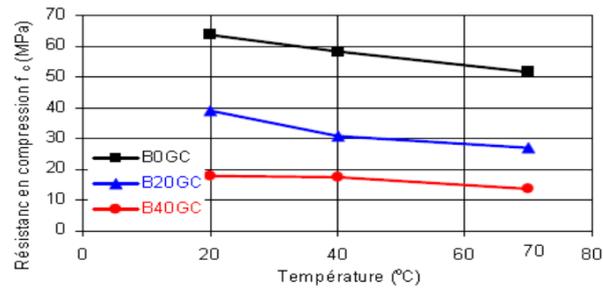


Figure 1.23 Effet de la température sur la résistance en compression [Cuo 10]

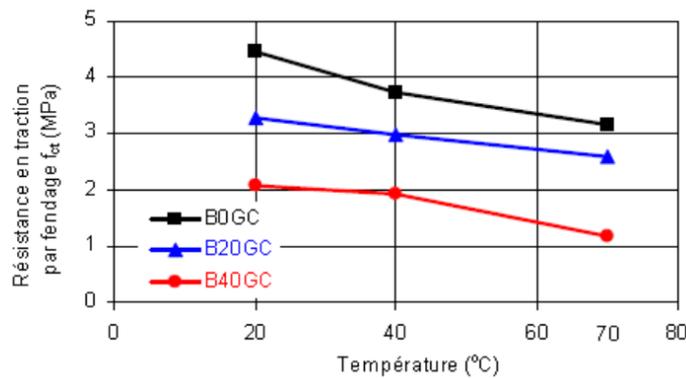


Figure 1.24 Effet de la température sur la résistance en traction [Cuo 10]

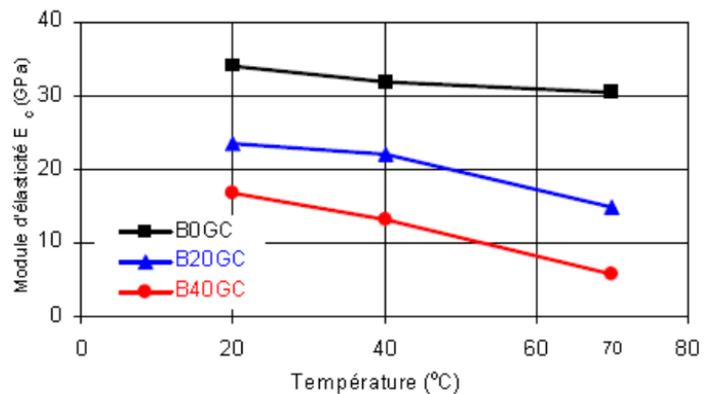


Figure 1.25 Effet de la température sur le module d'élasticité [Cuo 10]

La résistance en compression du béton de référence et des B.I.G.C avec 20% et 30% de G.C (cf. figure 1-23) une chute avec l'augmentation de la température.

La résistance en traction par fendage, (cf. figure 1-24) montre un comportement similaire. De façon analogue, le module d'élasticité (cf. figure 1-25) montre une chute plus marquée. Comme l'a montré Gaweska, [Gaw 04], Cuong s'accorde avec Gaweska sur la chute de ces trois caractéristiques qui est essentiellement due à la disparition de l'eau libre.

Topçu [Top 07], ont reportés une réduction de la contrainte résiduelle en compression après une exposition au feu de 150°, 300° et 400°C pendant 3 heures sur des mortiers incorporant des G.C (dimension 1-4 mm) en remplacement de sable à des taux de 10% ; 20% et 30% en volume. La contrainte résiduelle en compression diminue avec l'augmentation du taux d'incorporation.

Guo [Guo 14], ont reportés une réduction de la contrainte résiduelle en compression après et du module d'élasticité pour les B.I.G.C incorporant des G.C (dimension 0,85-1,4mm) en substitution du sable naturel à des taux de 4% ; 8% ; 14% et 16%, en volume, après une exposition au feu à 200, 400 et 600° pendant 2 heures. La contrainte résiduelle en compression diminue avec l'augmentation du taux d'incorporation. D'un autre côté, les G.C réduisent les micro-fissurations par des températures élevées. Le nombre de micro-fissurations décroît avec une augmentation des G.C. Les G.C ont aidé à atténuer l'apparition des fissures à des températures élevées. Cela peut être du à cause de la fusion du G.C à 170°C, ce qui permet à l'eau de s'évaporer, réduisant ainsi considérablement la pression interstitielle causée par l'eau évaporée, une des raisons principales à la fissuration du béton à haute température.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons passé en revue la problématique des pneumatiques usagés non réutilisables, ainsi que leur valorisation sous forme de granulats dans les matériaux à base cimentaire.

L'incorporation des granulats caoutchouc dans les matériaux cimentaires a fait l'objet de beaucoup d'études dans la littérature. Les auteurs ont étudié l'influence de l'incorporation des granulats caoutchouc sur les propriétés mécaniques et hydriques lorsqu'ils sont utilisés en substitution volumiques ou massiques de sable ou de gravier dans les mortiers, les bétons et les bétons autoplaçants.

Lorsque l'on se réfère aux données considérées à travers les différents documents cités dans ce chapitre, les résultats obtenus permettent d'affirmer que la présence des granulats caoutchouc confère au composite une baisse importante des résistances (résistance en compression et traction). Il apparaît très clairement que le simple recyclage de pneus sous forme de granulats dans les matériaux à base cimentaire est voué à l'échec et ceci compte tenu de l'impact très préjudiciable sur la résistance à la compression et sur le module d'élasticité. En contrepartie, cette incorporation confère un gain en capacité de déformation avant la localisation de la macro-fissuration.

A cet effet, et compte tenu du bénéfice de l'adjonction des granulats caoutchouc qui peut être une solution contre la fissuration nous nous sommes rendu compte que cette adjonction aux bétons peut constituer une solution pour concevoir un composite cimentaire offrant de meilleures performances particulièrement lorsque dans les nombreuses applications ou la résistance à la fissuration due aux déformations imposées est aussi un critère pertinent de performance. L'incorporation des G.C est une solution pour améliorer la durabilité. L'étude revêt ainsi un intérêt en terme de valorisation matière d'un sous-produit industriel en fin de vie et encombrant. C'est pour cette raison que les recherches entreprises ont mis en avant, l'identification de la valeur ajoutée par l'adjonction de G.C. et les applications rendues possibles par les nouvelles propriétés des bétons et mortiers. Il s'agit donc d'une recherche des voies de valorisation.

CHAPITRE 2

Revue bibliographique sur la méthode des réseaux de neurones

2.1 Introduction

Les B.I.G.C sont des matériaux complexes, multi échelles, siège de phénomènes multi physiques et en forte interaction. La prédiction pertinente de leur comportement passe naturellement par une démarche statistique. La complexité de leur microstructure, à presque toutes les échelles, rend nécessaire l'utilisation d'approche non linéaires. Afin de surmonter ces difficultés, on exploite certains outils capables d'approcher la prédiction du comportement mécanique. Parmi ces outils, figurent la méthode des réseaux de neurones. Il peut donc être avantageux de mettre en œuvre des réseaux de neurones pour toute application nécessitant de trouver, par des méthodes statistiques, une relation non linéaire entre des données numériques. Cette approche peut être conditionnée par :

- Une première condition, nécessaire mais non suffisante : puisque les réseaux de neurones entrent dans le cadre des méthodes statistiques, il faut disposer d'échantillons de taille suffisamment grande, et bien représentatifs.
- Une fois que ces données ont été recueillies, il faut s'assurer de l'intérêt réel d'un modèle non linéaire pour l'application considérée. En effet, compte tenu de la complexité des liens qui existent entre les différents constituants des B.I.G.C et puisqu'il s'avère que l'efficacité du modèle linéaire est insuffisante, alors la conception d'un modèle pouvant prédire le comportement mécanique des B.I.G.C doit envisager la mise en œuvre de modèles non linéaires tels que les réseaux de neurones.
- Si l'on dispose de données expérimentales suffisamment nombreuses et représentatives, il est généralement avantageux d'utiliser des réseaux de neurones dans toute application mettant en jeu l'estimation d'une fonction de régression non linéaire possédant au moins trois variables. Si le nombre de variables est supérieur ou égal à 3, il est généralement avantageux d'utiliser des réseaux de neurones.

2.2 Revue bibliographique

Au cours des deux dernières décennies, nous avons pu constater un développement fulgurant des réseaux de neurones. Cet intérêt a démarré avec l'application réussie de cette technique puissante pour des problématiques très différentes, et dans des domaines aussi divers que le génie civil, la finance, la médecine, la géologie, la mécanique, la physique

ou encore la production industrielle ([Top 07], [Top 08a] , [Top 08b], [Yeh 07]).

Le succès croissant des réseaux de neurones sur la plupart des autres techniques statistiques peut s'attribuer à leur puissance, leur polyvalence et à leur simplicité d'utilisation. Les réseaux de neurones sont des techniques extrêmement sophistiquées de modélisation et de prédiction, en mesure de modéliser des relations entre des données ou des fonctions particulièrement complexes ([Sar 09a], [Sar 09b], [Bil 09], [Bin 13], [Uys12], [Ren02], [Özc 09]).

Dans l'utilisation des réseaux de neurones on collecte des données représentatives puis on fait appel aux algorithmes d'apprentissage, qui vont apprendre automatiquement la structure des données.

Les réseaux de neurones ont une remarquable faculté à donner un sens, extraire des règles et des tendances à partir de données compliquées. Ils peuvent s'utiliser pour extraire des modèles et détecter des tendances reposant sur des fonctions mathématiques compliquées qui sont trop difficiles, voire impossible, à modéliser à l'aide de techniques analytiques ou paramétriques traditionnelles. L'une des propriétés intéressantes des réseaux de neurones est qu'ils savent prédire des résultats avec précision.

Compte tenu de ces caractéristiques et de leur domaine d'application étendu, les réseaux de neurones sont particulièrement bien adaptés à l'application de problématiques concrètes dans notre domaine de recherche scientifique telle que la prédiction en génie civil.

Les origines historiques des réseaux de neurones remontent au début des années 40. L'idée de base est alors de simuler le fonctionnement d'un neurone biologique par des automates linéaires à seuils interconnectés. En 1943, McCulloch et Pitts[McC 43], réussissent à montrer que leurs modèles, composés d'automates à états finis, sont capables de calculer certaines fonctions logiques, ce qui fait naître l'idée d'ordinateur universel. Il faut attendre 1958 pour voir la naissance, grâce à Rosenblatt, d'une méthode analytique rigoureuse d'adaptation des poids au sein d'un modèle multicouches appelé perceptron [Ros62]. D'autres réseaux similaires appelés 'adelines' furent inventés à la même époque par l'automaticien Widrow.

Rosenblatt a démontré la convergence d'un algorithme itératif d'adaptation des poids pour les perceptrons monocouche. Le perceptron était en mesure d'apprendre n'importe quelle fonction logique à partir d'expériences grâce à la modification des poids synaptiques. Ces résultats n'ont pas manqué à l'époque de susciter l'enthousiasme et de nourrir de grandes ambitions.

Quelques chercheurs qui ont utilisés les réseaux de neurones ont permis une reformulation plus riche par le biais de travaux centrés autour des mémoires associatives. Les recherches se sont alors plutôt orientées vers des considérations statistiques du traitement de l'information. Il faut attendre Hopfield, en 1982, pour déboucher sur une représentation symbolique usuelle à ce jour des réseaux de neurones [Hop 82] et d'apporter également à ce formalisme, le bouclage du réseau sur lui-même, permettant ainsi une représentation de la dynamique des systèmes. Le développement le plus significatif de ces vingt dernières années est incontestablement celui d'un algorithme d'apprentissage formalisé et convergent qui est la rétropropagation. Cette méthode, inventée par Werbos en 1974 [Wer74], fût redécouverte et mise à l'honneur par Rumelhart en 1985.

2.3 Neurone formel

Un neurone formel (artificiel) est une unité de traitement qui reçoit des données en entrée (variables d'entrée), sous la forme d'un vecteur, et produit une sortie réelle. Cette sortie est fonction des entrées et des poids de connections (cf. figure 2-1).

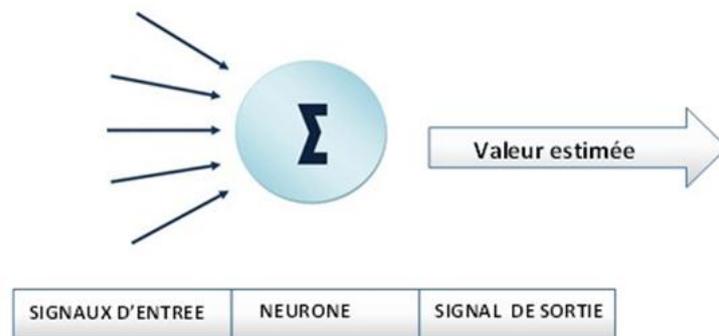


Figure 2.1 Neurone artificiel

2.4 Poids et connexions

Une connexion entre deux unités de traitement indique la possibilité d'une relation physique entre ces deux unités. La valeur numérique du poids

associé à une connexion entre ces deux unités reflète la force de la relation (cf. figure 2-2).

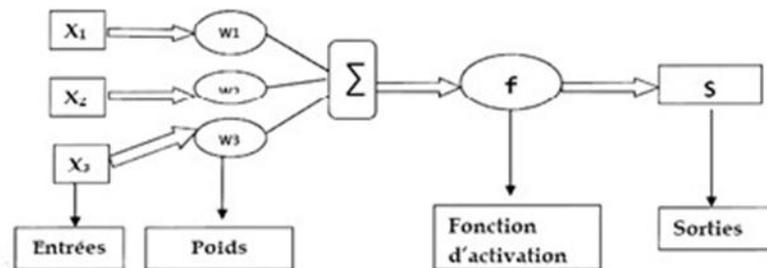


Figure 2.2 Poids dans un neurone formel

2.5 Présentation des réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit.

Toute structure hiérarchique de réseaux est évidemment un réseau. Les réseaux de neurones artificiels s'inspirent du fonctionnement du cerveau et du système nerveux ou, plus exactement, de la représentation que l'on se fait. Les réseaux de neurones artificiels sont basés sur un modèle mathématique simplifiée de neurone biologique [Hen 02].

2.6 Architecture des réseaux

Les réseaux se distinguent par leur architecture, leur niveau de complexité (le nombre de neurones, présence ou non de boucles de rétroaction dans le réseau), par le type des neurones (leurs fonctions de transition ou d'activation) et enfin par l'objectif visé : apprentissage supervisé ou non, optimisation, systèmes dynamiques.

L'organisation des réseaux de neurones sont généralement classés en deux grandes catégories d'architecture: les réseaux faiblement connectés à couches que l'on appelle des réseaux "feed-forward" ou réseaux directs et les réseaux fortement connectés que l'on appelle des réseaux "Feed-back" ou récurrents (cf. figure 2-3). Dans ces deux configurations, on retrouve

des connexions totales ou partielles entre les couches. La figure suivante présente les différentes topologies d'un réseau de neurones artificiels [Ibr04],[Hen 02].

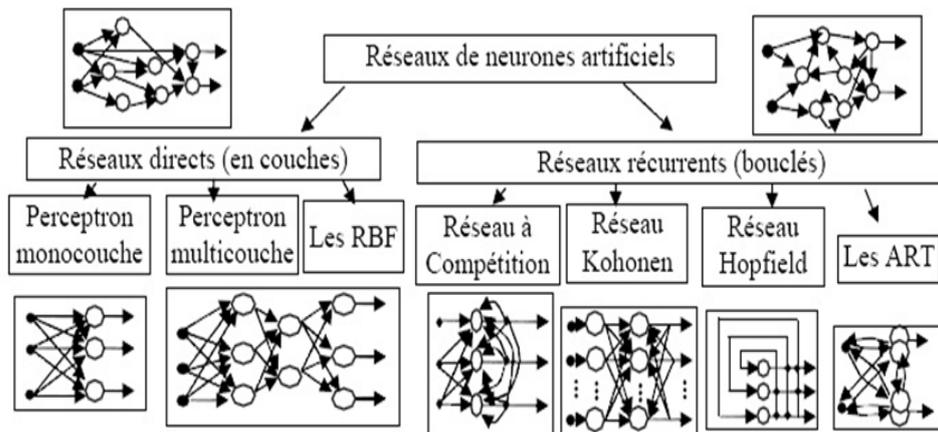


Figure 2.3 Topologie des réseaux de neurones artificiels.

2.6.1 Réseau en propagation « FEED-FORWARD »

Les réseaux de neurones les plus simples sont à flux dirigé vers l'avant (en anglais: Feed-forward) c'est à dire une structure dans laquelle les neurones ne sont connectés que dans un sens. Dans un réseau de neurones à flux dirigé vers l'avant, les connexions vont toujours des entrées vers les sorties, sans circuit ni boucle sans jamais revenir en arrière. Dans ce type de réseau neuronal, les neurones sont pratiquement toujours regroupés dans des couches. Une couche est un concept logique, pour lequel il est difficile de trouver de définition dans la littérature.

Trois types de couches distinctes sont souvent identifiés : la couche d'entrée, la couche de sortie et les couches cachées. La couche d'entrée reçoit toutes les valeurs d'entrée du réseau neuronal et la couche de sortie émet toutes les valeurs de sortie. Une couche cachée n'a pas de connexions vers l'extérieur et les valeurs d'entrée des neurones de cette couche sont toujours des valeurs de sortie d'autres neurones.

2.6.2 Réseau en propagation « FEED-BACK »

Appelés aussi "réseaux récurrents", ce sont des réseaux dans lesquels il y a retour en arrière de l'information, on trouve :

- Les réseaux à compétition

- Les cartes auto-organisatrices de Kohonen
- Les réseaux de Hopfield
- Les réseaux ('Adaptative Resonance Theory')

2.7 Perceptron monocouche

Développé par [Ros 58], c'est le premier réseau à avoir vu le jour. Le perceptron est un réseau très simple grâce à sa composition d'une couche d'entrée et d'une couche de sortie sans avoir de couche cachée. Sa structure est montrée dans la figure ci-dessous (cf. figure 2-4). Différents neurones sont arrangés dans une couche d'entrée et sont connectés avec chaque neurone de la couche de sortie par l'intermédiaire des poids [Ibr 04], [Bag 99].

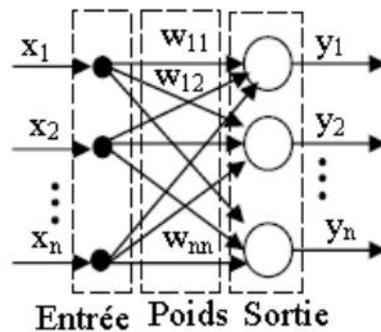


Figure 2.4 Perceptron monocouche

2.8 Perceptron multicouche (PMC)

Le PMC est une extension du perceptron monocouche qui dispose d'un nombre de couches quelconque et un nombre de neurones (ou d'entrées) par couche également quelconque. Les neurones y sont arrangés en couches successives: la première couche qui forme le vecteur des données d'entrée est appelée couche d'entrée tandis que la dernière couche qui produit les résultats est appelée couche de sortie. Toutes les autres couches qui se trouvent au milieu sont appelées couches cachées [Ibr 04]. La figure (cf. figure 2-5) illustre un exemple d'un réseau contenant une couche d'entrée, deux couches cachées et une couche de sortie. Les neurones sont reliés entre eux par des connexions pondérées. Les neurones de la couche d'entrée

sont connectés uniquement à la couche suivante tandis que les neurones des couches cachées ont la particularité d'être connecté à tous les neurones de la couche précédente et de la couche suivante, par contre il n'y a pas de connexions entre les neurones elle-même dans n'importe quelle couche [Kro 96].

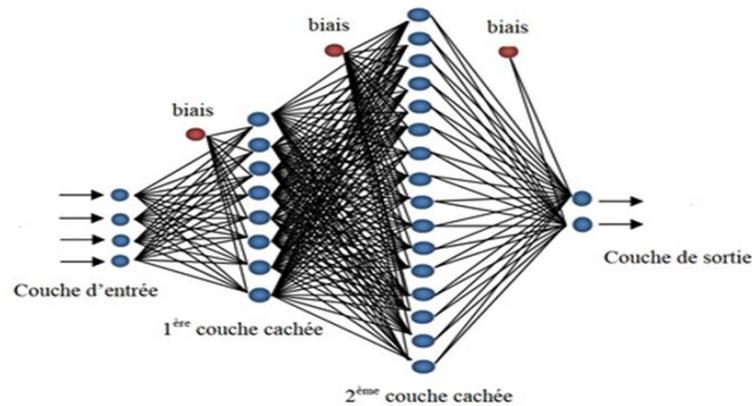
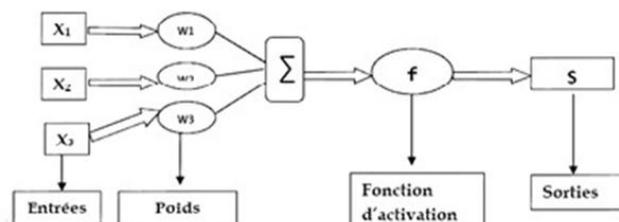


Figure 2.5 Perceptron multicouche

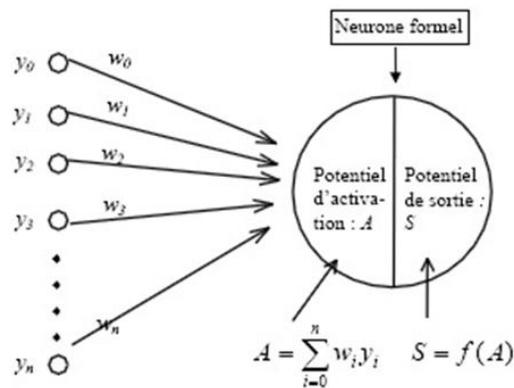
Le choix du nombre de couches cachées dépend généralement de la complexité du problème à résoudre, en théorie une seule couche cachée peut être suffisante pour résoudre un problème donné mais il se peut que le fait de disposer de plusieurs couches cachées permette de résoudre plus facilement un problème complexe.

2.9 Fonction d'activation

Outre les architectures de réseaux, les neurones d'un réseau possèdent des fonctions d'activation qui vont transformer les signaux émis par les neurones de la couche précédente à l'aide d'une fonction mathématique appelé fonction d'activation (cf. figure 2-6 a).



