



HAL
open science

Etudes des caractéristiques physico-chimiques de bétons de granulats recyclés et de leur impact environnemental

Kunwufine Deodonne

► **To cite this version:**

Kunwufine Deodonne. Etudes des caractéristiques physico-chimiques de bétons de granulats recyclés et de leur impact environnemental. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université de Strasbourg, 2015. Français. NNT : 2015STRAD013 . tel-01424116

HAL Id: tel-01424116

<https://theses.hal.science/tel-01424116>

Submitted on 2 Jan 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**ÉCOLE DOCTORALE MATHÉMATIQUES, SCIENCES DE
L'INFORMATION ET DE L'INGÉNIEUR**

Laboratoire Icube, Equipe Génie Civil et Energétique

THÈSE présentée par :
Kunwufine DEODONNE

Soutenue le : 10 Juillet 2015

Pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université de Strasbourg**

Discipline/ Spécialité : **Génie Civil**

**Etudes des caractéristiques physico-chimiques
des bétons de granulats recyclés et de leur
impact environnemental**

THÈSE dirigée par :

Mme FEUGEAS Françoise

Professeur, INSA de Strasbourg

RAPPORTEURS :

M. BUYLE-BODIN François

Professeur, Université Lille 1

Mme CURTIL Laurence

Professeur, Université de Lyon1

AUTRES MEMBRES DU JURY :

Examineurs

Mme BRAYMAND Sandrine

Maître de Conférences, Université de Strasbourg

M. ROUX Sébastien

Maître de Conférences, Université de Lorraine

Remerciements

Le travail de thèse présenté dans ce document s'est déroulé au sein de l'équipe Génie Civil et Energétique du laboratoire Icube. Ce fut pour moi une expérience enrichissante d'effectuer mon travail en qualité de doctorant dans le monde scientifique.

Je tiens à remercier ma directrice de thèse, le Professeur Françoise Feugeas de m'avoir donné l'opportunité de travailler au sein de l'équipe. Tout au long de ces années de thèse et malgré ses multiples responsabilités, elle n'a cessé de ménager sa disponibilité afin que je puisse bénéficier de ses compétences scientifiques, ses orientations et sa patience.

Un grand merci particulièrement à Mme Sandrine Braymand, Co-encadrante de cette thèse. Je lui suis très reconnaissant pour son soutien incommensurable, ses conseils précieux, son aide, sa méthodologie indispensable et sa patience. Tu as permis à ce que ce travail voit le jour et je te suis très sincèrement reconnaissant.

Je remercie M. François Buyle-Bodin, Professeur à l'université de Lille 1 et Mme Laurence Curtil, Professeur à l'université de Lyon 1 pour avoir accepté la lourde tâche d'être rapporteur, ainsi que Mme Sandrine Braymand, Maître de Conférences à l'université de Strasbourg et M. Sébastien Roux, maître de conférences à l'université de Lorraine pour l'honneur qu'ils me font en examinant mon travail de thèse.

Cette thèse a été réalisée avec le soutien financier de la région d'Alsace donc je tiens à remercier. Je tiens également à remercier l'entreprise CHRYSO pour avoir participé au financement de ce travail et plus particulièrement Messieurs Jean Philippe Bigas et Amjad Mallat de l'entreprise CHRYSO pour les matériels et matériaux qu'ils ont mis à ma disposition.

Je tiens à remercier de tout cœur M. Sébastien Roux pour sa disponibilité, son soutien et ses encouragements tout au long de cette thèse.

Je tiens à remercier Violaine Tinarid pour son soutien, ses conseils et son aide précieuse. Merci encore

Mes remerciements vont à l'endroit de François Pierre pour sa disponibilité et son soutien dans la réalisation de certains essais. Merci encore

Mes remerciements sincères vont également à M. Christophe Fond, Professeur et responsable de l'équipe Génie civil et énergétique et à tous les membres de l'équipe du laboratoire Icube. A ce titre, je remercie tout particulièrement Vincent Magnenet, Jian Lin, Komla Apedo, Hugo Ramiro Mercado-Mendoza et Nicolas Serres. Je tiens à les remercier pour leur

encouragement et leur soutien tout au long de cette thèse. Je tiens à mentionner le plaisir que j'ai eu à travailler dans cette équipe chaleureuse.

Mes remerciements vont également à l'endroit de M. Bernard Lickel, Directeur de l'IUT Robert Schumann pour m'avoir permis d'occuper ses locaux tout au long de cette thèse. Je ne saurais oublier tous les enseignants du département Génie Civil de l'IUT Robert Schumann plus particulièrement M. Jacques Detolle et M. Jean-David Grandgeorge.

Un grand merci à Patrice Wolff pour sa présence et son soutien dans la réalisation de certaines expérimentations. Je ne saurais oublier Mireille Texier pour son soutien.

Je salue les étudiants Stagiaires qui se sont succédés au laboratoire, ce fut un immense plaisir de travailler avec eux. Tout particulièrement, Mihalcea Constantin Cristian

Je salue toutes les autres personnes que j'ai eu l'honneur de