(a)



(b)

Figure 2.6 Illustration de la fonction d'activation :

a. schéma général.

b. Potentiel d'activation.

y_i , désigne les sorties des prédécesseurs du neurone

w_i , désigne les poids synaptiques

$S = f(A)$, désigne la fonction d'activation

Chaque neurone est constitué de deux parties: la fonction « Net » qui représente l'activité d'un neurone et la fonction d'activation. La fonction « Net » détermine comment les entrées du réseau ($x_i = 1 \leq i \leq n$) sont combinées à l'intérieur du neurone. Les paramètres reliant les entrées aux neurones sont appelés poids synaptiques. L'expression de la formule « net » (eq.2-1), s'écrit comme suit :

$$(net)_j = \sum_{i=1}^n w_{ij} * y_i + b \quad (2-1)$$

w_{ij}, y_i, b : désignent poids synaptiques, entrées de neurones et biais ou seuil d'activation du neurone respectivement.

Chaque neurone collecte les informations fournies par les neurones de la couche précédente avec lesquels il se trouve en relation et calcul alors son potentiel d'activation(cf. figure 2-6b). Celui-ci est ensuite transformé par une fonction pour déterminer l'impulsion envoyée aux neurones de la couche suivante (potentiel de sortie).

L'activation d'un neurone est donnée par la somme des potentiels de sortie de ses prédécesseurs, pondérée par les poids synaptiques. Ce potentiel d'activation est ensuite transformé par une fonction afin de déterminer le potentiel de sortie. Cette fonction est la fonction d'activation elle-même, et elle peut profondément influencer sur la performance du réseau.

Il est donc important de bien choisir le type de fonction d'activation des neurones dans un réseau de neurones.

Dans notre étude nous utiliserons la fonction de transfert non linéaire tangente hyperbolique Tansig qui s'exprime par (eq.2-2) :

$$Output = (e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x}) \quad (2-2)$$

On peut citer quelques fonctions d'activations de neurones telles que celles décrites dans le tableau 2-1 :

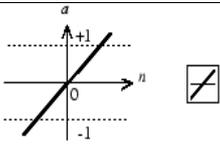
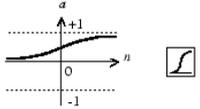
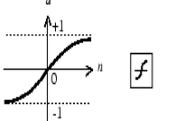
Fonction	Représentation	Equation	Intervalle de définition
Purelin		x	$(-\infty, +\infty)$
Sigmoidale logistiqu : logsig		$\frac{1}{1 + e^{-x}}$	$(0, 1)$
Tangente hyperbolique tansig		$\frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$	$] -1, +1 [$
Exponentielle		e^{-x}	$(0, +\infty)$
Sinus		$\sin(x)$	$[0, 1]$
Softmax		$\frac{\exp(x_i)}{\sum \exp(x_i)}$	$[0, 1]$
Gaussienne		$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2(\sigma^2)}\right]$	

Tableau 2.1 Modèles de fonctions d'activation

2.10 Apprentissage

L'apprentissage est une étape très importante du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié itérativement jusqu'à l'obtention du comportement désiré, et ceci par l'ajustement des poids et les biais des neurones à une source d'information bien définie [Oul 05]. Il existe plusieurs types de règles d'apprentissage qui peuvent être rassemblées en deux catégories qui sont l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé.

2.10.1 Apprentissage supervisé

Dans ce type d'apprentissage, on cherche à imposer au réseau un fonctionnement donné en forçant les sorties des réseaux à prendre des valeurs bien données. Après l'apprentissage, le réseau est testé en lui donnant seulement les valeurs d'entrée mais pas les sorties désirées, et en regardant si le résultat obtenu est proche du résultat désiré [Ibr04].

Le réseau utilise l'écart existant entre l'ensemble de réponses qu'il produit et l'ensemble de réponses attendues afin de corriger ses poids synaptiques et de rectifier ses erreurs. Les valeurs des poids de connexion sont créées tout d'abord au hasard et le système cherche par itérations successives à obtenir une modélisation des données. A chaque étape, une entrée est présentée au réseau, il propage ces valeurs vers les neurones de sortie. Cette sortie calculée est comparée avec la réponse attendue et le système modifie les poids en conséquence. Cette altération des connexions est obtenue par l'algorithme de rétropropagation du gradient d'erreur.

Ce calcul est chargé de rétropropager dans le réseau les erreurs constatées sur les sorties. En théorie, on ne peut jamais être sûr que cet algorithme finisse par déterminer un ensemble de poids convenable pour tous les couples d'entrées-sorties. En pratique, on ne construit pas un seul R.N.A, mais plusieurs modèles en jouant sur les paramètres de cet algorithme, et en cherchant à obtenir un modèle qui colle au mieux aux données.

2.10.2 Apprentissage non supervisé

Lors d'un apprentissage non supervisé, on ne fournit pas au réseau les sorties que l'on désire obtenir. On le laisse évoluer librement jusqu'à ce qu'il se stabilise, c'est-à-dire que le réseau doit trouver par lui-même les régularités sous-jacentes des données.

Cette seconde méthode, non supervisée, consiste à créer un réseau de type compétitif. Pour chaque vecteur d'entrée, le neurone dont le vecteur des poids synaptiques s'apparente le plus au vecteur d'entrée est choisi. Ce neurone gagnant va alors modifier ses poids synaptiques afin de ressembler encore davantage au vecteur d'entrée. Le neurone gagnant aura donc plus de chances à la prochaine présentation du même vecteur d'être activé.

2.11 Fonction Performance

La performance d'un modèle de réseau de neurones peut être évaluée en utilisant différentes expressions, notamment :

2.11.1 Coefficient de corrélation « R »

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \text{ (eq.2-3)}$$

Le coefficient de corrélation nous informe sur le degré d'association entre deux variables. Il s'exprime comme suit :

O_i, P_i désignent les valeurs observées et les valeurs prédites par le réseau RNA respectivement.

\bar{O}, \bar{P} désignent les valeurs moyennes observées et les valeurs prédites, respectivement par le réseau RNA.

N : désigne le nombre total des données

2.11.2 Erreur quadratique moyenne (Mean-Squared-Error) « MSE »

L'erreur quadratique moyenne s'exprime comme suit :

$$MSE = (\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2) / N \text{ (eq.2-4)}$$

O_i, P_i désignent les valeurs observées et les valeurs prédites par le réseau RNA respectivement

2.11.3 Erreur absolue moyenne (Mean-Absolute-Error) « MAE »

L'erreur absolue moyenne a pour expression :

$$\text{MAE} = (\sum_{i=1}^N (|O_i - P_i|)) / N \text{ (eq.2-5)}$$

O_i , P_i désignent les valeurs observées et les valeurs prédites, respectivement par le réseau RNA.

1

2

2.12 Valorisation de la méthode R.N.A dans le cas des Bétons incorporant les granulats de caoutchouc.

Dans la littérature certains auteurs confirment que l'utilisation des R.N.A dans les bétons incorporant les granulats de caoutchouc, s'avère être un outil de prédiction intéressant. On peut citer :

Topçu [Top 08-a], les auteurs ont étudiés l'impact de G.C utilisés en substitution du sable dans des mortiers en construisant un modèle de réseau R.N.A pour la prédiction de la résistance en compression. Les valeurs prédites calculées sont très proches des résultats expérimentaux. Les auteurs ont constatés que l'utilisation du RNA permettait de prédire correctement la résistance en compression sans avoir recours à des essais expérimentaux.

Dans d'autres travaux, Gesoglu [Ges 10], ont modélisés les propriétés mécaniques des B.I.G.C en construisant un modèle de RNA pour prédire la résistance en compression. Le modèle a été construit en utilisant huit variables en entrée et une sortie qui est la résistance en compression. Les résultats obtenus par les auteurs ont montrés l'aptitude du modèle de R.N.A à prédire correctement la résistance en compression. Les valeurs prédites étaient en accord avec les résultats expérimentaux avec des coefficients de corrélation dépassant 99%.

Abdollahzadeh [Abd 11] ont modélisé le comportement des B.I.G.C à l'aide d'un réseau de neurones artificiels. Les résultats obtenus par les auteurs ont été comparés à des données expérimentales. Les essais expérimentaux ont été réalisés avec 5%,10%,15% et 20% de G.C à des dimensions différentes : 0,2 ; 0,4 ; 0,6 et 0,8 mm. La confrontation des résultats obtenus expérimentalement et ceux obtenus par la méthode R.N.A, ont indiqués l'aptitude de la méthode R.N.A dans la prédiction de la

résistance en compression des bétons caoutchoutés avec un coefficient de détermination R^2 de 96,50% et une erreur quadratique moyenne (RMSE : RootMean Square Error) de 1,7%.

2.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les éléments essentiels qui permettent de comprendre pourquoi et comment, il est avantageux de mettre en œuvre des réseaux de neurones. Il est sans doute utile de rappeler que les réseaux de neurones sont utilisés comme outils statistiques, qui permettent d'ajuster des fonctions non linéaires très générales à des variables ; comme toute méthode statistique, l'utilisation de réseaux de neurones nécessite que l'on dispose de données suffisamment nombreuses et représentatives.

En utilisant le réseau de neurones artificiels (R.N.A) comme outil de prédiction de certaines caractéristiques mécaniques, il s'avère être très utile pour la modélisation et l'optimisation. Sa capacité d'adaptabilité, d'auto organisation et de résolution des problèmes non linéaires fait que l'utilisation de cet outil soit très intéressante pour la prédiction et très rapide d'utilisation ce qui peut permettre d'éviter les expériences menées au laboratoire, de réduire le temps des essais et les surcouts qui y sont liés. Cette revue bibliographique a permis de montrer l'intérêt des réseaux de neurones comme outil de modélisation du comportement mécanique.

CHAPITRE 3

Méthode des réseaux de neurones appliquée à la prédiction de la résistance en compression

3.1 Mise en œuvre du réseau de neurones pour la prédiction de la résistance en compression : Application du réseau de neurone au cas étudié

Pour enrichir les connaissances sur le comportement des bétons légers tels que les B.I.G.C, nous développerons un outil de prédiction de la résistance en compression. Les prédictions sont validées par confrontation aux valeurs expérimentales mesurées sur les B.I.G.C et issues de la littérature. Les valeurs expérimentales utilisées dans le cadre de notre thèse apportent une importante base de données nécessaire à la validation du modèle de prédiction fournissant ainsi un outil prédictif économique et rapide par rapport à l'expérimentation.

3.2 Introduction

Dans la prévision de la résistance en compression des bétons incorporant des granulats issus du broyage des pneus usés (B.I.G.C), un modèle de réseau de neurone artificiel (R.N.A) est conçu en utilisant des données qui sont extraites des travaux expérimentaux issus de la littérature et menés par différents auteurs ayant étudiés le comportement mécanique des B.I.G.C. Les données exploitées par les auteurs dans leurs mélanges, sont constituées de :

- Agrégats grossiers : Gravier (Coarse agrégats: CA),
- Agrégats fins : Sable (Fine Aggregate: FA),
- Granulats fins de caoutchouc (Crumb Rubber: CR),
- Granulats grossiers de caoutchouc (Tire Chips: TC),
- Superplastifiant,
- Eau
- Ciment

Dans notre étude, nous avons considéré trois entrées pour concevoir notre modèle de réseau RNA, justifiés ultérieurement et résumés comme suit : un rapport eau/ciment (W/C), le superplastifiant (SP) et un squelette granulaire (GS) comportant (agrégats grossiers : gravier, agrégats fins : sable, granulats fins de caoutchouc, granulats grossiers de caoutchouc). L'impact du rapport W/C, du superplastifiant et du squelette granulaire n'ont pas fait l'objet de recherches antérieurement à notre contribution. Notre contribution porte sur l'impact de ces différents paramètres dans la conception du modèle de réseau (R.N.A) pouvant prédire la résistance en compression. Pour des raisons pratiques, les

données expérimentales des auteurs (agrégats grossiers : gravier, agrégats fins : sable, granulats fins de caoutchouc, granulats grossiers de caoutchouc) sont regroupées sous forme d'une seule donnée : squelette granulaire, illustrés ultérieurement dans les tableaux présentés ultérieurement (cf. Tableau 3-1, 3-2, 3-3, 3-4 et 3-6).

Les travaux ainsi que les compositions des 112 mélanges extraits de la littérature, considérés par les auteurs et utilisées dans le cadre de notre étude sont résumées comme suit :

Gesoglu[Ges 10], ont étudiés la prédiction des propriétés mécaniques des B.I.G.C en utilisant deux méthodes : Le réseau de neurones et la programmation génétique. Les données utilisées pour le réseau de neurones sont issues d'une campagne expérimentale basée sur 70 mélanges de bétons. Le modèle du réseau de neurones a été construit en utilisant huit variables en entrée à savoir : eau, ciment, fumée de silice, superplastifiant, agrégats fins (sable), agrégats grossiers (graviers), les granulats grossiers et fins du caoutchouc, et une sortie : la résistance en compression. Les auteurs ont déduits que le réseau de neurones élaboré conduit à une bonne prédiction de la résistance en compression.

Le tableau suivant (cf. Tableau 3-1) compile les données bibliographiques pour les différents mélanges de bétons utilisés par les auteurs :

Données N°	W/C -	SP (kg/m ³)	GS (kg/m ³)	Ec (GPa)	Fc (MPa)
1	0,42	13,50	1743,02	46,00	81,00
2	0,44	13,50	1735,97	47,50	82,70
3	0,47	13,50	1728,92	47,00	84,00
4	0,60	5,25	1773,4	33,10	53,80
5	0,63	5,25	1767,9	35,00	56,80
6	0,67	5,25	1762,4	35,30	57,70
7	0,71	5,25	1756,9	36,00	60,30
8	0,40	13,50	1721,8	41,00	70,40
9	0,44	13,50	1707,9	43,00	75,40
10	0,47	13,50	1701	43,50	78,30
11	0,60	5,25	1744,8	32,50	47,00
12	0,63	5,25	1739,3	34,40	50,20
13	0,67	5,25	1734	34,00	52,50
14	0,71	5,25	1728,7	34,50	55,40
15	0,42	13,50	1686,8	40,00	67,80
16	0,44	13,50	1679,9	41,00	68,20
17	0,47	13,50	1673,1	38,50	68,00
18	0,60	5,25	1716,1	29,00	41,50
19	0,63	5,25	1710,8	30,00	43,10
20	0,71	5,25	1700,2	31,00	49,30
21	0,40	13,50	1637	29,50	50,70
22	0,42	13,50	1630,5	30,60	55,30
23	0,44	13,50	1659,9	31,20	56,30

24	0,47	13,50	1617,3	32,20	55,60
25	0,60	5,25	1658,9	26,00	31,80
26	0,67	5,25	1648,6	28,00	37,60
27	0,71	5,25	1643,6	27,60	41,30
28	0,40	13,50	1580,6	25,00	40,30
29	0,42	13,50	1574,3	25,40	44,50
30	0,44	13,50	1567,7	26,50	45,10
31	0,47	13,50	1561,5	27,50	46,40
32	0,63	5,25	1596,6	22,30	28,80
33	0,67	5,25	1591,7	23,50	31,40
34	0,71	5,25	1586,8	23,20	32,80
35	0,40	13,50	1467,6	17,50	26,40
36	0,42	13,50	1461,7	18,50	29,60
37	0,44	13,50	1455,8	19,30	30,50
38	0,47	13,50	1449,8	19,00	31,80
39	0,60	5,25	1487,1	12,80	16,20
40	0,67	5,25	1477,9	14,30	20,10
41	0,71	5,25	1473,3	14,00	21,20
42	0,40	13,50	1185	7,60	10,50
43	0,42	13,50	1180,2	8,00	11,20
44	0,44	13,50	1175,4	8,10	11,60
45	0,47	13,50	1170,8	8,00	11,70
46	0,60	5,25	1200,8	6,10	7,10
47	0,67	5,25	1193,4	6,90	8,10
48	0,71	5,25	1189,7	6,60	8,40
49	0,50	13,50	1721,88	47,50	85,77
50	0,75	5,25	1751,5	37,00	59,70
51	0,50	13,50	1694,1	44,50	79,10
52	0,50	13,50	1666,3	42,30	69,40
53	0,75	5,25	1694,9	31,40	51,30
54	0,50	13,50	1610,7	31,80	61,70
55	0,75	5,25	1638,3	27,90	41,20
56	0,50	13,50	1555,1	28,00	47,00
57	0,75	5,25	1581,8	22,40	34,20
58	0,50	13,50	1443,9	20,00	31,80
59	0,75	5,25	1468,7	14,70	23,10
60	0,75	5,25	1186,0	6,50	8,60
61	0,40	13,50	1750,02	45,90	75,80
62	0,42	13,50	1714,8	42,00	72,50
63	0,40	13,50	1693,5	37,60	62,80
64	0,67	5,25	1705,6	30,50	46,10
65	0,63	5,25	1653,8	27,50	35,80
66	0,60	5,25	1601,5	20,10	24,30
67	0,63	5,25	1482,4	13,00	18,20
68	0,63	5,25	1197,1	6,30	7,20
69	0,75	5,25	1723,3	34,30	56,40
70	0,50	13,50	1166	8,20	11,70

Tableau 3.1 Résultats expérimentaux obtenus par [Ges 10].

(W/C) : le rapport eau/ciment, le superplastifiant (SP) et un squelette granulaire (GS) comportant (agrégats grossiers : gravier, agrégats fins : sable, granulats fins de caoutchouc, granulats grossiers de caoutchouc); Ec : désigne le module d'élasticité obtenu expérimentalement, Fc : désigne la résistance en compression obtenue expérimentalement.

Gesoglu[Ges 15], les auteurs ont étudiés les propriétés mécaniques des B.I.G.C, ou les agrégats naturels ont été substitués par deux types de granulats de caoutchouc : fins et grossiers. Les mélanges ont été réalisés avec un ratio (eau/ciment) constant. Un total de 19 mélanges de bétons a été conçu en remplaçant les agrégats naturels fins et grossiers par des granulats fins et grossiers de caoutchouc respectivement à des taux de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% et 30% par rapport au volume total des granulats. Les résistances en compression ont été mesurées pour les différentes compositions. Les résultats ont indiqués que l'utilisation des granulats de caoutchoucs affecte de manière significative les propriétés mécaniques. Les chercheurs ont relevés que la substitution des granulats naturels par des G.C entraînait inévitablement une chute de la résistance en compression d'autant plus importante lorsque le taux de substitution est important d'une part et d'autre part lorsque les dimensions des G.C sont importantes.

Le tableau suivant (cf. Tableau 3-2) compile les données bibliographiques pour les différents mélanges de bétons utilisés par les auteurs :

Données N°	W/C -	SP (kg/m ³)	GS (kg/m ³)	Ec (GPa)	Fc (MPa)
1	0,40	1,80	1678,6	41,00	53,50
2	0,40	2,25	1652,7	38,00	49,70
3	0,40	2,70	1626,8	35,00	44,50
4	0,40	3,15	1601	32,50	40,70
5	0,40	3,60	1575,1	31,00	35,30
6	0,40	4,05	1549,2	29,00	34,34
7	0,40	4,50	1523,3	27,00	27,00
8	0,40	2,70	1623,2	34,00	43,77
9	0,40	3,15	1595,6	31,00	37,90
10	0,40	3,60	1567,9	30,00	33,75
11	0,40	4,05	1540,3	28,00	31,00
12	0,40	4,50	1512,5	25,00	25,00
13	0,40	3,15	1625,1	35,00	42,20
14	0,40	3,60	1571,4	32,00	36,13
15	0,40	3,55	1518	27,00	32,43
16	0,40	4,50	1464,4	26,00	26,10
17	0,40	5,40	1357,2	17,00	17,00
18	0,40	2.25	1651	37,50	47,20
19	0.40	4.95	1410.9	22,00	19,40

Tableau3.2 Résultats expérimentaux obtenus par [Ges 15].

Nguyen, [Ngu 10], les auteurs ont évalués les propriétés mécaniques d'un mortier incorporant des G.C. Le mortier à base de ciment a été renforcé de fibres de caoutchouc à des taux de 20% et 30% en substitution des agrégats minéraux. La campagne expérimentale menée par les auteurs est basée sur 12 mélanges de bétons.

La résistance en compression a été évaluée pour les différents mélanges. Les résultats ont montrés que l'incorporation des fibres était préjudiciable à la résistance du matériau notamment la résistance en compression (cf. Tableau 3-3)

Données N°	W/C -	SP (kg/m ³)	GS (kg/m ³)	Ec (GPa)	Fc (MPa)
1	0,47	3,25	1600	31,50	52,50
2	0,47	3,25	1600	31,20	52,10
3	0,47	3,25	1600	30,90	51,20
4	0,47	3,25	1600	30,60	50,80
5	0,47	3,25	1420	20,00	28,10
6	0,47	3,25	1420	19,50	27,70
7	0,47	3,25	1420	20,20	28,30
8	0,47	3,25	1420	20,80	28,60
9	0,47	3,25	1335	16,60	21,50
10	0,47	3,25	1335	15,60	19,60
11	0,47	3,25	1335	15,10	19,10
12	0,47	3,25	1335	15,30	20,20

Tableau 3.3 Résultats expérimentaux obtenus par [Ngu 10].

Ganjian[Gan 09], la performance des bétons incorporant des G.C a été étudiée par les auteurs lorsque les G.C étaient utilisés en substitution des agrégats et du ciment. Ganjian[Gan 09], ont indiqué dans leur étude que lorsque les granulats naturels sont substitués par des G.C. de diamètre maximum de 25 mm à des taux de 5%, 7,5% et 10% , en masse, cela entraînait une chute de 22% de la résistance en compression par rapport au béton de référence lorsque le taux de substitution atteint 10%(cf. figure 3-1).

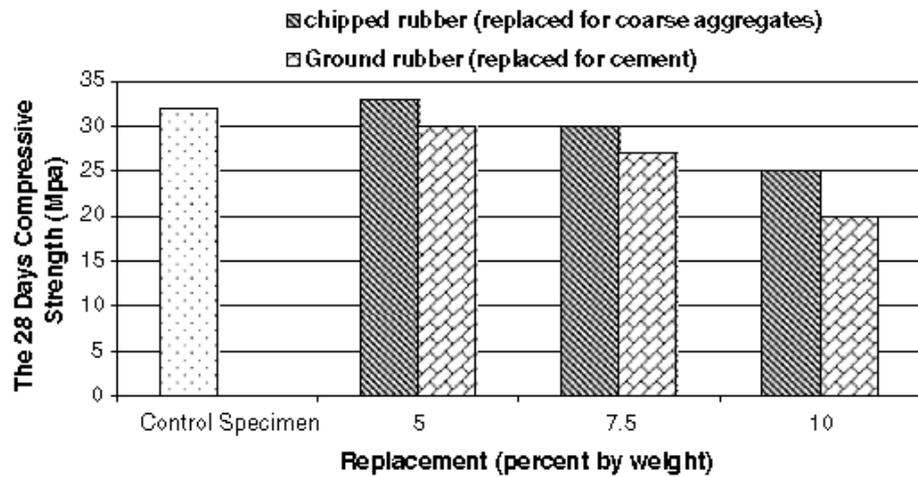


Figure 3.1 Influence des G.C. sur la résistance en compression [Gan 09]

Le tableau suivant (cf. Tableau 3-4) compile les données bibliographiques pour les différents mélanges de bétons utilisés par les auteurs :

Données N°	W/C -	SP (kg/m ³)	GS (kg/m ³)	Ec (GPa)	Fc (MPa)
1	0,50	1,52	1785	28,00	32,00
2	0,50	1,52	1788,4	24,00	33,00
3	0,50	1,52	1788,5	22,00	30,00
4	0,50	1,52	1790	20,00	25,00
5	0,50	1,52	1804	24,00	30,00
6	0,50	1,52	1813	22,50	27,00
7	0,50	1,52	1823	18,00	20,00

Tableau 3-4 Résultats expérimentaux obtenus par [Gan 09].

Cuong [Cuo 10], les résultats moyens obtenus à partir de trois essais sont répertoriés dans le tableau 3-5 indiquent clairement que l'incorporation de G.C. est très préjudiciable vis-à-vis de la résistance en compression. A titre d'exemple, un taux de substitution en G.C. de 40% entraîne une chute de résistance de 72%, cette chute est de l'ordre de 38% pour un taux de 20% en G.C par rapport au béton de référence (cf. figure 3-2).

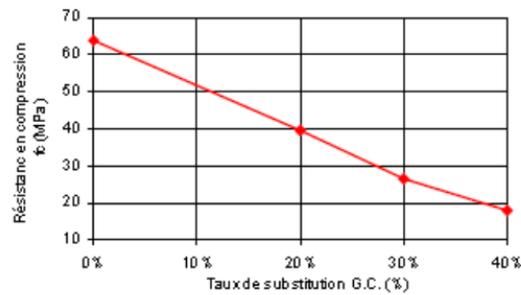


Figure 3-2 Effet des G.C sur la résistance en compression à 28 jours, [Cuo 10]

Béton	B0GC	B20GC	B30GC	B40GC
Résistance en compression (MPa)	63,7	39,5	26,3	17,9
Dispersion (%)	0,9	7,7	1,8	7,3

Tableau 3-5 Résultats de la Résistance en compression obtenus par [Cuo 10]

Le tableau suivant (cf. Tableau 3-6) compile les données bibliographiques pour les différents mélanges de bétons utilisés par l'auteur :

Données N°	W/C	SP (kg/m ³)	GS (kg/m ³)	Ec (GPa)	Fc (MPa)
1	0,47	3,03	1839,9	34,10	63,70
2	0,47	3,29	1743,8	23,50	39,50
3	0,47	3,61	1695,7	17,80	26,30
4	0,47	3,99	1647,7	16,70	17,90

Tableau 3-6 Résistances en compression obtenus par [Cuo 10]

Sur la base des données collectées citées plus haut (cf. Tableau 3-6) et afin de permettre d'entraîner notre modèle de réseau RNA, il faut déclarer divers paramètres, comme le nombre de cycle pendant l'apprentissage (itérations ; epochs), la fréquence de vérification de l'erreur d'apprentissage vis-à-vis de l'erreur désirée, le taux d'apprentissage. Il faut aussi déclarer les taux dans la division des données en pourcentage pour les trois parties selon les trois phases (A% pour l'apprentissage, B% pour la validation et C% pour le test) de sorte que $A+B+C=100\%$. Le cycle d'apprentissage signifie un passage complet par tous les neurones.

La première étape consiste à identifier les paramètres à employer pour les modèles de prédiction. Les données sont divisées en trois parties : 70% des données sont employées pour l'apprentissage (training), 15% pour

la phase de validation et 15% pour la phase de test. La mise en œuvre d'un modèle RNA inclut ces trois phases. Le logiciel (MATLAB 2011) a été utilisé pour l'application du RNA. La détermination des entrées pertinentes dans le réseau RNA, c'est-à-dire les grandeurs qui ont une influence significative sur le phénomène que l'on cherche à modéliser (résistance en compression) sont d'abord étudiées et analysées à l'aide du logiciel (SPSS) et ce dans le but d'identifier l'importance et l'impact des entrées les unes sur les autres.

A partir de l'ensemble des données collectées de la littérature(cf. tableaux 3-1, 3-2, 3-3, 3-4, et 3-6), une analyse descriptive est réalisée sur celles-ci. La description des données est souvent la première approche dans la compréhension d'un phénomène.

3.3 Détermination des entrées/sorties du réseau de neurones

L'ensemble des données d'entrée est représenté par les neurones qui correspondent aux variables suivantes :

- rapport Eau/Ciment
- Superplastifiant
- Squelette granulaire comportant : les agrégats grossiers (graviers), les agrégats fins (sable) et les granulats fins et grossiers du caoutchouc.

3.4 Elaboration de la structure du réseau

Pour la topologie du RNA, un réseau a été utilisé avec trois (03) entrées (rapport eau/ciment, le superplastifiant et le squelette granulaire) et une sortie qui est la résistance en compression.

3.5 Apprentissage

L'apprentissage est une étape très importante du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié itérativement jusqu'à l'obtention du comportement désiré (résistance en compression), et ce par l'ajustement des poids (connexion ou synapses) des neurones à une source d'information définit [Heb 49], Rumelhart [Rum 86]. La phase d'apprentissage ou d'entraînement a pour but de déterminer les paramètres de connexion du réseau à l'aide de la technique d'optimisation. La phase de test consiste à vérifier le réseau déterminé lors de la phase d'apprentissage sur des données non utilisées lors de cette dernière, et à examiner la capacité du réseau à généraliser les exemples

d'apprentissage (en comparant la sortie réelle du réseau avec la sortie désirée).

3.5.1 Algorithme de Levenberg-Marquardt

L'algorithme d'apprentissage utilisé dans notre étude est l'algorithme de Levenberg-Marquardt qui s'avère le plus efficace et le plus fiable. Dans notre cas on a fixé 1000 itérations comme étant la limite du processus de convergence.

3.5.2 Fonction de transfert

La fonction de transfert utilisée dans notre cas est la fonction tan-sigmoïde correspondant aux couches cachées.

3.6 Validation et test

Après la phase d'apprentissage, on passe à la simulation du réseau en utilisant la décomposition des données restantes entre validation et test. L'analyse des résultats obtenus à partir des phases d'apprentissage, de validation et de test conduit à l'utilisation d'un réseau de taille RNA 3-3-1-1 pour le modèle de prédiction de la résistance en compression du béton soit : 03 entrées, deux couches cachées et une sortie.

3.7 Fonction performance

En considérant le modèle de RNA pour la prédiction de la résistance en compression, les valeurs des performances obtenues pour les trois paramètres considérés dans notre étude sont : le coefficient de corrélation « R », l'erreur quadratique moyenne « MSE » et l'erreur absolue moyenne « MAE » sont considérées.

3.8 Résultats et discussion

Une analyse descriptive est menée par le logiciel SPSS sur l'ensemble des variables considérées, à savoir :

- Rapport eau/ciment (W/C : water/cement)
- Super plastifiant (SP)
- Agrégats fins (FA)
- Agrégats grossiers (CA)
- Granulats fins de caoutchouc (CR : Crumb rubber)

Rahali Bachir

Thèse de doctorat en sciences / 2018
Université Djillali Liabés Sidi Bel Abbés

- Granulats grossiers de caoutchouc (TC : Tire Chips)
- Paramètre globale : Squelette granulaire regroupant : (FA, CA, CR, TC et GS)

	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
W/C	112	,40	,75	,5156	,1138
SP	112	1,52	13,50	7,0291	4,5102
FA	112	338,40	1600,00	703,5458	260,2156
CA	112	,00	1076,40	786,7836	311,7621
CR	112	,00	215,00	42,6017	52,5173
TC	112	,00	203,70	46,7187	58,8540
GS	112	1166,00	1839,90	1579,6500	171,9352
Fc	112	7,10	85,77	40,2713	19,5876

Tableau 3-7 Résultats de l'analyse descriptive [Rah 18]

A l'issue de cette analyse, les valeurs min, max des données utilisées, sont illustrées dans le tableau ci-dessus (cf. Tableau 3-7).

Suite à cela, une procédure d'analyse en corrélation bi-variée est opérée pour la résistance en compression en fonction des différents paramètres précédemment cités.

Cette analyse bi variée est réalisée entre la résistance en compression et chaque paramètre considéré individuellement. Elle consiste à étudier les variables prises en couple, via des techniques descriptives et probabilistes. L'objectif de cette étude est la mise en évidence d'un lien ou d'une absence de lien entre deux (02) variables (cf. Tableau 3-8).

Les poids entre les différents paramètres sont des indicateurs du choix porté sur les paramètres finaux qui influent sur la résistance en compression. En analysant les valeurs de la matrice de corrélation (cf. Tableau 3-8), on peut constater que la résistance en compression est influée largement par le squelette granulaire et le superplastifiant. Toutefois, compte tenu de l'importance du rapport eau/ciment pour la confection du béton, il s'avère être un paramètre nécessaire et indispensable dont l'influence est caractérisée aussi bien sur l'aspect physique que l'aspect chimique.

En conséquence le choix porté sur les paramètres prépondérants se résume aux variables : eau/ciment ; superplastifiant et squelette granulaire.

			Fc	W/C	SP	FA	CA	CR	TC	GS
Tau-B de Ken- dall	Fc	Coefficient de corrélation	1,00	-,035	,207	,217	,514	-,607	-,455	,517
		Sig. (bilatéral)	.	,602	,003	,001	,000	,000	,000	,000
		N	112	112	112	112	112	112	112	112
W/C	W/C	Coefficient de corrélation	-,035	1,00	,022	-,140	,176	,001	,095	,117
		Sig. (bilatéral)	,602	.	,761	,038	,009	,994	,173	,082
		N	112	112	112	112	112	112	112	112
SP	SP	Coefficient de corrélation	,207	,022	1,000	-,487	,235	-,010	,268	-,090
		Sig. (bilatéral)	,003	,761	.	,000	,001	,894	,000	,198
		N	112	112	112	112	112	112	112	112
FA	FA	Coefficient de corrélation	,217	-,140	-,487	1,000	,166	-,428	-,576	,452
		Sig. (bilatéral)	,001	,038	,000	.	,010	,000	,000	,000
		N	112	112	112	112	112	112	112	112
CA	CA	Coefficient de corrélation	,514	,176	,235	,166	1,000	-,469	-,310	,699
		Sig. (bilatéral)	,000	,009	,001	,010	.	,000	,000	,000
		N	112	112	112	112	112	112	112	112
CR	CR	Coefficient de corrélation	-,607	,001	-,010	-,428	-,469	1,000	,368	-,577
		Sig. (bilatéral)	,000	,994	,894	,000	,000	.	,000	,000
		N	112	112	112	112	112	112	112	112
TC	TC	Coefficient de corrélation	-,455	,095	,268	-,576	-,310	,368	1,000	-,430
		Sig. (bilatéral)	,000	,173	,000	,000	,000	,000	.	,000
		N	112	112	112	112	112	112	112	112
GS	GS	Coefficient de corrélation	,517	,117	-,090	,452	,699	-,577	-,430	1,00
		Sig. (bilatéral)	,000	,082	,198	,000	,000	,000	,000	.
		N	112	112	112	112	112	112	112	112

Tableau 3-8 Corrélation bi-variée entre les différents paramètres

L'analyse des régressions non linéaires représentant la résistance en compression en fonction des paramètres précédemment cités, a été

Rahali Bachir

Thèse de doctorat en sciences / 2018
Université Djillali Liabés Sidi Bel Abbés

élaborée en utilisant plusieurs modèles à savoir : modèle linéaire, modèle logarithmique, modèle quadratique et le modèle exponentiel (cf. tableau 3-9).

	R ²		
	W/C	S/P	GS
Linéaire	,013	,161	,500
Logarithmique	,013	,132	,501
Quadratique	,014	,173	,503
Exponentiel	,018	,066	,654

Tableau 3-9 Coefficients de détermination R² pour les différents modèles utilisés
[Rah 18]

L'effet des différents paramètres (eau/ciment, superplastifiant et squelette granulaire) sur la résistance en compression se traduit par des coefficients de détermination R² pour chaque modèle étudié (cf. Tableau 3-9).

Notons que le coefficient de détermination représente la proportion de variabilité de la variable dépendante (résistance en compression) pouvant être expliquée par les variables indépendantes (rapport E/C, superplastifiant et squelette granulaire).

A la lecture des paramètres, on peut constater que l'estimation statistique ne donne pas vraiment des résultats représentatifs. En effet, en abordant les différentes régressions, les résultats obtenus pour le coefficient R² sont très faibles d'où la déduction de l'incapacité de l'estimation statistique. Pour pallier à cela, il est indispensable de passer à la méthode des réseaux de neurones.

Idéalement, plus les coefficients se rapprochent de 1, plus la courbe s'ajuste aux données. Le coefficient de détermination R² (le carré du coefficient de corrélation) est un indicateur qui permet de juger le pouvoir de prédiction. Il mesure l'adéquation entre le modèle et les données observées. Des courbes de régression non linéaires représentant la résistance en compression en fonction des paramètres précédemment cités, ont été tracées en utilisant plusieurs modèles à savoir : modèle linéaire, modèle logarithmique, modèle quadratique et le modèle exponentiel (cf. figures 3-3, 3-4, et 3-5).

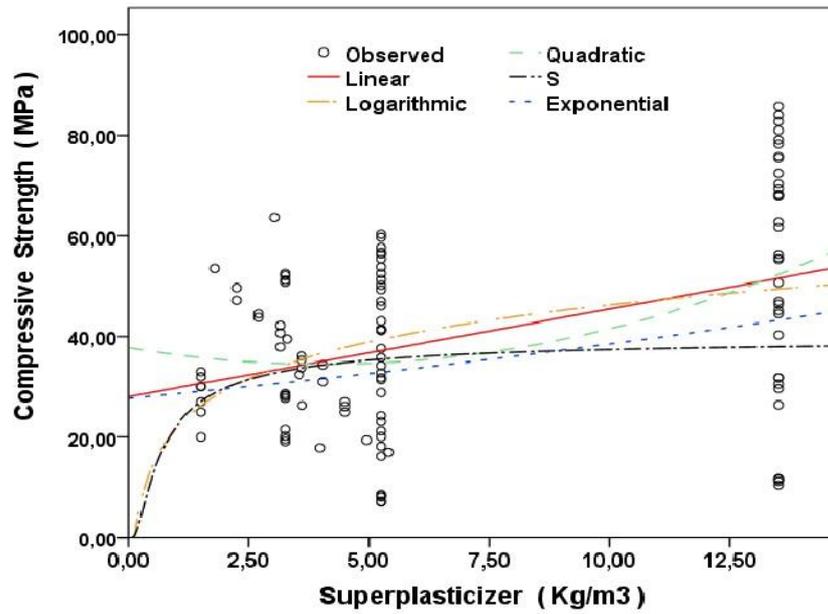


Figure 3-3 Courbes de régression non linéaires de la résistance en compression en fonction du superplastifiant [Rah 18]

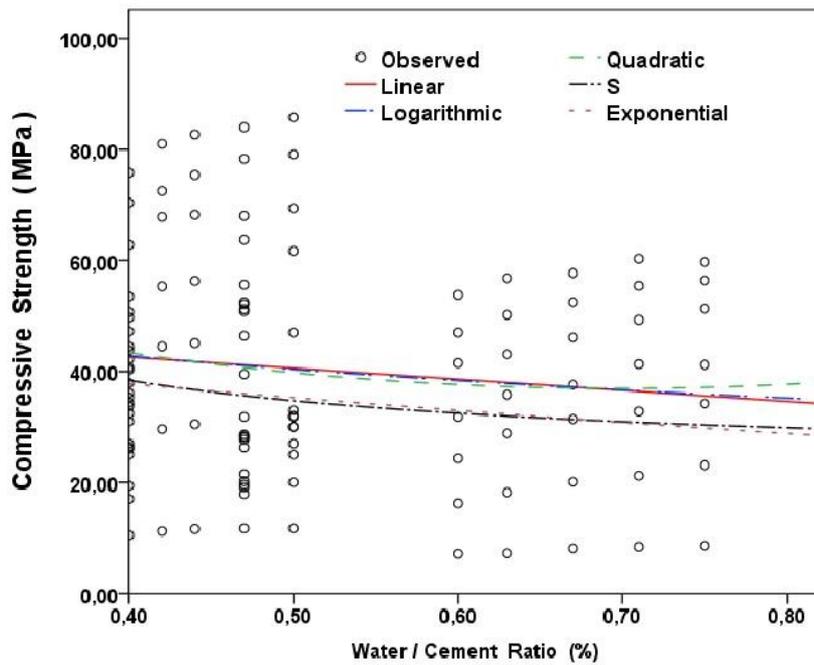


Figure 3-4 Courbes de régression non linéaires de la résistance en compression en fonction du ratio W/C [Rah 18]

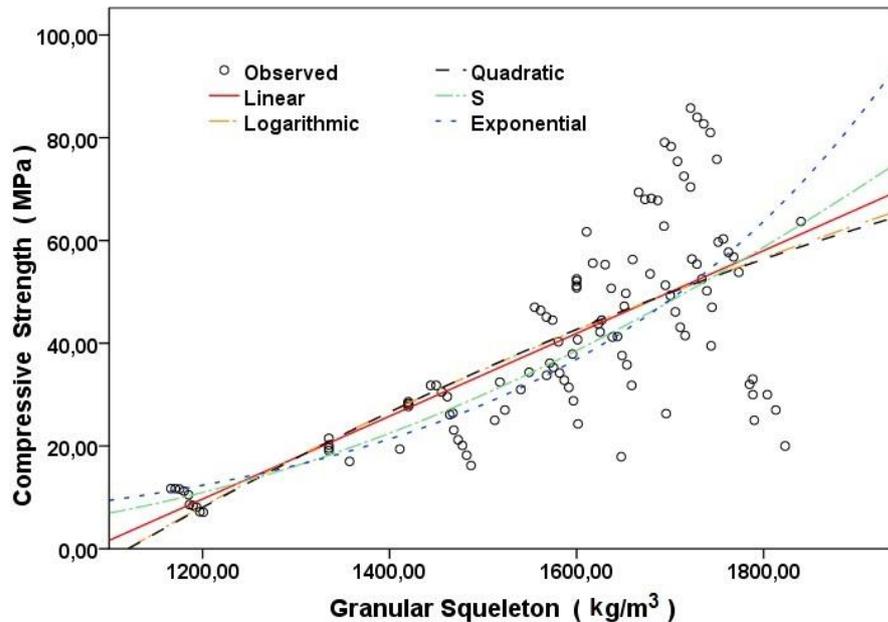


Figure 3-5 Courbes de régression non linéaires de la résistance en compression en fonction du squelette granulaire [Rah 18]

La figure 3-3 indique que le modèle quadratique suit la forme des données utilisées, alors que la courbe de régression non linéaire figure 3-4 indique que le modèle exponentiel approche au mieux l'allure des données expérimentales. La figure 3-5 montre que le modèle exponentiel suit l'allure de la distribution des données expérimentales des auteurs. Le modèle linéaire surestime la résistance en compression lorsque le squelette granulaire est compris entre 1250 kg/m³ et 1650 kg/m³.

Considérant le modèle RNA, pour la prédiction de la résistance en compression, et après exécution du programme matlab élaboré, on aboutit à des mesures statistiques de la performance du réseau, comme les coefficients de corrélations des différentes phases (training : apprentissage, validation et test). Les valeurs obtenues pour le coefficient de corrélation « R » sont : 99,72% ; 99,76% et 97,70% pour les phases training, validation et test respectivement (cf. Tableau 3-10).

Equation	Résistance en compression		
	Training set	Validation set	Testing set
Samples	78	17	17
R	0,9972	0,9976	0,9770
MAE	1,1336	1,0674	2,8333
MSE	2,3100	1,8102	23,7079

Tableau 3-10 Valeurs statistiques du modèle de réseau RNA proposé [Rah 18]

Les résultats obtenus par le réseau RNA et illustrés dans la figure (cf. figures 3-6) sont très proches des valeurs expérimentales et par conséquent montrent que le modèle de réseau de neurone proposé fournit de bonnes prédictions de la résistance en compression.

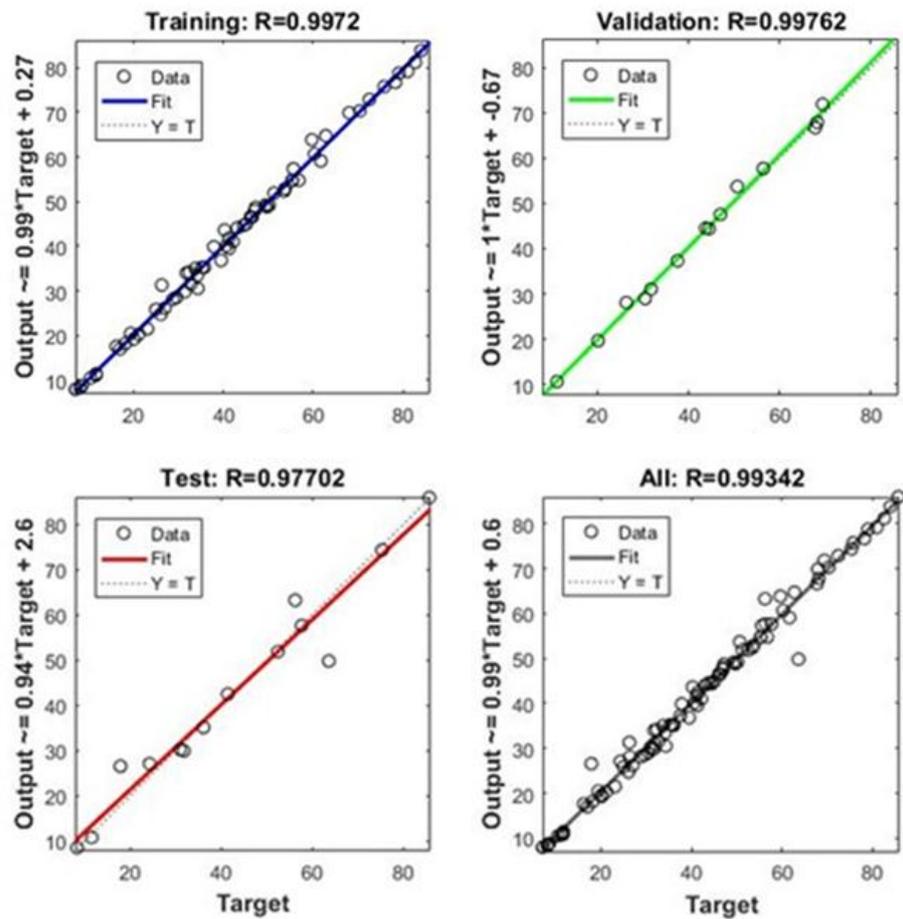


Figure 3-6 Résultats obtenus par le modèle de réseau de neurones RNA pour les phases d'apprentissage (training), de validation, test et de l'ensemble[Rah 18].

L'expression mathématique du modèle élaboré pour la résistance de compression s'écrit sous la forme :

$$Output = b_2 + LW * \tanh(b_1 + IW * x)(eq.3-1)$$

ou x : désigne la valeur d'entrée

$$b_1 = \begin{pmatrix} -27,3414 \\ 3,8832 \\ 1,1677 \end{pmatrix}$$

Output : désigne la résistance en compression

$$b_2 = 1,9177LW = (-0,1832 \quad -0,5474 \quad -2,6069)$$

$$W = \begin{pmatrix} -4,0478 & 20,3826 & 3,5032 \\ 1,9852 & 2,7750 & 0,2251 \\ -0,2314 & -0,4627 & -0,9098 \end{pmatrix}$$

Dans la littérature certains auteurs confirment que l'utilisation des R.N.A s'avère être un outil de prédiction intéressant. On peut citer : Topçu[Top 08-a], les auteurs ont étudiés l'impact de G.C utilisés en substitution du sable dans des mortiers. Les auteurs ont construits un modèle de réseau RNA pour la prédiction de la résistance en compression. Les valeurs prédites calculées sont très proches des résultats expérimentaux. Les auteurs ont constatés que l'utilisation du RNA permettait de prédire correctement la résistance en compression sans avoir recours à des essais expérimentaux.

Dans d'autres travaux, Gesoglu[Ges 10], ont modélisés les propriétés mécaniques des B.I.G.C en construisant un modèle de RNA pour prédire la résistance en compression. Le modèle a été construit en utilisant huit variables en entrée et une sortie qui est la résistance en compression. Les résultats obtenus par les auteurs ont montrés l'aptitude du modèle de RNA à prédire correctement la résistance en compression. Les valeurs prédites étaient en accord avec les résultats expérimentaux avec des coefficients de corrélation dépassant 99%.

Dans notre modèle de réseau RNA, la distribution des erreurs dans les différentes phases d'apprentissage, de validation et de test est illustrée dans la figure (cf. figure 3-7). On peut constater que l'erreur dans la plus part des résultats obtenus pour la prédiction de la résistance en compression est comprise entre -8,107% et +13,29% pour l'ensemble des valeurs, toutefois pour la majorité des valeurs l'erreur reste comprise entre -2,476% et 2,028%.

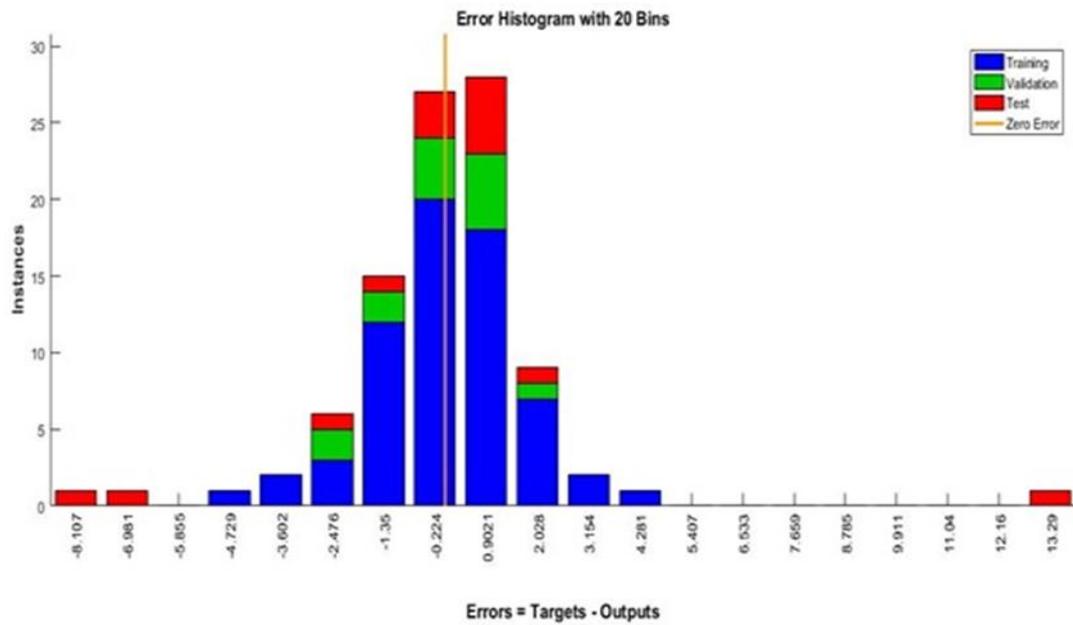


Figure 3-7 Distribution d'erreur pour les phases d'apprentissage, de validation et de test [Rah 18].

Les résultats trouvés confirment que le modèle de réseau de neurone proposé fournit de bonnes prédictions de la résistance en compression.

Avec une augmentation des granulats de caoutchouc G.C, le squelette granulaire diminue comme le montre la figure suivante (cf. figure 3-8).

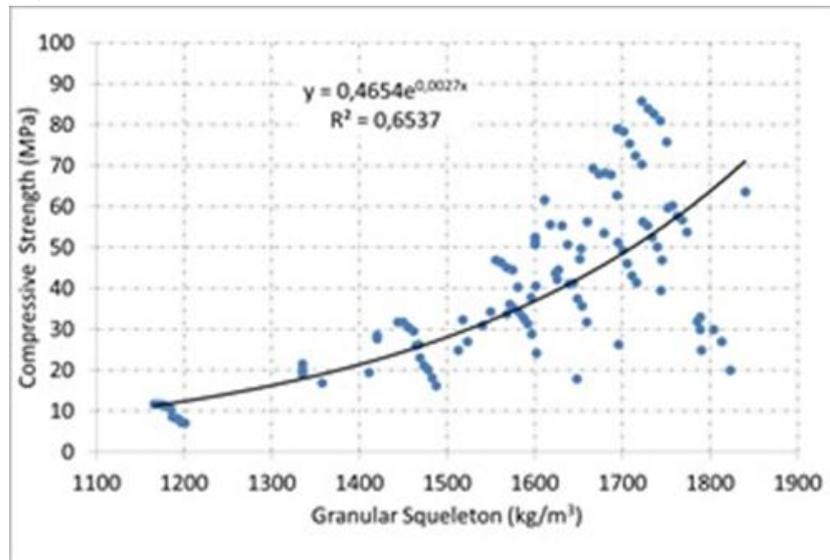


Figure 3-8 Courbe exprimant la résistance à la compression en fonction du squelette granulaire [Rah 18].

Rahali Bachir

Thèse de doctorat en sciences / 2018
 Université Djillali Liabés Sidi Bel Abbés

La masse volumique d'un béton dépend de sa composition en particulier de la densité des granulats utilisés. Le béton incorporant des G.C. en substitution des granulats naturels a naturellement une masse volumique plus faible que celle du béton ordinaire. Si on se réfère à la classification des bétons légers établie par l'ACI Committee 213 [ACI 213], avec l'incorporation de G.C. on peut envisager la production de bétons légers.

Comme le montre la figure (cf. figure 3-9 a), Güneyisi[Gün 04], ont observé une chute de 25% de la masse volumique avec un taux de substitution de 50% de G.C. par rapport au béton de référence. Kaloush[Kal 05], ont aussi indiqué que la masse volumique diminue approximativement de 102 kg/m³ pour chaque 22,7 kg de G.C. ajouté, une tendance illustrée par la figure suivante (cf. figure 3-9 b).

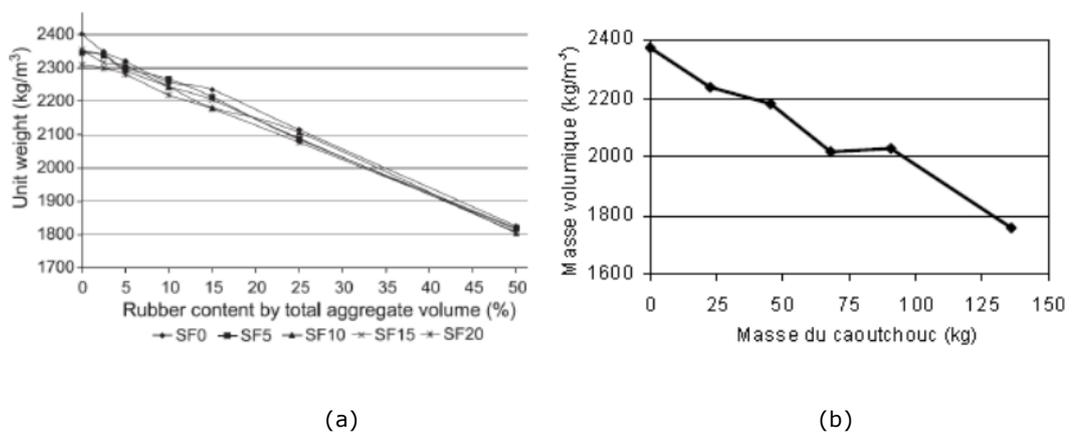


Figure3-9 Variation de la masse volumique du béton incorporant des G.C.

a. [Gün 04]

b.[Kal 05]

A partir des faibles erreurs entre les valeurs expérimentales et celles prédites, il apparait clairement que les valeurs prédites diminuent avec le squelette granulaire. Partant de cette constatation, il existe une bonne corrélation dans la variation des données expérimentales et des valeurs prédites de la résistance à la compression.

2.9 Conclusion

En utilisant le réseau de neurones artificiels (RNA) comme outil de prédiction de certaines caractéristiques mécaniques telles que la résistance

en compression, il s'avère être très utile pour la modélisation et l'optimisation.

En effet, le modèle de prédiction a été développé en utilisant le réseau de neurones artificiels à l'effet de prédire la résistance en compression des bétons incorporant des granulats issus du broyage des pneus usés. Le modèle a été conçu avec des paramètres importants : rapport eau/ciment, le superplastifiant et le squelette granulaire incluant (les proportions des agrégats naturels et des granulats de caoutchouc fins et grossiers). Les paramètres d'entrées dans le RNA utilisés sont ceux cités précédemment alors que le paramètre de sortie étant la résistance en compression.

Sa capacité de résolution des problèmes non linéaires fait que l'utilisation de cet outil soit très intéressante pour la prédiction et très rapide d'utilisation. Cette étude a permis de montrer l'intérêt des réseaux de neurones comme outil de modélisation du comportement mécanique.

CHAPITRE 4

Méthode des réseaux de neurones appliquée à la prédiction du module d'élasticité

4.1 Mise en œuvre du réseau de neurones pour la prédiction du module d'élasticité : Application du réseau de neurone au cas étudié

Dans ce chapitre, le comportement élastique : module d'élasticité, est prédit grâce au modèle statistique des réseaux de neurones. Le choix de ce modèle statistique est inspiré par la forme des relations entre variables (constituants des B.I.G.C) à expliquer. Un examen de ces relations peut s'avérer très utile, particulièrement lorsque celles-ci sont des relations non linéaires. Les valeurs des modules d'élasticité fournies par le modèle sont confrontées aux valeurs expérimentales mesurées sur les B.I.G.C. et issues de la littérature

4.2 Introduction

Dans la prévision du module d'élasticité des B.I.G.C, et de façon similaire que le modèle de réseau R.N.A élaboré pour la prédiction de la résistance en compression, l'ensemble des données d'entrées utilisées pour le premier modèle sont exploitées pour la prédiction du module d'élasticité. Les 112 mélanges de bétons cités en première partie (cf. paragraphe 3.2) ont été considérés.

Dans cette partie, nous présentons la synthèse des travaux expérimentaux issus de la littérature menés par différents auteurs sur le comportement mécanique des B.I.G.C notamment le module d'élasticité.

Dans notre étude, nous avons considérés trois entrées pour concevoir notre modèle de réseau R.N.A, résumées comme suit : un rapport eau/ciment (W/C), le superplastifiant (SP) et un squelette granulaire (GS) comportant (agrégats grossiers : gravier, agrégats fins : sable, granulats fins de caoutchouc, granulats grossiers de caoutchouc). L'impact du rapport W/C, du superplastifiant et du squelette granulaire n'ont pas fait l'objet de recherches antérieurement à notre contribution.

A cet effet notre contribution porte sur l'impact de ces différents paramètres dans la conception du modèle de réseau (R.N.A) pouvant prédire le module d'élasticité.

Gesoglu[Ges 10], ont étudiés la prédiction des propriétés mécaniques des B.I.G.C notamment le module d'élasticité en utilisant deux méthodes : Le réseau de neurones et la programmation génétique. Les données utilisées pour le réseau de neurones sont issues d'une campagne expérimentale basée sur 70 mélanges de bétons. De façon similaire que le

modèle R.N.A construit pour la résistance en compression, le deuxième modèle du réseau de neurones dédié à la prédiction du module d'élasticité a été construit en utilisant huit variables à savoir : eau, ciment, sable, superplastifiant, agrégats naturels grossiers, agrégats naturels fins, les granulats grossiers et fins du caoutchouc, et une sortie : le module d'élasticité.

Le tableau 3-1 compile les données bibliographiques pour les différents mélanges de bétons utilisés par les auteurs ainsi que leurs résultats expérimentaux obtenus pour le module d'élasticité.

Gesoglu[Ges 15], ont étudiés les propriétés mécaniques des B.I.G.C, ou les agrégats naturels ont été substitués par deux types de granulats de caoutchouc : fins et grossiers. Les mélanges ont été réalisés avec un ratio (eau/ciment) constant. Un total de 19 mélanges de bétons ont été conçus en remplaçant les agrégats naturels fins et grossiers par des granulats de caoutchouc fins et grossiers respectivement à des taux de 0% (béton de référence), 5%, 10%, 15%, 20%, 25% et 30% par rapport au volume total des granulats. Les modules d'élasticité ont été évalués pour les différentes compositions. Les résultats ont indiqués que l'utilisation des granulats de caoutchoucs affecte de manière significative les propriétés mécaniques. Les chercheurs ont relevés que la substitution des granulats naturels par des G.C entraînait inévitablement une chute du module d'élasticité d'autant plus importante lorsque le taux de substitution est important d'une part et d'autre part lorsque les dimensions des G.C sont importantes.

Le tableau 3-2 compile les données bibliographiques pour les différents mélanges de bétons utilisés par les auteurs ainsi que leurs résultats expérimentaux obtenus pour le module d'élasticité.

Nguyen [Ngu 10], ont évalués le module d'élasticité d'un mortier incorporant des G.C. Le mortier à base de ciment a été renforcé de fibres de caoutchouc à des taux de 20% et 30% en substitution des agrégats minéraux. Le module d'élasticité a été évalué pour les différents mélanges. Les résultats ont montrés que l'incorporation des fibres était préjudiciable à la résistance du matériau notamment le module d'élasticité. Les données utilisées pour le réseau de neurones sont issues d'une campagne expérimentale faite par les auteurs.

Le tableau 3-3 compile les données bibliographiques pour les différents mélanges de bétons utilisés par les auteurs ainsi que leurs résultats expérimentaux obtenus pour le module d'élasticité.

Ganjian[Gan 09], la performance des bétons incorporant des G.C a été étudiée par les auteurs lorsque les G.C sont utilisés en substitution des agrégats et du ciment. Ganjian[Gan 09], ont indiqué dans leur étude que

lorsque les granulats naturels sont substitués par des G.C de diamètre maximum de 25 mm à des taux de 5%, 7,5% et 10% en masse, cela entraînait une chute de 29% du module d'élasticité par rapport au béton de référence lorsque le taux de substitution atteint 10%(cf. figure 4-1).

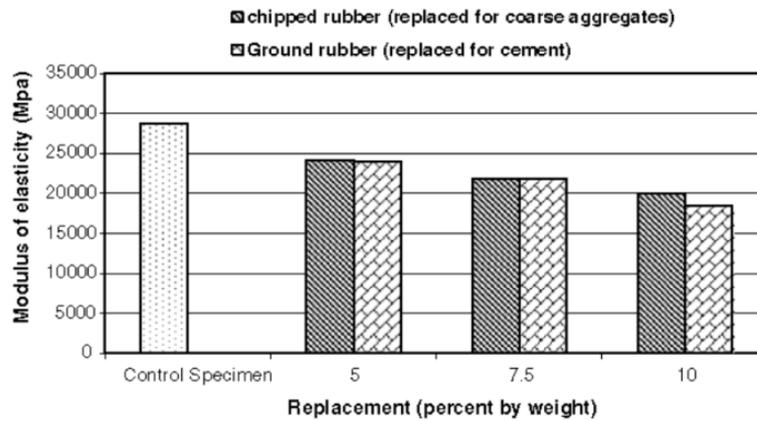


Figure 4.1 Résultats des essais du module d'élasticité [Gan 09]

Le tableau 3-4 compile les données bibliographiques pour les différents mélanges de bétons utilisés par les auteurs ainsi que leurs résultats expérimentaux obtenus pour le module d'élasticité.

Cuong [Cuo 10], les résultats moyens obtenus par l'auteur, à partir de trois essais sont répertoriés dans le tableau 4-1. Les résultats indiquent clairement que l'incorporation de G.C. est très préjudiciable vis-à-vis du module d'élasticité. A titre d'exemple, un taux de substitution en G.C. de 40% entraîne une chute du module d'élasticité de 51%, cette chute est de l'ordre de 31% pour un taux de 20% en G.C par rapport au béton de référence.L'évolution du module d'élasticité des différentes compositions obtenues en fonction du taux d'incorporation des G.C est illustrée dans la figure ci-dessous (cf. figure 4-2).

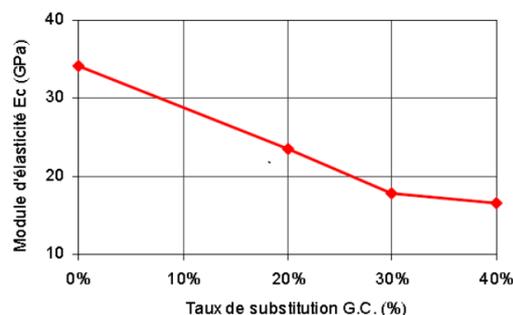


Figure 4.2 Influence du dosage en G.C sur le module d'élasticité à 28 jours [Cuo 10]

Les résultats obtenus pour le module d'élasticité en fonction du taux d'incorporation des G.C sont illustrés dans le tableau 5-1.

Béton	B0GC	B20GC	B30GC	B40GC
Module d'élasticité (GPa)	34,1	23,5	17,8	16,7
Dispersion (%)	2,4	5,6	4,7	3,1

Tableau 4.1 Module d'élasticité à 28 jours en fonction du dosage en G.C. [Cuo 10]

Le tableau 3-6 compile les données bibliographiques pour les différents mélanges de bétons utilisés par les auteurs ainsi que leurs résultats expérimentaux obtenus pour le module d'élasticité.

De façon similaire que pour le premier modèle de réseau R.N.A dédié à la prédiction de la résistance en compression et afin d'entraîner notre deuxième modèle de réseau R.N.A pour la prédiction du module d'élasticité, il faut déclarer divers paramètres, comme le nombre de cycle pendant l'apprentissage (itérations ; epochs), la fréquence de vérification de l'erreur d'apprentissage vis-à-vis de l'erreur désirée, le taux d'apprentissage.

La première étape consiste à identifier les paramètres à employer pour le modèle de prédiction. La mise en œuvre du modèle de réseau R.N.A pour la prédiction du module d'élasticité inclut trois phases : l'apprentissage, la validation et le test. Les données sont divisées en trois parties : 70% des données sont employées pour l'apprentissage, 15% pour la phase de validation et 15% pour la phase de test. Le logiciel (MATLAB 2011) a été utilisé pour l'application du réseau R.N.A. La détermination des entrées pertinentes dans le modèle de réseau R.N.A, c'est-à-dire les grandeurs qui ont une influence significative sur le phénomène que l'on cherche à modéliser (module d'élasticité) sont d'abord étudiées et analysées à l'aide du logiciel (SPSS) et ce dans le but d'identifier l'importance et l'impact des entrées les unes sur les autres. L'analyse descriptive est menée à partir des données collectées.

4.3 Détermination des entrées/sorties du réseau de neurones

L'ensemble des données d'entrée est représenté par les neurones qui correspondent aux variables suivantes :

- rapport Eau/Ciment

- Superplastifiant
- Squelette granulaire comportant : les agrégats grossiers (graviers), les agrégats fins (sable) et les granulats fins et grossiers du caoutchouc.

4.4 Elaboration de la structure du réseau

Pour la topologie du RNA, le réseau RNA est constitué de trois (03) entrées (rapport eau/ciment, le superplastifiant et le squelette granulaire) et une sortie qui est le module d'élasticité.

4.5 Apprentissage

Comme précédemment cité le point crucial du développement d'un réseau de neurones est son apprentissage. Dans le cas de notre algorithme l'apprentissage est la modification des poids du réseau dans l'optique d'accorder la réponse du réseau à la base de données expérimentales sur le module d'élasticité. L'optimisation des poids se fait sur la base de l'apprentissage. Cependant l'apprentissage est un problème numérique d'optimisation qui consiste à calculer les pondérations optimales des différentes liaisons.

4.5.2 Algorithme de Levenberg-Marquardt

L'apprentissage du modèle R.N.A dédié à la prédiction du module d'élasticité est basé sur l'algorithme de Levenberg-Marquardt. Cet algorithme s'avère le plus efficace et le plus fiable.

4.5.2 Fonction de transfert

La création du réseau de neurones qui comprend des entrées et une sortie, un certain nombre de couche cachées et de neurones par couche, passe par l'utilisation d'une fonction de transfert correspondant à chaque couche cachée. La fonction de transfert (Tansig) est celle utilisée pour modéliser l'activité neuronale.

La fonction d'activation adoptée pour notre deuxième modèle est la tangente hyperbolique sigmoïde qui est une fonction de transfert qui génère des valeurs entre -1 et 1 et définit le comportement du modèle de réseau qui est représentée par l'équation (2-1) (cf. chapitre 2, §2.9).

4.6 Validation et test

Alors que la validation concerne la vérification des performances d'un réseau de neurones hors échantillon et sa capacité de généralisation, le test est utilisé pour vérifier la qualité des prédictions du modèle neuronal.

Cette étape doit permettre d'estimer la qualité du réseau obtenu en lui présentant des données qui ne font pas partie de l'ensemble d'apprentissage. Si les performances du réseau ne sont pas satisfaisantes, il faudra, soit modifier l'architecture du réseau, soit modifier la base de l'apprentissage.

4.7 Fonction performance

Le principe consiste à mesurer les performances pendant l'apprentissage sur une base de validation qui est différente de la base d'apprentissage. Les valeurs des performances obtenues pour les trois paramètres considérés dans notre étude sont : le coefficient de corrélation « R », l'erreur quadratique moyenne « MSE » et l'erreur absolue moyenne « MAE » sont considérées.

4.8 Résultats et discussion

Une analyse descriptive est menée par le logiciel SPSS sur les variables : rapport E/C, superplastifiant, agrégats fins, agrégats grossiers, les granulats fins et grossiers du caoutchouc et le squelette granulaire. A l'issue de cette analyse, les valeurs min, max des données utilisées pour la conception du modèle, sont illustrées dans le tableau 4-2.

	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
W/C	112	,40	,75	,5156	,1138
SP	112	1,52	13,50	7,02	4,5102
FA	112	338,40	1600,00	703,5458	260,2156
CA	112	,00	1076,40	786,7836	311,7621
CR	112	,00	215,00	42,6017	52,5173
TC	112	,00	203,70	46,7187	58,8540
GS	112	1166,00	1839,90	1579,6500	171,9352
Ec	112	6,10	47,50	26,9000	10,4461

Tableau 4.2 Résultats de l'analyse descriptive

Une procédure d'analyse bi-variée est menée pour le module d'élasticité fonction de tous les paramètres considérés. De façon similaire que pour la résistance en compression, cette analyse bivariée est réalisée entre le module d'élasticité et chaque paramètre d'entrée de façon séparée. Elle consiste à étudier les variables prises en couple, via des techniques descriptives et probabilistes.

L'objectif de cette étape est la mise en évidence d'un lien ou d'une absence de lien entre deux (02) variables.

Les poids entre les différents paramètres sont des indicateurs du choix porté sur les paramètres finaux qui influent sur le module d'élasticité. En analysant les valeurs de la matrice de corrélation (cf. Tableau 4-3), on peut constater que le module d'élasticité est influencé largement par le squelette granulaire et le superplastifiant. Toutefois, compte tenu de l'importance du rapport eau/ciment pour la confection du béton, il s'avère être un paramètre nécessaire et indispensable dont l'influence est caractérisée aussi bien sur l'aspect physique que l'aspect chimique.

En conséquence le choix porté sur les paramètres prépondérants se résume aux variables : eau/ciment ; superplastifiant et squelette granulaire.

			Ec	W/C	SP	FA	CA	CR	TC	GS
Tau-B de Ken- dall	Ec	Coefficient de corrélation	1,00	-,111	,090	,301**	,487**	-,626**	-,504**	,515**
		Sig. (bilatéral)	.	,099	,197	,000	,000	,000	,000	,000
		N	112	112	112	112	112	112	112	112
W/C	W/C	Coefficient de corrélation	-,111	1,000	,022	-,140*	,176**	,001	,095	,117
		Sig. (bilatéral)	,099	.	,761	,038	,009	,994	,173	,082
		N	112	112	112	112	112	112	112	112
SP	SP	Coefficient de corrélation	,090	,022	1,000	-,487**	,235**	-,010	,268**	-,090
		Sig. (bilatéral)	,197	,761	.	,000	,001	,894	,000	,198
		N	112	112	112	112	112	112	112	112
FA	FA	Coefficient de corrélation	,301**	-,140*	-,487**	1,000	,166*	-,428**	-,576**	,452**
		Sig. (bilatéral)	,000	,038	,000	.	,010	,000	,000	,000
		N	112	112	112	112	112	112	112	112
CA	CA	Coefficient de corrélation	,487**	,176**	,235**	,166*	1,000	-,469**	-,310**	,699**
		Sig. (bilatéral)	,000	,009	,001	,010	.	,000	,000	,000
		N	112	112	112	112	112	112	112	112
CR	CR	Coefficient de corrélation	-,626**	,001	-,010	-,428**	-,469**	1,000	,368**	-,577**
		Sig. (bilatéral)	,000	,994	,894	,000	,000	.	,000	,000
		N	112	112	112	112	112	112	112	112
TC	TC	Coefficient de corrélation	-,504**	,095	,268**	-,576**	-,310**	,368**	1,000	-,430**
		Sig. (bilatéral)	,000	,173	,000	,000	,000	,000	.	,000
		N	112	112	112	112	112	112	112	112
GS	GS	Coefficient de corrélation	,515**	,117	-,090	,452**	,699**	-,577**	-,430**	1,000
		Sig. (bilatéral)	,000	,082	,198	,000	,000	,000	,000	.
		N	112	112	112	112	112	112	112	112

Tableau 4-3 Corrélation bi-variée entre les différents paramètres

L'analyse des régressions non linéaires représentant le module d'élasticité en fonction des paramètres précédemment cités, a été élaborée en utilisant plusieurs modèles à savoir : modèle linéaire, modèle logarithmique, modèle quadratique et le modèle exponentiel (cf. tableau 4-4).

	R ²		
	W/C	S/P	GS
Linéaire	,036	,043	,591
Logarithmique	,040	,028	,600
Quadratique	,050	,063	,610
Exponentiel	,038	,009	,698

Tableau 4-4 Coefficients de détermination R² pour les différents modèles utilisés

L'effet des différents paramètres (eau/ciment, superplastifiant et squelette granulaire) sur le module d'élasticité se traduit par des coefficients de détermination R² pour chaque modèle étudié (cf. Tableau 4-4)

Rappelons que le coefficient de détermination représente la proportion de variabilité de la variable dépendante (module d'élasticité) pouvant être expliquée par les variables indépendantes (rapport E/C, superplastifiant et squelette granulaire). Ce coefficient permet d'étudier l'intensité de la liaison qui peut exister entre les différentes variables. En exploitant chaque modèle, La liaison recherchée est une relation dont la représentation graphique est une courbe de régression non linéaire (cf. figures 4-3, 4-4, 4-5). D'après les coefficients de détermination, on peut se rendre compte des différentes intensités de liaisons entre le module d'élasticité et les paramètres étudiés pour l'ensemble des modèles étudiés.

A la lecture des paramètres, on peut constater que l'estimation statistique ne donne pas vraiment des résultats représentatifs. En effet, en abordant les différentes régressions, les résultats obtenus pour le coefficient R² sont très faibles d'où la déduction de l'incapacité de l'estimation statistique à donner des résultats représentatifs. Pour pallier à cela, il est indispensable de passer à la méthode des réseaux de neurones.

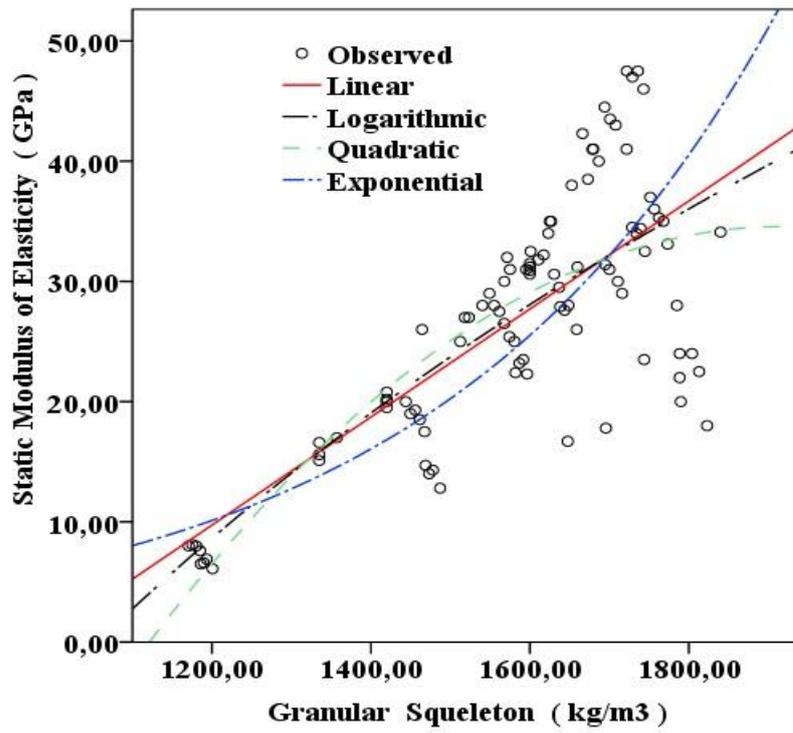


Figure 4.3 Variation du module d'élasticité en fonction du squelette granulaire

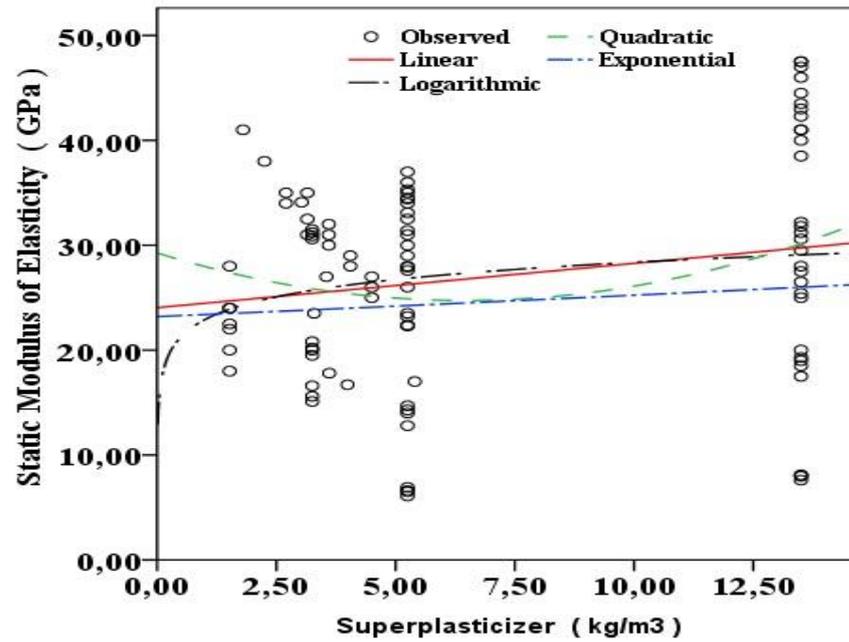


Figure 4.4 Variation du module d'élasticité en fonction du superplastifiant

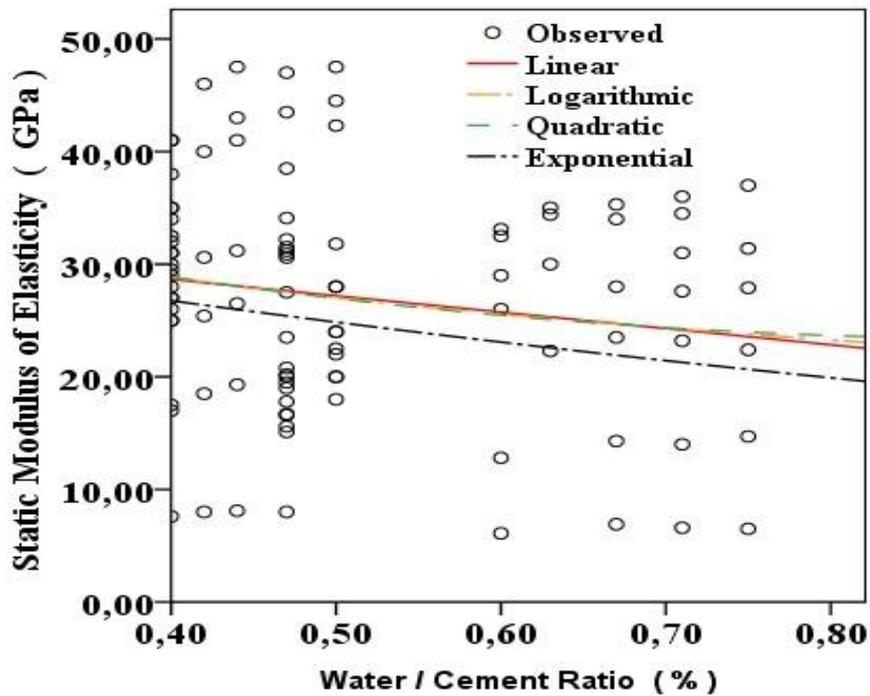


Figure 4.5 Variation du module d'élasticité en fonction du ratio eau/ciment

La figure 4-3 montre que le modèle exponentiel suit l'allure de la distribution des données expérimentales des auteurs. Le modèle linéaire surestime le module d'élasticité lorsque le squelette granulaire est compris entre 1250 kg/m³ et 1650 Kg/m³. La figure 4-4 indique que le modèle quadratique suit la forme des données utilisées, alors que la courbe de régression non linéaire figure 4-5 indique que le modèle quadratique approche au mieux l'allure des données expérimentales.

L'exécution du programme Matlab élaboré conduit aux mesures statistiques de la performance du réseau tel que les coefficients de corrélations des différentes phases.

En effet, le coefficient de corrélation R pour les phases d'apprentissage (training), de validation et de test atteint les valeurs de 98,20%, 99,05% et 98,70% respectivement (cf. figure 4-6). Les valeurs du modèle R.N.A sont très proches des valeurs expérimentales. Les résultats trouvés indiquent que les performances sont très appréciables et sensiblement identiques, ainsi le modèle de réseau de neurone proposé est excellent pour la prédiction du module d'élasticité.

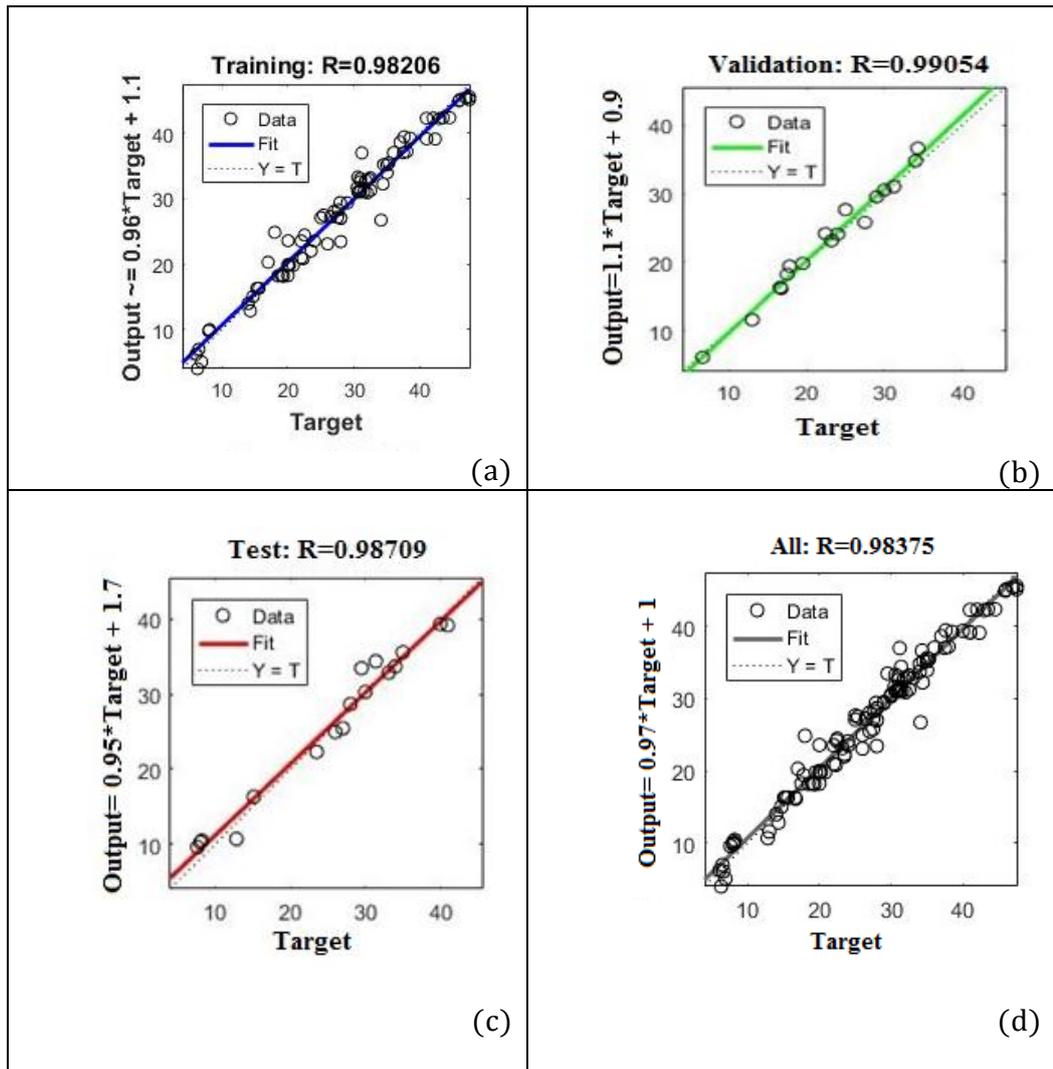


Figure 4.6 Résultats obtenus par le modèle de réseau de neurones RNA pour les phases, training, validation, test et l'ensemble.

L'expression mathématique du modèle élaboré pour le module d'élasticité peut s'écrire sous la forme :

$$\text{Output} = b_2 + LW * \tanh (b_1 + IW * x) \quad (\text{eq.4-1})$$

ou x : valeur d'entrée

$$b_1 = \begin{pmatrix} -27,3414 \\ 3,8832 \\ 1,1677 \end{pmatrix} \quad b_2 = 0.2361$$

$$LW = \begin{pmatrix} -0.1794 & -0.4083 & 0.9112 \\ 11.8048 & 18.2553 & 11.0836 \\ 0.2069 & 0.4650 & -0.8422 \end{pmatrix}$$

Gesoglu[Ges 10], ont modéliser le module d'élasticité en construisant un modèle de RNA basé sur huit variables en entrée et une sortie qui est le module d'élasticité. Les résultats obtenus par les auteurs ont montrés l'aptitude du modèle de RNA à prédire correctement le module d'élasticité. Les valeurs prédites étaient en accord avec les résultats expérimentaux avec des coefficients de corrélation dépassant 99%. Les auteurs ont déduits que le modèle de réseau de neurones considéré conduit à une prédiction précise du module d'élasticité.

La distribution des erreurs dans les différentes phases d'apprentissage, de validation et de test est illustrée dans la figure 4-7. On peut constater que l'erreur dans la plus part des résultats de la prédiction de du module d'élasticité est comprise entre -6,496% et +7,031% pour l'ensemble des valeurs mais pour la majorité des valeurs l'erreur reste comprise entre -3,648% et 2,047%.

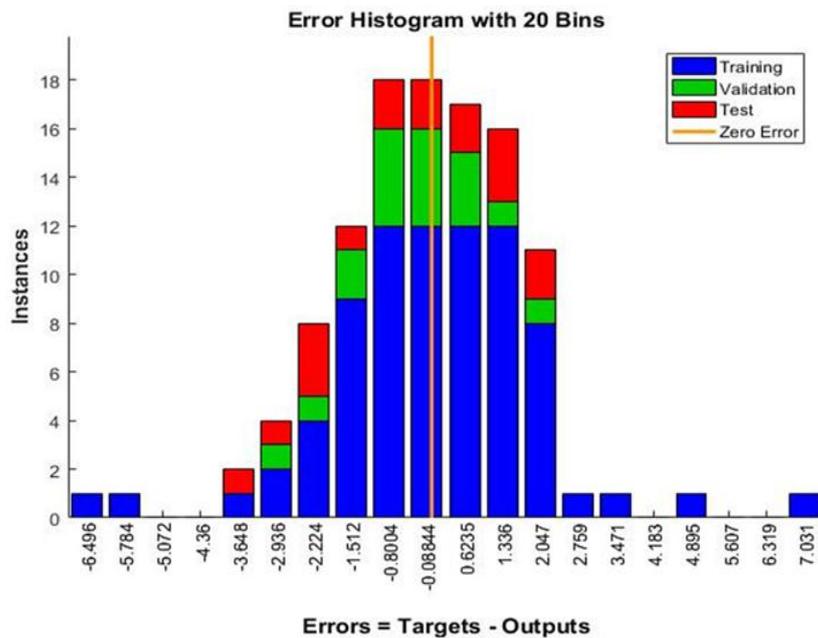


Figure 4.7 Représentation des erreurs entre les valeurs expérimentales et prédites en fonctions des instances

Le tableau 4-5, illustre les valeurs de MAE (erreur absolue moyenne) sont, respectivement, 1,4569 ; 0,9501 et 1,4743 pour les phases training, validation et test. Concernant, les valeurs de MSE (erreur quadratique moyenne) sont, respectivement 4,0008 ; 1,5215 et 3,1913 pour les phases training, validation et test.

Equation	Module d'élasticité statique		
	apprentissage	Validation	Test
Echantillons	78	17	17
R	0.98206	0.9905	0.9870
MAE	1.4569	0.9501	1.4743
MSE	4.0008	1.5215	3.1913

Tableau 4.5 Valeurs statistiques proposées pour le modèle RNA

Les résultats obtenus montrent que le modèle de réseau de neurone proposé fournit de bonnes prédictions du module d'élasticité.

Avec une augmentation des granulats de caoutchouc, le squelette granulaire diminue comme le montre la figure 4-8. De façon similaire que la prédiction de la résistance en compression (cf. paragraphe 4-8) la masse volumique du béton incorporant des G.C est plus faible que celle des bétons ordinaires. L'incorporation des G.C allège la masse volumique d'où un squelette granulaire beaucoup plus léger (figures 3-15 (a) et 3-15 (b)).

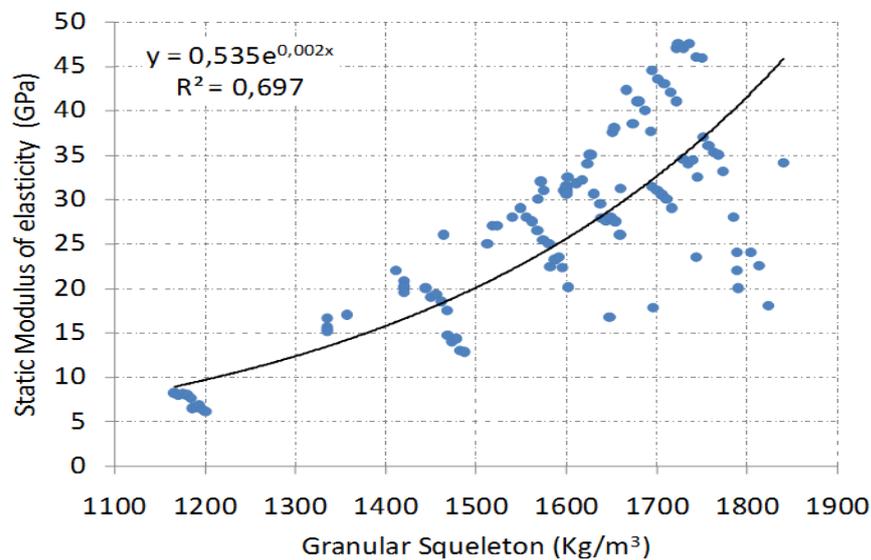


Figure 4.8 Courbe exprimant le module d'élasticité en fonction du squelette granulaire

A partir des faibles erreurs entre les valeurs expérimentales et celles prédites, il apparait clairement que les valeurs prédites diminuent avec le squelette granulaire. A partir de cette constatation, il existe une bonne corrélation dans la variation des données expérimentales et des valeurs prédites du module d'élasticité.

4.9 Conclusion

En utilisant le réseau de neurones artificiels (R.N.A) comme outil de prédiction de certaines caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, il s'avère être très utile pour la modélisation et l'optimisation.

En effet, le modèle de prédiction a été développé en utilisant le réseau de neurones artificiels à l'effet de prédire le module d'élasticité des bétons incorporant des granulats issus du broyage des pneus usés. Le modèle a été conçu avec des paramètres importants : rapport eau/ciment, le superplastifiant et le squelette granulaire incluant (les proportions des agrégats naturels et des granulats de caoutchouc fins et grossiers). Les paramètres d'entrés dans le R.N.A utilisés sont ceux cités précédemment alors que le paramètre de sortie étant le module d'élasticité.

L'efficacité du modèle a été jugée en utilisant les techniques de performance tel que : le coefficient de corrélation, l'erreur quadratique moyenne et l'erreur absolue moyenne. Les résultats obtenus ont montrés que les coefficients de corrélation étaient très appréciables et proches de l'unité. L'erreur quadratique moyenne et l'erreur absolue moyenne étaient très faibles, ce qui explique la bonne prédiction et l'efficacité du modèle. Les résultats ainsi obtenus montrent que le modèle de réseau R.N.A est pertinent et permet de prédire efficacement le comportement mécanique de ce type de béton léger comparativement aux valeurs expérimentales, ce qui peut permettre d'éviter les expériences menées au laboratoire, de réduire le temps des essais et les surcouts qui y sont liés.

CHAPITRE 5

Prédiction du module d'élasticité par la théorie des composites particuliers

5.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons étudié à différentes modélisations la méthode des réseaux de neurones artificiels pour la prédiction des deux paramètres : la résistance en compression et le module d'élasticité. Celle-ci a été retenue en raison des bons résultats obtenus comparativement aux résultats obtenus par les différentes campagnes expérimentales issues de la littérature. Elle est explicitée tout d'abord pour étudier la sensibilité de certains paramètres sur le comportement des B.I.G.C. Les prédictions de la résistance en compression et du module d'élasticité à partir la valorisation des paramètres eau/ciment, superplastifiant et squelette granulaire font apparaître des paramètres clés.

Dans la continuité des chapitres précédemment cités nous proposons un nouvel outil prédictif qui n'a jamais été exploité auparavant, en se basant la théorie des composites particuliers. En effet, à partir de la solution exacte obtenue pour les milieux dilués infinis, une tentative d'approche des systèmes concentrés est menée pour évaluer le module d'élasticité du composite et d'approcher une nouvelle méthodologie portant sur la prédiction du comportement mécanique des B.I.G.C. La capacité de cet outil a été mise en avant en faisant une confrontation avec les résultats obtenus à travers des campagnes expérimentales issues de la littérature et les prédictions obtenues par la méthode des réseaux de neurone.

5.2 Revue bibliographique

Durant les dernières années, les composites particuliers ont suscité un intérêt remarquable. A titre d'exemple, la plupart des polymères qui paraissent homogènes sont vitreux et fragiles. L'ajout de particules de caoutchouc a la matrice polymère améliore la résistance du matériau [Chr 79], [Biw 01]. De même, l'ajout de fillers rigides (noir du carbone) aux élastomères caoutchoutés améliore la rigidité et la résistance [Soh 03]. Les composites particuliers à base de matrice polymère ont été largement utilisés comme matériau de restauration dentaire [Bra 87], [Bra 89]. Dans ce contexte, les composites dentaires sont constitués d'un mélange de fillers et de résine et le plus souvent d'un agent de couplage entre les deux phases [Pal 05]. D'autres types de composites particuliers sont utilisés tels que ceux à matrice métallique ou céramique. A notre connaissance, à ce

jour, les B.I.G.C n'ont pas fait l'objet d'études comme composites particuliers.

Ishai [Ish 67] , ont classé les composites particuliers biphasiques, en 03 grandes catégories :

- Composites avec un ratio filler/matrice élevé ($E_d/E_m > 20$), ceci inclut les composites polymères renforcés.
- Composites avec un ratio ($1 < E_d/E_m < 5$), ceci inclut les matériaux cimentaires et les composites à matrice métallique. Notons que le béton est un matériau composite qui consiste en une matrice pâte de ciment et des inclusions ou renforts de différentes dimensions allant des grains de sable de diamètre 100 μm aux agrégats grossiers de dimensions comprises entre 10-20 mm
- Composites avec des inclusions molles ($0 < E_d/E_m < 1$) ou avec des vides ($E_d/E_m = 0$)

Durant les 50 dernières années, certains chercheurs se sont intéressés aux propriétés mécaniques et ont publié des travaux portant sur l'aspect théorique et expérimental des composites particuliers. L'objectif du présent chapitre est d'aborder les B.I.G.C comme composite particulier.

Cependant, la compréhension des relations entre le comportement mécanique macroscopique des B.I.G.C et les propriétés microstructurales (fraction volumique des inclusions ou renforts, taille et la distribution etc..) est loin d'être satisfaite.

Dans la littérature deux types de systèmes apparaissent : les systèmes dilués infinis et les systèmes concentrés. La modélisation des systèmes dilués infinis est basée sur des modèles micromécaniques en fournissant une solution exacte. Tandis que pour les systèmes concentrés, il n'existe pas de modèles micromécaniques permettant de fournir des solutions exactes.

Dans les systèmes concentrés, où l'interaction entre inclusions est importante, il est difficile de résoudre les équations fondamentales de la mécanique, A cet effet, des modèles micromécaniques approximatifs sont utilisés pour évaluer les propriétés effectives. Se basant sur différentes approches de modélisation, un certain nombre d'équations ont été proposées pour décrire les propriétés élastiques des composites particuliers concentrés. Toutefois, aucune équation n'a été trouvée pour représenter tous les systèmes.

Parmi ces approches de prédiction des propriétés mécaniques effectives des composites biphasiques, on trouve la loi des mélanges. Chaque phase du composite contribue aux propriétés mécaniques effectives avec une dépendance à la fraction volumique des différentes phases constituantes.

Plusieurs chercheurs ont appliqué les théorèmes variationnels de la théorie de l'élasticité pour obtenir les bornes supérieures et inférieures du module effectif. Un matériau composite composé de phases isotropes distribuées aléatoirement dans l'espace matériel aura des propriétés effectives isotropes, qui sont limitées par des limites inférieures et supérieure indépendamment de la géométrie des inclusions (phase dispersée), la propriété effective du composite réside quelque part dans l'intervalle entre les limites inférieure et supérieure.

L'approche de Hashin-shtrinkman [Has 62] est elle aussi une approche énergétique qui fournit des bornes supérieure et inférieure du comportement du composite élastique des deux phases : matrice et inclusion. Les bornes de Hashin&Shtrikman ont été établies pour les matériaux à n phases élastiques, homogènes et isotropes. Ces bornes ont donc un caractère général car il n'y a pas de restriction quant à la géométrie ni aux proportions volumiques de chacune des phases. Les auteurs démontreront par la suite que ces bornes sont les plus restrictives qui soient, puisqu'elles sont atteintes pour le modèle à inclusions sphériques proposé par Hashin [Hashin 62]. Leur analyse montre qu'il existe une géométrie particulière de l'aspect morphologique (en l'occurrence un matériau réalisé avec des sphères composites à 2 phases) dont les caractéristiques élastiques sont égales à l'une ou à l'autre des bornes de Hashin-Shtrikman. Lorsque les modules des deux phases sont très différents, les limites deviennent trop larges pour être une valeur pratique. La construction des bornes de Hashin-shtrinkman (HS) sont construites en utilisant certains principes variationnels : les théorèmes de l'énergie, des champs admissibles de déplacements et des contraintes pour le problème cellulaire.

Une autre méthode bien connue pour déterminer les propriétés mécaniques effectives des composites concentrés est le «Schéma auto-cohérent». Le schéma autocohérent a été introduit dans la littérature par Hershey [Her 54] pour un matériau de type polycristallin, puis reformulé par Hill [Hil 65] pour le matériau comportant des inclusions elliptiques. Ce schéma auto-cohérent a été utilisé pour développer les équations des modules élastiques des composites particuliers. Ce schéma se base sur un volume élémentaire représentatif (V.E.R)VER. On considère ici que chaque élément (matrice ou inclusion) est plongé dans un milieu homogène comprenant toutes les phases que l'on nomme Milieu Homogène Équivalent (MHE). Les déformations autour du VER sont égales à la déformation macroscopique effective du composite. Le lien entre la particule et le milieu infini environnant est supposé être parfait de sorte

qu'il se produit déplacement et continuité de traction à travers l'interface entre les phases.

Le schéma auto-cohérent ne donne pas de prédictions précises des modules surtout quand il y a une grande discordance dans les propriétés de la phase dispersée et de la matrice. En outre, ce modèle donne des résultats irréalistes dans les cas limites.

Afin de surmonter les limites de ce schéma auto-cohérent, le «schéma généralisé auto-cohérent» était proposé pour déterminer les propriétés mécaniques effectives de composites concentrés. Selon le schéma auto-cohérent généralisé, le composite est d'abord traité en tant que «milieu effectif» équivalent qui est homogène et a les mêmes propriétés mécaniques macroscopiques que celle du composite. Ensuite, une petite partie du milieu effectif homogène est remplacé par les composants réels du composite. Les propriétés mécaniques effectives moyennes sont ensuite déterminées en insistant sur le fait que si une petite partie du milieu homogène effectif est remplacée par les composants réels de la dispersion, aucune différence dans propriétés mécaniques ne pourrait être remarquée par des observations macroscopique. Cette approche a été utilisée par Kerner [Ker 56], van der Poel [Van 58], Smith [Smi 74], [Smi 75], et d'autres [Chr 90], [Hal 76]. Les équations basées sur le schéma généralisé auto-cohérent donnent des prédictions raisonnables à des concentrations faibles à modérées de la phase renfort. A des concentrations élevées de la phase renfort, un grand écart entre les valeurs expérimentales et prédites sont généralement observées.

De plus, les équations prédisent le module du composite particulier indépendamment de la distribution des tailles des renforts.

Dans ce chapitre, une nouvelle équation du module d'élasticité pour les composites particuliers concentrés est dérivée en utilisant un schéma différentiel avec les solutions exactes d'un système dilué infini. Les phases dispersées (renforts) sont traitées comme une phase solide compressible.

En effet, les principales caractéristiques de notre modèle sont:

- Valable pour des caractéristiques de phases limitées par des valeurs issues de la littérature.
- Valable à partir de toute la plage de concentration des particules.
- Ils prennent en compte les effets de la compressibilité de la phase particulière (dispersée) représentée par le coefficient de Poisson
- Considérer l'effet du ratio des modules (défini comme le rapport du module d'Young de la phase dispersée sur le module d'Young de la matrice).

5.3 Synthèse des travaux considérés

Plusieurs sources bibliographiques ont été exploitées. En effet, une recherche bibliographique portant sur la détermination expérimentale du module d'élasticité a été menée le pour l'exploiter dans le modèle proposé. Ces sources bibliographiques sont scindées en 03 catégories :

- Les Bétons incorporant des granulats de caoutchouc (B.I.G.C), ou les granulats naturels sont substitués par des granulats fins
- Les Bétons incorporant des granulats de caoutchouc (B.I.G.C), ou les granulats naturels sont substitués par des granulats grossiers
- Les Bétons incorporant des granulats de caoutchouc (B.I.G.C), ou les granulats naturels sont substitués par des granulats fins et grossiers simultanément.

La banque de données expérimentale issue de la littérature totalise 15 travaux, avec une large plage de la fraction volumique.

Auteurs	Fraction volumique	Module d'élasticité (GPa)				Commentaires
Cuong [Cuo 12]	0.00 0.20 0.30 0.40	34.07 23.53 17.78 16.65				Substitution du sable (0-4mm) par des G.C (0-4mm)
Sang [San 12]	0.00 0.005 0.01	(1) 21.50 19.30 18.00	(2) 24.00 21.70 19.90			02 dimensions de G.C fins ont été utilisées : (0.6 et 1 mm) (1) Béton de 24 MPa (2) Béton de 28 MPa
Maher [Mah 13]	0.00 0.10 0.20	28.83 24.27 22.24				Substitution partielle, en volume, par des G.C fins (dim :0.16-2.36 mm)
Jing [Jin 15]	0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80 0.90 1	24.10 22.50 20.40 18.50 16.10 14.80 12.30 9.2 8.9 7.7 6.3				Substitution partielle, en volume, par des G.C. fins
Bharati [Bha 11]	0.00 0.05 0.10 0.15 0.20	20 21.00 20.00 18.50 16.00 12.00	30 25.50 25.00 23.00 19.50 17.50	40 29.00 28.50 26.00 22.50 20.00	50 34.00 32.50 30.00 25.00 22.00	Substitution partielle, en volume, par des G.C. fins
Sukontasukkul [Suk 12]	0.00 0.10 0.20 0.30	32.00 26.50 22.00 15.00	32.00 18.50 11.50 6.00		32.00 24.00 16.00 11.00	Substitution partielle, en volume, par des G.C. fins

(Suite)

Auteurs	Fraction volumique	Module d'élasticité (GPa)		Commentaires
Elchalakani [Elc 15]	0.00	56.86	42.23	Les G.C utilisés en mélange de G.C très fin et fins pour substituer le poids total des agrégats naturels fins
	0.10	45.35	34.14	
	0.20	32.68	15.96	
	0.30	17.93	9.47	
	0.40	11.15	4.82	
Benazzouk [Ben 07]	0.00	25.00		Substitution partielle, en volume, du ciment par des G.C. fins
	0.10	14.00		
	0.20	13.00		
	0.30	11.50		
	0.40	9.50		
Benazzouk [Ben 06]	0.00	25.00		Substitution partielle, en volume, du ciment par des G.C. fins
	0.10	18.50		
	0.20	15.30		
	0.30	12.00		
	0.40	9.50		
	0.50	6.20		
Ganjian [Gan 09]	0.00	28.00		Les agrégats fins naturels ont été substitués par de la poudre de caoutchouc de dimensions équivalentes.
	0.005	24.00		
	0.075	22.00		
	0.10	20.00		

Tableau 5-1. Données expérimentales : substitution avec des G.C fins

Auteurs	Fraction volumique	Module d'élasticité (GPa)		Commentaires
Turatsinze [Tur 08]	0.00 0.10 0.15 0.20 0.25	35.00 22.00 19.50 15.00 11.00		Les G.C grossiers ont été utilisés pour substituer des agrégats naturels grossiers
Zheng [Zhe 08]	0.00 0.15 0.30 0.45 0.15 0.30 0.45	Dynamique 43.70 41.20 35.20 31.20 35.40 36.50 32.80	Statique 31.80 27.10 24.10 22.30 23.10 24.30 22.10	Les G.C (GR-8) de dimensions (2.62 mm) et les G.C grossiers de dimensions comprises entre (15.00 – 40.00 mm), ont été utilisés pour remplacer en volume les gros agrégats
Ganjian [Gan 09]	0.00 0.05 0.075 0.10	28.00 24.00 22.50 18.00		Les gros agrégats ont été substitués par des G.C de dimensions équivalentes.

Tableau 5-2. Données expérimentales : substitution avec des G.C grossiers

Auteurs	Fraction volumique	Module d'élasticité (GPa)					Commentaires
Gesoglu [Ges 14]	0.00 0.05 0.10 0.20	TC 28.00 9.4 5.3	CR 28.00 16.90 16.40	FCR 28.00 15.10 15.90	TC- CR 28.00 10.50 6.20	TC- FCR 28.00 8.20 4.50	Différentes dimensions de G.C ont été utilisées : Très fins, fins et grossiers
Güneysi [Gün 04]	0.00 0.025 0.050 0.10 0.15 0.25 0.50	(0.6) 33.10 32.40 29.00 26.00 20.10 12.80 6.10		(0.4) 45.90 41.00 37.60 29.50 25.00 17.50 7.60		Les G.C fins et grossiers ont été utilisés pour remplacer en volume les agrégats naturels fins et grossiers	

Tableau 5-3. Données expérimentales : substitution avec des G.C fins et grossiers simultanément

5.4 Description et hypothèses sur les phases

Dans notre cas le matériau est constitué de deux phases : l'inclusion ou le renfort (caoutchouc) qui est noyée dans une matrice (pâte de ciment, mortier ou béton) : on parle de matériau biphasique. Chacune de ces deux phases présente un comportement élastique linéaire, homogène et isotrope. Les deux phases sont supposées parfaitement collées entre elles. Les caractéristiques mécaniques des deux phases servant de base pour le calcul sont issues des sources bibliographiques.

5.4.1 Matrice

Parmi les travaux considérés, on peut citer ceux qui montrent que le module d'élasticité du béton de référence sans incorporation de granulats de caoutchouc (G.C) est compris entre 21 000 MPa [Son 11] et 56 860 MPa [Elc 15], alors que le coefficient de poisson de la matrice (béton de référence) est compris entre 1/5 [You 14] et 13/50 [Rah 12].

5.4.2 Renfort ou inclusion

Dans d'autres travaux le module d'élasticité du caoutchouc a été mesuré par :

- Hernandez- Olivares [Her 07] montrent à travers des essais d'élongations que le module d'élasticité était de l'ordre 1,97 MPa à 100%.
- Aiello [Aie 10] ont montré que le module d'élasticité du caoutchouc avoisinant la valeur de 2,78 MPa à 100%.
- D'autres auteurs ont procédé à des essais à l'effet de déterminer les modules d'élasticité du caoutchouc tels que Benazzouk [Ben 04]. Leurs résultats expérimentaux sur les granulats de caoutchouc ont montrés que le module d'élasticité des granulats était de l'ordre de 68 MPa.
- D'autre part, Topçu [Top 09] ont montrés que le module d'élasticité du caoutchouc était de l'ordre de 5,00 GPa.

Dans le cadre de notre contribution, les valeurs des modules d'élasticité des granulats de caoutchouc sont bornées entre 1,97 MPa et 5000 MPa. Concernant le coefficient de poisson du caoutchouc, celui-ci

varie de 0,48 et reste proche de 0,5. Dans notre contribution, la valeur considérée serait de 0,48.

Le tableau (cf. Tableau 5-4) récapitule les caractéristiques mécaniques.

	Matrice (béton ou mortier)		Caoutchouc	
	Valeurs Min	Valeurs Max	Valeurs Min	Valeurs Max
Module d'élasticité	21 000 MPa	56 860 MPa	1,97 MPa	5 000 MPa
Coefficient de Poisson	1/5	13/50	0,48	

Tableau 5.4 Tableau récapitulatif des caractéristiques mécaniques

5.5 Proposition de nouvelles équations de prédiction

Pour une solution infiniment diluée, si les inclusions sont sphériques et suffisamment éloignées, le module de cisaillement (G) et le module de compressibilité (K) du composite s'expriment par les relations (eq.5-1) et (eq.5-2) respectivement.

$$\frac{K}{K_m} = 1 + \left[\frac{\left(\frac{K_d}{K_m} - 1\right)}{1 + \frac{K_d - K_m}{K_m + \frac{4}{3}G_m}} \right] \phi \quad (\text{eq.5-1})$$

$$\frac{G}{G_m} = 1 + \left[\frac{15(1-\nu_m)\left(\frac{G_d}{G_m} - 1\right)}{7 - 5\nu_m - 2(1-\nu_m)\frac{G_d}{G_m}} \right] \phi \quad (\text{eq.5-2})$$

Ou

d,m désignent l'inclusion et la matrice respectivement

ν_m : coefficient de poisson de la matrice

ϕ : désigne la fraction volumique

Les conditions aux limites pour ces deux équations font que le module d'élasticité du composite est égal à celui de la matrice quand $\phi=0$.

Pour un matériau isotrope le module de compressibilité (K) et le module de cisaillement (G) sont reliés au module d'élasticité et au coefficient de poisson par les relations :

$$E = 9KG/(3K + G) \quad (\text{eq.5-3})$$

Rahali Bachir

Thèse de doctorat en sciences / 2018
Université Djillali Liabés Sidi Bel Abbés

$$E = 2G (1 + \nu) \quad (\text{eq.5-4})$$

$$E = 3K (1 - 2\nu) \quad (\text{eq.5-5})$$

A partir des équations (5-1) à (5-5), la solution exacte du module d'élasticité pour un milieu dilué infini, lorsque les renforts sphériques solides baignent dans une matrice solide est donnée par :

$$\frac{E}{E_m} = 1 + \left\{ \left[\frac{10(1-\nu_m)(1+\nu_m)^2 E_d - (1-\nu_m^2)(1+\nu_d)E_m}{2(4-5\nu_d)(1+\nu_m)E_d + (7-5\nu_m)(1+\nu_d)E_m} \right] + \left[\frac{10(1-\nu_m)(1+\nu_m)^2 E_d - (1-\nu_m^2)(1+\nu_d)E_m}{2(4-5\nu_d)(1+\nu_m)E_d + (7-5\nu_m)(1+\nu_d)E_m} \right] \right\} \quad (\text{eq.5-6})$$

E/E_m désigne le ratio du module d'élasticité du composite sur le module d'élasticité de la matrice.

Plusieurs chercheurs tels que Papakonstantinou [Pap06],Güneyisi [Gün 04], Pal [Pal 05], Ganjian [Gan 09] considèrent que les granulats de caoutchouc (déformable élastiquement) sont plus mou que la matrice de béton qui entoure ce granulat et sont considérés comme vides.

5.6 Développement de nouvelles équations pour les systèmes concentrés

De nouvelles équations relatives aux modules (rigidité et cisaillement) des composites concentrés tels que les B.I.G.C ou les G.C ont une orientation aléatoire dans une matrice, sont dérivées comme suit: un composite concentré est obtenu à partir d'une phase matricielle initiale à laquelle on ajoute successivement de petites quantités d'inclusions de G.C dans le système jusqu'à ce que la fraction volumique finale des particules soit atteinte. L'accroissement du module d'élasticité, résultant de l'addition de petites quantité de G.C à un composite avec une fraction volumique, est calculé à partir del'équation du système dilué Eq. (5-6) en traitant le composite existant comme un milieu effectif équivalent.

L'incrément du module d'élasticité résultant de l'addition des petites quantités d'inclusions de fraction volumique \emptyset , peut être calculé à partir des relations (5-7) et (5-8) du système dilué, en considérant le composite comme un milieu effectif équivalent:

$$dK = [((K_d - K)(3K + G_d))/(3K_d + 4G_d)]d\phi \quad (\text{eq.5-7})$$

$$dG = [(G_d - G)(G + G_d)/(G_g + G_d)]d\phi \quad (\text{eq.5-8})$$

$$G_g = [G_d(3K_d + 4G_d)/6(K_d + 2G_d)] \quad (\text{eq.5-9})$$

Cependant les équations 5-7 et 5-8 peuvent s'écrire :

$$dK/(K_d - K) + 3dK/(3K + 4G_d) = d\phi \quad (\text{eq.5-10})$$

$$dG/(G_d - G) + dG/(G + G_d) = d\phi \quad (\text{eq.5-11})$$

Si on considère que le coefficient de poisson de la phase matrice varie entre $1/5 < \nu_m < 13/50$, à partir de l'équation 5-6 et après transformation, on peut mentionner que pour les deux valeurs extrêmes de ν_m l'expression de l'équation 5-6 prend la même forme à l'exception des paramètres (a_x, b_x, c_x, d_x avec $x=1$ ou 2) qui diffèrent pour les deux valeurs extrêmes et s'écrit alors :

$$dE = [(a_1E_d - a_2E)/(b_1E_d - b_2E) + (c_1E_d - c_2E)/(d_1E_d - d_2E)]d\phi \quad (\text{eq. 5-12})$$

$a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2$ sont des paramètres qui changent en fonction de chaque valeur de ν_m et E_d .

Après intégration, aux limites de $E \rightarrow E_m$ pour $\phi = 0$

$$\phi = \alpha_1 \log(E/E_m) + \lambda_1/\gamma_1 \log((E - x_1)/(E_m - x_1)) + \lambda_2/\gamma_2 \log((E - x_2)/(E_m - x_2)) \quad (\text{eq. 5-13})$$

$\alpha_1, \lambda_1, \lambda_2, x_1, x_2, \gamma_1, \gamma_2$: constantes

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= (b_1d_1/a_1d_1 + c_1b_1) \\ \beta_1 &= b_1d_2 + b_2d_1 - \alpha_1(a_1d_2 - a_2d_1 + c_1b_2 - c_2b_1) \\ \beta_2 &= b_2d_2 + b_2d_1 + \alpha_1(a_2d_2 + c_2b_2) \\ \gamma_0 &= a_1d_1 + c_1b_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= a_1 d_2 - a_2 d_1 - c_2 b_1 + c_1 b_2 \\ \gamma_2 &= -a_1 d_2 - c_2 b_2 \\ \Delta &= \gamma_1^2 - 4\gamma_0 \gamma_2 \\ x_1 &= (-\gamma_1 - \sqrt{\Delta}) / 2\gamma_2 \\ x_2 &= (-\gamma_1 + \sqrt{\Delta}) / 2\gamma_2 \\ \lambda_1 &= (\beta_2^2 x_2 - \beta_2 x_1 - \beta_1 - \beta_2 x_2) / (\beta_2 x_2 - x_1) \\ \lambda_2 &= \beta_1 + \beta_2 x_2 / (\beta_2 x_2 - x_1) \end{aligned}$$

En se basant sur le rapport E_d/E_m , et tenant compte des plages de valeurs des modules d'élasticité de la matrice et du caoutchouc (cf. Tableau 5-4), huit cas se présentent :

- Cas N°01 : Il est obtenu pour $\nu_m = 1/5$, $E_d = 1,97 \text{ MPa}$ et $E_m = 56\,860 \text{ MPa}$.
- Cas N°02 : Il est obtenu pour $\nu_m = 1/5$, $E_d = 1,97 \text{ MPa}$ et $E_m = 21\,000 \text{ MPa}$.
- Cas N°03 : Il est obtenu pour $\nu_m = 1/5$, $E_d = 5\,000 \text{ MPa}$ et $E_m = 56\,860 \text{ MPa}$.
- Cas N°04 : Il est obtenu pour $\nu_m = 1/5$, $E_d = 5\,000 \text{ MPa}$ et $E_m = 21\,000 \text{ MPa}$.
- Cas N°05 : Il est obtenu pour $\nu_m = 13/50$, $E_d = 1,97 \text{ MPa}$ et $E_m = 56\,860 \text{ MPa}$.
- Cas N°06 : Il est obtenu pour $\nu_m = 13/50$, $E_d = 1,97 \text{ MPa}$ et $E_m = 21\,000 \text{ MPa}$.
- Cas N°07 : Il est obtenu pour $\nu_m = 13/50$, $E_d = 5\,000 \text{ MPa}$ et $E_m = 21\,000 \text{ MPa}$.
- Cas N°08 : Il est obtenu pour $\nu_m = 13/50$, $E_d = 5\,000 \text{ MPa}$ et $E_m = 56\,860 \text{ MPa}$.

Toutefois, les cas limites sont représentés par valeurs extrêmes du rapport E_d/E_m soit :

- Le couple de valeurs $E_d = 1,97 \text{ MPa}$ et $E_m = 56\,860 \text{ MPa}$ représente la limite inférieure.
- Le couple de valeurs $E_d = 5\,000 \text{ MPa}$ et $E_m = 21\,000 \text{ MPa}$ représente la limite supérieure.

Pour ces deux (02) valeurs limites, on peut tracer les courbes représentant le module du composite « E » en fonction de la fraction

volumique ϕ déterminée par l'équation 5-12, pour les deux valeurs de ν_m sachant que $1/5 < \nu_m < 13/50$.

5.7 Résultats et discussion

A partir de la relation (eq.5-12), un graphe représentatif du module d'élasticité du composite en fonction de la fraction volumique est illustré dans la figure 5-1. Il est important de noter que les sources bibliographiques permettent de scinder les G.C en fonction de leurs dimensions et de la nature de substitution, mais pour des raisons pratiques, dans le cadre de notre contribution, aucune distinction n'est faite entre les trois catégories citées plus haut.

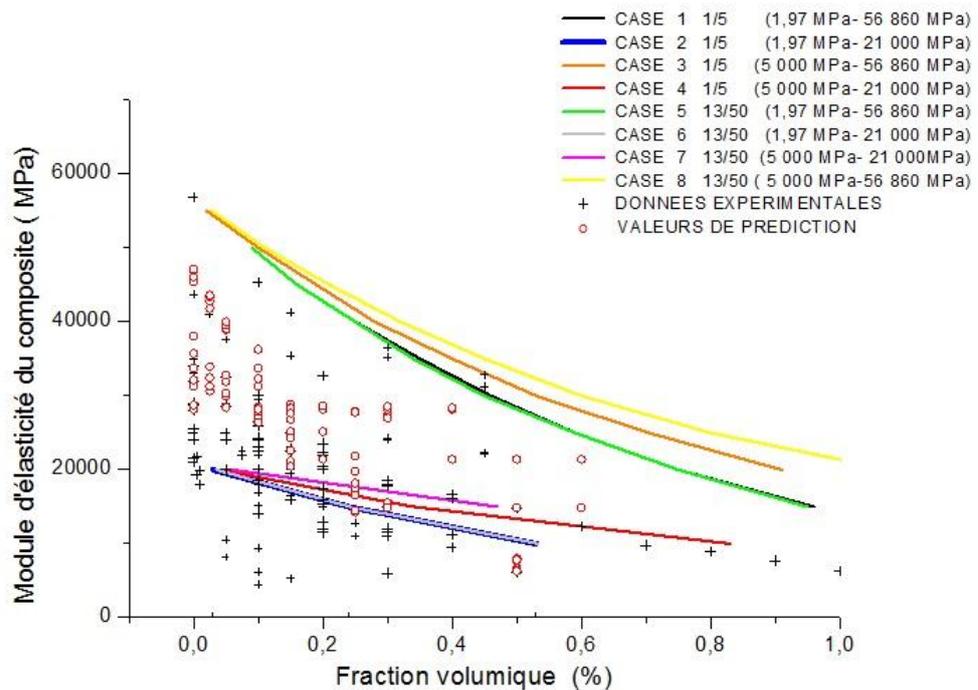


Figure 5.1 Prédiction par le modèle du module d'élasticité du composite en fonction de la fraction volumique

La figure 5-1 montre des comparaisons entre des données expérimentales et des prédictions de modèle. La figure montre les courbes limites du modèle lorsque le module d'élasticité de la matrice est compris

entre ($21\ 000\ \text{MPa} < E_m < 56\ 800\ \text{MPa}$). La plupart des ensembles de données expérimentales sont limités entre ces courbes limites comme indiqué schématiquement sur la figure. Les courbes limites sont représentées par : le cas N°05 soit avec un coefficient de poisson de la matrice de 13/50 pour des valeurs de ($E_d = 1,97\ \text{MPa}$, $E_m = 56\ 860\ \text{MPa}$) et le cas N°02 lorsque le coefficient de poisson de la matrice est de 1/5 quand ($E_d = 1.97\ \text{MPa}$, $E_m = 21\ 000\ \text{MPa}$).

Notons que les courbes pour les cas n°1, 3, 5 et 8 définissent la limite supérieure. Contrairement les courbes n°2, 4,6 et 7 définissent la limite inférieure.

Pour les valeurs extrêmes du rapport E_d/E_m citées précédemment, les courbes représentant les cas n°01 et n°07 correspondant à des valeurs du coefficient de poisson de 1/5 et 13/50 respectivement et encadrent bien les valeurs expérimentales et les valeurs prédites.

Toutefois il y a lieu de noter que les courbes correspondant aux cas n°2 et n°6 offrent une meilleure limite inférieure pour encadrer mieux les valeurs expérimentales et les valeurs prédites.

Certaines courbes ont tendance à se confondre notamment celles des cas n°2 et n°6, et celles des cas n°1 et n°5.

Il est clair toutes les courbes encadrent convenablement les valeurs expérimentales et les valeurs prédites, néanmoins certaines d'entre elles offrent un meilleur encadrement en ayant des courbes enveloppes plus resserrées.

Notons que certaines valeurs expérimentales se trouvent en dehors des limites, ceci peut être expliquée par l'origine et la nature des G.C qui diffèrent.

A partir de ce constat, il est évident que le modèle adopté fournit de bons résultats en termes d'encadrement des valeurs expérimentales et des valeurs prédites.

5.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué la théorie des composites particuliers aux bétons incorporant des granulats de caoutchouc issus du broyage des pneus usés avec l'objectif de trouver une prédiction du module d'élasticité, valeur parfois coûteuse et difficilement mesurable expérimentalement.

Pour ce faire, des hypothèses ont été émises sur le module d'élasticité et le coefficient de poisson des différentes phases : matrice et renfort. Ces hypothèses sont justifiées expérimentalement par les auteurs en fixant un domaine d'étude pour ces deux paramètres. Partant de ces hypothèses, une nouvelle méthodologie a été développée.

Tenant compte de l'impossibilité de trouver une solution exacte pour les systèmes concentrés tels que les B.I.G.C, et se basant sur la solution exacte obtenue pour les milieux dilués infinis, un nouveau modèle originale a été exploité pour la prédiction et l'encadrement du module d'élasticité des B.I.G.C.

Les résultats obtenus sont comparés à ceux d'autres travaux expérimentaux publiés par certains auteurs en vue d'évaluer la capacité du modèle. La méthode proposée repose sur des fondements mathématiques exacts. Elle permet de prédire le module d'élasticité des B.I.G.C. Cette nouvelle approche fournit des bornes supérieures et inférieures optimales du comportement d'un matériau composite élastique à deux phases : matrice et inclusion (ou renfort). Les confrontations montrent que les valeurs expérimentales s'insèrent dans le fuseau délimité par le modèle d'une part. D'autre part les résultats de prédiction obtenus par la méthode des réseaux de neurones sont bien encadrés par les limites obtenues par le modèle.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE

L'objectif premier dans cette thèse était de proposer des outils d'optimisation permettant la prédiction du comportement mécanique des bétons incorporant des granulats de caoutchouc. La démarche adoptée vise à exploiter dans le domaine de validité l'approche par la méthode des réseaux de neurones. Cette approche explicite fournit des prédictions du comportement élastique linéaire d'un béton léger constitué de deux phases élastiques, linéaires caractérisées par des rigidités fortement contrastées. En s'appuyant sur des travaux expérimentaux cités dans la littérature, le volet théorique a été abordé en exploitant une technique d'optimisation dédiée à la prédiction. L'utilisation de cet outil de prédiction a été précédée d'une analyse statistique. Partant de certaines connaissances auxquelles s'accordent l'ensemble des chercheurs à savoir le rapport eau/ciment, le superplastifiant et le squelette granulaire, les prédictions des propriétés mécaniques telles que la résistance en compression et le module d'élasticité ont été abordées par une étude statistique au préalable. Il est important de noter que les paramètres clés ont été judicieusement choisis en raison de leur importance dans la composition des bétons incorporant les granulats de caoutchouc. Dans cette contribution, les trois paramètres clés cités plus haut constituent l'idée de départ dans la prédiction des résistances en compression et du module d'élasticité par la méthode des réseaux de neurones. L'analyse statistique adoptée a permis de constater sa limitation vis à vis de certains paramètres importants tels que le coefficient de détermination. En effet, ces coefficients restent très faibles. A partir de là, s'impose l'utilisation de la méthode des réseaux de neurones. L'exploitation d'un tel outil a permis de mettre en avant sa capacité de prédiction. En effet, les critères de performances satisfaisants obtenus à l'issue de la conception du premier modèle dédié à la prédiction de la résistance en compression des B.I.G.C, s'avèrent très intéressants avec des valeurs du coefficient de corrélation proches de l'unité, des erreurs quadratiques moyennes et des erreurs absolues moyennes faibles, ce qui prouve l'efficacité de la méthode choisie.

Un deuxième modèle a été élaboré en vue de prédire le module d'élasticité en utilisant la méthode des réseaux de neurones. Les résultats ont été évalués à travers les critères de performance qui s'avèrent aussi intéressants. Les deux modèles de prédiction de la résistance en compression et du module d'élasticité montrent largement que le choix de la méthode des réseaux de neurones est approprié à la prédiction des caractéristiques mécaniques considérées.

Dans la littérature citée dans le premier chapitre, d'autres propriétés mécaniques des B.I.G.C. sont affectées et restent étroitement liées à l'incorporation des G.C. En effet, à l'état frais, tous les auteurs confirment que les propriétés rhéologiques sont affectées par cette adjonction à savoir l'ouvrabilité, la masse volumique et l'air occlus par une maniabilité

acceptable, une masse volumique plus faible et une teneur en air occlus croissante avec l'adjonction. Il en est de même à l'état durci ou certaines caractéristiques telles que la résistance en traction s'avère moins importante avec l'adjonction des G.C, alors que le retrait est plus élevé dans le cas des B.I.G.C. Malgré une chute de la résistance en flexion, les B.I.G.C permettaient d'atteindre des flèches plus importantes avant rupture et une ténacité élevée en comparaison au béton de référence. En dernière étape, un nouveau modèle de prédiction a été élaboré en se basant sur la solution exacte dédiée aux milieux dilués infinis. Le composite B.I.G.C est traité en tant que système concentré dont on ne peut trouver la solution exacte. De nouvelles équations du module d'élasticité pour les milieux composites concentrés tels que les B.I.G.C ont été dérivées en utilisant le schéma différentiel réservé aux systèmes dilués infinis. En effet, en considérant le composite particulier B.I.G.C avec une fraction volumique initiale, les inclusions sont associées au composite par petites quantités. L'incrément du module d'élasticité augmente au fur et à mesure de cette incrémentation d'inclusions. Le composite est traité comme un milieu effectif équivalent à chaque fois qu'on introduit de petites quantités d'inclusions. Une confrontation aux résultats expérimentaux issus de la littérature et portant sur le module d'élasticité d'une part, et d'autre part les prédictions du module d'élasticité obtenues par la méthode R.N.A, a montré que le modèle basé sur la solution exacte des systèmes dilués infinis, encadre aussi bien les valeurs expérimentales que les prédictions, ce qui confirme la capacité du modèle en terme d'encadrement.

Notre contribution s'ouvre sur différentes perspectives :

La perspective d'intégrer d'autres paramètres tels que l'interface est de mise. En effet, à l'échelle mésoscopique, les B.I.G.C sont généralement modélisés comme un matériau composite pour expliquer leur comportement sous contraintes, physiques, mécaniques ou chimiques. Selon cette approche, un modèle à deux phases (granulat de caoutchouc et matrice) n'est généralement pas suffisant parce que la pâte de ciment ne peut pas être considérée comme une phase homogène. La microstructure de la pâte de ciment est modifiée au voisinage des granulats de caoutchouc. Cette zone d'interface entre les G.C et le mortier ou béton est souvent appelée auréole de transition ou Interfacial Transition Zone (ITZ). De nombreuses propriétés de B.I.G.C doivent être analysées en considérant le B.I.G.C comme composite à trois phases, granulat, ITZ et matrice (mortier ou béton). Cette auréole gouverne la qualité de l'adhérence entre le mortier et les G.C, et par conséquent la résistance de leur liaison et celle du composite explicitement. De nouvelles bases de données expérimentales riches et variées permettront d'alimenter de nouveaux modèles avec un nombre important de variables. Cette multitude de modèles pourrait être envisagée à l'effet de mettre en avant cette interaction. La prise en compte de l'état frais considéré de façon isolé ouvre une perspective d'exploration des trois grandes lignes seules ou en

interaction à savoir ; l'ouvrabilité, masse volumique et air occlus, aussi bien dans le domaine élastique linéaire ou viscoélastique. De même pour l'état durci, une multitude de modèles pourrait être conçus pour explorer les caractéristiques mécaniques seules ou en interaction, aussi bien dans le domaine élastique linéaire ou viscoélastique. Par ailleurs de nouvelles voies s'ouvrent sur des interactions physiques à prendre en compte pour approcher le comportement mécanique des B.I.G.C à une échelle nanométrique. Cette voie constitue un enjeu technologique majeur où se trouvent étroitement mêlés physique, chimie, mécanique et statistique. Des couplages multi physiques peuvent être étudiés entre les différentes approches multidisciplinaires. La connaissance des outils modernes de caractérisations à l'échelle nanométrique est loin d'être satisfaite. La maîtrise des caractéristiques mécaniques passe par la connaissance et la compréhension des phénomènes et mécanismes physiques qui régissent ces propriétés, du macroscopique au nanométrique et restent incontournables entre l'étape d'élaboration du matériau B.I.G.C et de son application technologique. En plus, dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la mise en œuvre de nouvelles équations du module d'élasticité des bétons incorporant des granulats de caoutchouc se basant sur les systèmes dilués infinis. Des approches similaires pourraient être étendues en tenant compte du phénomène d'empilement des granulats de caoutchouc. D'autres approches pourraient être envisagées pour étendre cette modélisation à la partie non linéaire. L'ensemble des perspectives envisagées vise à développer des outils prédictifs performants qui se révèlent d'autant plus intéressants que ces phénomènes, très lents, nécessitent des campagnes expérimentales très longues.

Bibliographie

- [Abd 11a] **ABDULLA, A, I, AHMED, S, H**, « Effect of rubber treated by acidic solution on some mechanical properties of rubberized cement mortar », *EngTec Jour*, 29 (13), 2011, 2793-2793.
- [Abd 10] **ABDULLA, A, I, AULES, W, A, AHMED, S, H**, « Cement mortar properties contain crumb rubber treated with alkaline materials », *Mod Sci*, 4 (12), 2010, 146-163.
- [Abd 11] **ABDOLLAHZADEH, A, MASOUDNIA,R, AGHABABAEI,S**, « Predict strength of rubberized concrete using artificial neural network», *wis trans on comp*, 2011, 10(2), 31-38.
- [Al-M 01] **AL-MASHHASANI,J**, « Physical properties and impact resistance of rubber tire waste concrete», Faculty of civil Engineering research Report. Bag: Mil Col of Eng, 2001.
- [Aie 10] **AIELLO, M, A, LEUZZI,F**,« Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state », *Was Man*; 30, 2010, 1696-1704.
- [Akh 04] **AL-AKHRAS, N, SAMADI, M,M**, « Properties of tire rubber ash mortar », *Cement and Concrete Composite*,26, 2004, 146-163.
- [Alb 05] **ALBANO, C, CAMACHO, N, REYES, J, FELIU, J,L,HERNANDEZ, M**, «Influence of scrap rubber to portland I composites : destructive and non-destructive testing», *Comp Struc*,71, 2005, 439-446.
- [Ant 14] **ANTIL, Y,VERMA, V, SINGH, B** « Performance of rubberized concrete with crumb rubber », *Inter Jour Res*, 2014, 1481-1483.
- [Aul 11] **AULES , W, A**, « Utilization of crumb rubber as partial replacement in sand for cement mortar », *EuropJournSci Res*, 51 (2),2011,203-210.
- [Azm08] **AZMI, N, J, MOHAMMED, B,S, AL-MATTARNEH, H, M, A,,** « Engineering properties of concrete with recycled tire rubber », *InternConf on Constr and Build tech ICCBT*, Kuala Lumpur, Malaysia, B (34), 2008,373-382.

- [Bag 99] **BAGHLI , L**, « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 1999
- [Bal 07] **BALAHA, M, M, BADAWY, A, A, M, HASHISH, M**, «Effect of using ground tire rubber as fine aggregate on the behavior, of concrete mixes», *Indi Jour Eng Mat Sci*, 14, 2007, 427-435.
- [Bat 08] **BATAYNAH, M, MATRIE, I, ASI, I**, Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries », *WastMana*, 28, 2008, 2171-2176.
- [Ben 04] **BENAZZOUK, A, DOUZANE, O, QUÉNEUDEC, M**, « Transport of fluids in cement-rubber composites», *Cemt and Conc Comp*, 26, 2004, 24-29.
- [Big 06] **BIGNOZZI, M, C, SANDROLINI, F**, « Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete », », *Cem and Conc Rese*, 36, 2006, 7365-739.
- [Bil 09] **BILIM, C, ATIS C, D, T, H, K, O.,** « Predicting the compressive strength of ground granulated blast furnace slag concrete using artificial neural network», Paris : Dunod, 1999, 325.
- [Bin 13] **BINGÖL, A, F, TORTUM, A, GÜL, R**, « Neural networks analysis of compressive strength of lightweight concrete after high temperatures », *MatDesi* 52, 2013, 258-264.
- [Biw01] **BIWA, S, ITO, N, OHNO, N**, « Elastic properties of rubber particles in toughened PMMA: ultrasonic and micromechanical evaluation », *MechMat*, 33, 2001, 717-728.
- [Bra87] **BRAEM, M, VAN DOREN, V, E, LAMBRECHTS, P, VANHERLE, G**, « Determination of young's modulus of dental composites: a phenomenological model », *Journ Mater Sci*, 22, 1987, 2037-2042.
- [Bra87] **BRAEM, M, FINGER, W, VAN DOREN, V, E, LAMBRECHTS, P, VANHERLE, G**, « Mechanical properties and filler fraction of dental composites. », *Dent Mater*, 5, 1989, 346-349.
- [Brav 12] **BRAVO, M, De BRITTO, Jorge** «Concrete made with used tyre aggregate durability-related performance», », *JournCleaProd*, 25, 2012, 42-50.

- [Chr79] **CHRISTENSEN, R, M** «Mechanics of composite materials », New York, Wiley, 1979.
- [Chr90] **CHRISTENSEN, R, M** «A critical evaluation for a class of micromechanics models », J MechPhys Sol, 38,1990, 379-404.
- [Chu 11] **CHUNLIN, L, KUNPEG, Z, DEPENG, C,** «Possibility of concrete prepared with steel slag as fine and coarse aggregates: a preliminary study», ProcEng, 24, 2012, 412-416..
- [Col 06] **COLOM, X, CARILLO, T, CANAVATE,J,** « Composites reinforced with re-used tyres: surface oxidant treatment to improve the interfacial compatibility», Comp A, App Sci Man, 38 (1),2007,44-50.
- [Cor 2010] **CORREIA, S,L, PARTALA, T, L, RELIPE, C, SEGADAES, A,M,** « Factorial design used to model the compressive strength of mortars containing recycled rubber », Comp and struc,92, 2010, 2047-2051.
- [Cuo 10] **COUNG, M, H, A** « Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés : Application aux éléments de grande surface », Thèse de doctorat, 2010, Université Toulouse.
- [Cuo 12] **CUONG, A, H, TURATSINZE, A, RASHID, H, CHINH, V, D,** «Effects of rubber aggregates from grinded used ryres on the concrete resistance, to cracking», », Jour Clea Prod, 23, 2012, 209-215.
- [Elc 15] **ELCHALAKANI, M,** « High strength rubberized concrete containing silica fume for the construction of sustainable road side barriers », Stru, 1, 2015, 20-38.
- [Eld 93] **ELDIN, N, N, SENOUCI, A,B**« Rubber tire particles as concrete aggregate », Jour of Mat and civ Eng, ASCE 5, 1993, 478-496.
- [Eir 14] **EIRAS, J, N, SEGOVIA, F, BORRACHERO, M, V, MONZO, J, BONILLA, M, PAYA, J.,** « Physical and mechanical properties of foamed portland cement composite containing crumb rubber from worn tires », Mat Des, 59,2014, 550-557.
- [Erk 95] **ERKAN, Il, A, BS, I,** «Determination of brittleness index of rubberized concretes», Osmangazi» Thesis, Un Fat of Engineering &Dept of civil Engineering eskiphir, Turkie,1995.

Rahali Bachir

Thèse de doctorat en sciences / 2018
Université DjillaliLiabés Sidi Bel Abbés

- [Gan09] **GANJIAN, E, KHORAMI,M, MAGHSOUDI, A, A**, « Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete », *Cons and Buil Mat*, 23, 2009, 1828-1836.
- [Gar 07] **GARROS, M**, « Composites cimentaires incorporant des granulats caoutchouc issus du broyage de pneus usagés : optimisation de la formulation et caractérisation », Thèse de doctorat, 2007, Université Toulouse III Paul Sabatier
- [Gaw 04] **GAWESKA, H, I, ,** « Comportement à haute température, des bétons à haute performance », Thèse de doctorat, 2004, Ecole Nationale des ponts et Chaussées et école polytechnique de Cracovie.
- [Gis 14] **GISBERT,A, N, BORELL, J.M.G, GARCIA, F, PARRES, SANCHIS,E,J, AMORES, J.E,CRESPO, ALCARAA, S, VICENTE,F,S**, « Analysis behaviour of static and dynamic properties of Ethylene-Propylene-Diene-Methylene crumb rubber mortar», *Cons Buil and Mat*,50, 2014, 671-682.
- [Ges 10] **GESOGLU,M, GÜNEYISI, E, HANSU, O, IPEK, S, D, ASAAD, S**,« Influence of waste rubber utilization on the fracture and steel–concrete bond strength properties of concrete », *Cons and Buil Mat*, 101,2015, 1113–1121.
- [Ges 14] **GESOGLU, M, GÜNEYISI, E, KHOSHNAW, G, IPEK, S** « Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers », *Con and Buil Mat*, 63, 2014, 206-213.
- [Ges 11] **GESOGLU, M, GÜNEYISI, E**, « Permeability of self-compacting rubberized concrete», *Const and Buil Mat*, 25, 2011, 3319-3326.
- [Gün04] **GÜNEYISI, E, GESOGLU, M,ÖZTURAN, T**, « Properties of rubberized concretes containing silica fume. », *Cemt and ConcRes*,34, 2004, 2309-2317.
- [Guo 14] **GUO, Y , C, ZHANG, JIAN, H, CHEN, GUANG, M, X, ZHI, H**, « Fracture behaviors of a new steel, fiber reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber», *Const and Buil Mat*, 53, 2014, 32-39.
- [Guo 14] **GUO, Y , C, ZHANG, JIAN, H, CHEN, GUANG, M, X, ZHI, H**, « Compressive behavior of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates, rubber crumb and reinforced with steel fibre, subjected to elevated temperatures», », *Jour Clea Prod*, 72, 2014, 103-203.

- [Guo 04] **GUOQIANG, L, MICHAEL, A, S, GREGORY, G, JOHN, E, CHRISTOPHER, A, BAOSHAN, H**, « Development of waste tire modified concrete », *Cem and ConcRes*, 34(12), 2004, 2283-2289.
- [Hal76] **HALPIN, J, C, KARDOS, J, L**, « The Halpin-Tsai equations: a review », *PolymEngSci*, 16, 1976, 344-352.
- [Has62] **HASHIN, Z**, « The elastic moduli of heterogeneous materials », *J ApplMech*, 29, 1962, 143-150.
- [Heb 49] **HEBB, D**, « The Organization of Behavior », New York: Wiley, 1949.
- [Hen 02] **HEN HU, Y, HWANG NENG, J**, « Handbook of neural network signal processing », CRC , Press LLC, United States of America, 2002.
- [Her 07] **HERANDEZ-OLIVARES, F, BARLUENGA, G, PARGA-LANDA, M, WITOSZEK, B** «Fatigue behavior of recycled tyre rubber-filled concrete and its implications in the design of rigid pavements», », *Cons and Buil Mat*, 21, 2007, 1918-1927.
- [Her 54] **HERSHEY, A, V**, «The elasticity of an isotropic aggregate of anisotropic cubic crystals», *J . Appl. Mech*, 21, 1954, 226-240.
- [Hil65] **HILL, R**, «A self-consistent mechanics of composite material», *J MechPhys Sold*, 13, 1965, 213-222.
- [Hol 14] **HOLMES, N, DUNE, K, O'DONNELL, J**, « Longitudinal shear resistance of composite slabs containing crumb rubber in concrete toppings », *Cons and Build Mat*, 55, 2014, 365-378.
- [Hop 82] **HOPFIELD, J**, « Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 79, 1982, 2554-2558.
- [Hua 13] **HUYANG, Xiaoyan, RANADE, Ravi, NI, Wen,, Li, VICTOR, C**, On the use of recycled tire rubber to develop low E-modulus ECC for durability concrete repairs.», *Const Build and Mate*, 46, 2013, 134-141.
- [Ibr 04] **IBRAHIM A, M**, « Fuzzy logic for embedded systems applications », Newnes Edition, United States of America, 2002.

- [Ish67] **ISHAI, O, COHEN, J, L**, «Elastic properties of filled and porous epoxy composites »IntJ MechSciPergamon Press Ltd,9,1967,539-546.
- [Iss 13] **ISSA, C,A, SALEM, G**, « Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in correct mix design», Const and Buil Mat, 42, 2013, 48-52.
- [Jin 08] **JINGFU, K, YONGQI, J**, « Improvement of cracking-resistance and flexural behavior of cement-based materials by addition of rubber particles», JWuhUniv Tech Mat Sci Ed, 2008, 379-383.
- [Kal 05] **KALOUSH, K, E, W, G, B, Z ,H**,« Properties of Crumb Rubber Concrete », Transportation Research Record. Jour of the Trans Res Boa, Volume 1914, 2005.
- [Ker56] **KERNER, E, H**The elastic and thermoelastic properties of composite media », ProcPhysSoc London B,69, 1956, 808.
- [Kha 08] **KHALOO, A, DEHESTANI, M, RAHMATABADI, P**, « Mechanical properties of concrete containing high volume of tire- rubber particles », Was Man,28, 2008, 2472-2482.
- [Kha 99] **KHATIB, Z,K, BAYOMY, F, M** « Rubberized Portland cement concrete », Material civil Engineering, 11 (3), 1999, 206-213.
- [Kro 96] **KROSE, B, DER SMAGT, P,V**,« An Introduction to neural networks », Eighth edition,The University of Amsterdam, 1996,1-2.
- [Lee 98] **LEE, H, S, LEE, H, MOON, J, S, JUNG, H, W**, « Development of tire-added latex concrete », ACI Mater J,95(4),1998, 356-364.
- [Li98] **LI, Z, L, F, LI, J, S, L**,«Properties of concrete incorporating rubber tyre particles », MagConcRes, 50(4), 1998, 297-304.
- [Liu 13] **LIU, F, ZHENG, W, LI, L, F, WENXIAN, N, G** « Mechanical and fatigue performance of rubber concrete», Cons and Build Mat, 47, 2013, 711-719
- [Mar 13] **MARQUES, A, M, CORREIA, J, R, DE BRITO, J,,** « Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled rubber aggregate», », Fir Saf Jour, 58, 2013, 49-57.

- [McC 43] **MC CULLOCH, W, PITTS, W**, « A Logical Calculus for the Ideas Immanent in Nervous Activity », Bull of MathBiop, 05, 1943, 115-133.
- [Moh 12] **MOHAMMED,B, S, HOSSAIN, K, M, ANWAR, S, JACKSON,T, ENG, G**, « Properties of crumb rubber hollow concrete block», », JourClea Prod, 23, 2012, 57-67.
- [Naj 12] **NAJIM, K, B, HALL, Ma, R**, «Mechanical and dynamiv properties of self-compacting crumb rubber modified concrete», », Const and Build Mat, 27, 2012, 521-530.
- [Ngu 10] **NGUYEN, T, H, TOUMI, A, TURATSINZE**, « Mechanical properties of steel fibre reinforced and rubberized cement-based mortars », Mat Des, 31, 2010, 641-647
- [Oik 09] **OIKONOMOU, N, MAVRIDOU, S**, « Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires », Cem and ConcCompe, 31, 2009, 403-407.
- [Onu 14] **ONUAGULUCHI, O, PANESAR, D, K**, « Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume », Jour Clea Prod, 82, 2014, 125-131.
- [Oul 05] **OULD ABDESLAM, D**, « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques: application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension», Thèse de doctorat, Université de Haute-Alsace, France, 2005.
- [Özc 09] **ÖZCAN, F, ATIS, C,D, KARAHAN, O, UNCUOGLU, E, TANYILDIZI, H**, « Comparison of artificial neural network and fuzzy logic models for prediction of long-term compressive strength of silica fume concrete »,Adva in EngSofte 40(9), 2009,856-863.
- [Pal 05] **RAJINDER, P**, « New models for effective young's modulus of particulate composites »,Comp : Part B, 36, 2005, 513-523.
- [Pap 06] **PAPAKONSTANTINOOU , C, G, TOBOLSKI, M, J**, « Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete »,cemt and concRes, 36, 2006, 1686-1691.
- [Ped 13] **PEDRO, D, de BRITO, J, VEIGA, R**, « Mortars made with fine granulate from shredded tires », Jour of Mat and CiviEng, ASCE, 25, 519-529.

Rahali Bachir

Thèse de doctorat en sciences / 2018
Université DjillaliLiabés Sidi Bel Abbés

- [Pel 11] **PELISSIA, F,ZAVARISE, N, LONGO, T, ARENT, B, ADRIANO, M,** « Concrete made with recycled tire rubber : Effect of alkaline activation and silica fume addition», Jour Clean Prod,19, 2011, 757-763.
- [Rag 98] **RAGHAVAN, D, HUYNH, H,** «Workability, mechanical properties and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite», Journal of Mat Science, 33, 1998, 1745-1752.
- [Raj 11] **RAJ, B, GANESAN, N, SHASHIKALA, A, A,**« Engineering properties of self-compacting rubberized concrete », JourlReinfPlas of Comp,30(23), 2011, 1923-1930.
- [Rah 18] **RAHALI, B, AISSA MAMOUNE, S, M, TROUZINE, H,**« Using artificial neural networks approach to estimate compressive strength for rubberized concrete», peri poly CivEngi, 2018, OnlineFirst paper 11928, <https://doi.org/10.3311/PPci.11928>.
- [Rah 12] **RAHMAN, M, M, USAMA, M, AL-GHARIB, A, A,** « Fundamental properties of rubber modified self-compacting concrete (RMSCC) », Const and Build Mat, 36, 2012, 630-637.
- [Rag 12] **RAGHAVAN, D, H, H,**« Worekability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite.», Jour of Mat Sci,33,1998,1745-1752.
- [Ren 02] **REN, L, ZHAO, Z,** « An optimal neural network and concrete strength modeling », Adv in Eng Soft, 33 (3), 2002, 117-130.
- [Ros 62] **ROSENBLATT, F,** « A Logical Calculus for the Ideas Immanent in Nervous Activity », Bull Math and Bio, 05, 1943, 115-133.
- [Rum 86] **RUMELHART DE, H, GE, W, R, J,**« Learning internal representations by error propagation », In: Rumelhart and J. McClelland Editors. ProcParalldistrprocefoun, 1, Cambridge: MIT Press, 1986, 318-362.
- [Sar 09-a] **SARIDEMIR, I.C,** « Prediction of compressive strength of concretes containing metakaolin and silica fume by artificial neural networks », Adv in Eng Soft, 40 (5), 2009, 350-355,
- [Sar 09-b] **SARIDEMIR, I.C,** « Predicting the compressive strength of mortars containing metakaolin by artificial neural networks and fuzzy logic », Adv. Eng. Soft, 40 (9), 2009,920-927.

Rahali Bachir

Thèse de doctorat en sciences / 2018
 Université Djillali Liabés Sidi Bel Abbés

- [Skr 07] **SKRIPKIUNAS,G, GRINYS, A, CERNIUS, B,** « Deformation properties of concrete with rubber waste additives», *Mat Sci*,13 (03), 2007,219-223.
- [Smi74] **SMITH, J, C,** « Correction and extension of van der Poel's method for calculating the shear modulus of a particular composite», *Jour Res Nat Burr Stand (USA)*, 78 A, 1974, 355-361.
- [Smi75] **SMITH, J, C,** Simplification of van der Poel's formula for the shear modulus of a particulate composite», *J. Res Nat Burr Stand (USA)*, 79 A, 1975, 419-423.
- [Soh 03] **SOHN,M, S, KIM, K, S, KIM, J, K,**« Dynamic mechanical properties of particle-reinforced EPDM composites», *J ApplPolym Sci*,87, 2003, ,1595-1601.
- [Son 10] **SON, K, S, HADJIRASOULIHA, I,PILAKOUTAS, K,** « Strength and deformability of waste tyre rubber-filled reinforced concrete columns », *Const and Build Mat*, 25, 2010, 218-226.
- [Suk 12]**SUKONTASUKKUL, P,TIAMLOM,Ki,** « Expansion under water and drying shrinkage of rubberized concrete mixed with crumb rubber with different size », *Const and Build Mat*, 20, 2012, 450-457.
- [Suk 06] **SUKONTASUKKUL, P, CHAIKAEW, C,** « Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber with different size », *Const and Build Mat*, 20, 2006, 450-457.
- [Tah 08] **TAHA, M, M, RL-DIEB, A, S, ABDELWAHAB, M, AABDELHAMEED, M,E,**« Mechanical fracture and microstructural investigations of rubber concrete », *Jour of Mat and CivEng, ASCE*, 2008, 640-649.
- [Tay 13] **AL-TAYEB, M, M, ABU BAKR, B, H, AKIL, H, M,** « Performance of rubberized and hybrid rubberized concrete structures under static and impact load conditions », *ExpMech*, 53, 2013, 377-384.
- [Tho14] **THOMAS, B, S, GUPTA, R, Ch, KALLA, P, C, L,** « Strength, abrasion and permeation, characteristics of cement concrete containing discarded rubber fine aggregates », *Const and Build Mats*,59, 2014, 205-212.
- [Top 07] **TOPÇU, I, B, DEMİR, A,** «Durability of rubberized mortar and concrete», *JMaterCivEng. ASCE*,2007, 173-178.

- [Top 10] **TOPÇU, I.B, SARIDEMIR, M F**, « Prediction of properties of waste AAC aggregate concrete using artificial neural network », Was Man, 30, 2010, 1696-1704.
- [Top 08-a] **TOPÇU, I.B, SARIDEMIR, M F**, « Prediction of rubberized mortar properties using artificial neural network and fuzzy logic », Journal of Materials Processing Technology 199 (1-3), 2008 a, 108-118.
- [Top 09] **TOPÇU,I, B, BILIR, T**« Analysis of rubberized concrete as three-phase composite material», Jour of Comp Mat,43(11), 2009, 1251-1263.
- [Tur 05] **TURATSINZE, A, BONNET, S, GRANJU, J, L,** « Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: improvement in cracking shrinkage resistance», Const and Build Mat, 21, 2005,176-181.
- [Tur 08] **TURATSINZE, A,GARROS, M,**« On the modulus of elasticity and strain capacity of self-compacting concrete incorporating rubber aggregates », Res ConsRecy, 52, 2008, 1209-1215.
- [Tur 06] **TURATSINZE, A, GRANJU, J, L, BONNET, S,**« Positive synergy between steel-fibers and rubber aggregates effect on the resistance of cement-based mortars to shrinkage cracking », CemConceRes,36,2006, 1692-1697.
- [Tur 07] **TURATSINZE, A, BONNET, S, GRANJU, J, L,** ,« Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortarsimprovementin cracking shrinkage resistance», Const Build Mat,21,2007, 176-181
- [Tur 09 a] **TURKI, M, BRETAGNE, E, ROUIS, M,J, QUENEUDEC, M,** « Microstructure, physical and mechanical properties of mortars-rubber aggregates mixtures », Const and Build Mat,23, 2009, 2715-2722.
- [Tur 09b] **TURKI, M, BRETAGNE, E, ROUIS, M, J, QUENEUDEC, M,** « Mechanical and damage behavior of mortar-rubber aggregates mixtures experiments and simulations », Mat and Stru,42, 2009, 1313-1324.
- [Tur 08-p] **TURGUT, P, YESILATA,** « Physico-Mechanical and thermal performance of newly developed rubber-added bricks », Ener Build,40, 2008, 679-688.

- [Uyg 10] **UYGUNOGLU, T, TOPÇU, I, B,** « Abrégé The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars », *Const and Build Mat*, 2010, 1141-1150.
- [Uys 12] **UYSAL, M, TANYILDIZI, H,** « Estimation of compressive strength of self-compacting concrete containing polypropylene fiber and mineral additives exposed to high temperature using artificial neural network », *Cons Build mat*, 27, 2012,404-414
- [Val 12] **VALADARES, F, BRAVO, M, DE BRITO, J,**« Concretes with used tire rubber aggregates », *MechPerf, ACI Mat Jourl*,109-M-26, 2012, 283-292.
- [Van58] **VAN DER POEL, C**« On the rheology of concentrated dispersions », *Rheo Act*, 1, 1958, 198-205.
- [Wer 74] **WERBOS, P** ,« Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences », PhD thesis, Harvard University, 1974.
- [Wu 98] **WU, K, ZHOU, J,** «The influence of the matrix-aggregate bond on the strength and brittleness of concrete, bonding in cementitious composites», S.P.Shah (eds), *Mat Res Soc, Pit*, 1998, 29-34.
- [Yeh07] **YEH, I.C,** « Modeling slump flow of concrete using second- order regressions and artificial neural networks », *Cemand Conc Comp*, 29 (6), 2007, 474-480.
- [You 14] **YOUSSEF, O, ELGAEADY,M,A,MILLS,J,E,** « An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fiber reinforced polymer tubes », *Const and Build Mat*,53, 2014, 522-532.
- [Yun 13] **YUNG, W, H, YUNG,L,C,HUA, L, H,** « A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete », *Const and build Mat*,41, 2013, 665-672.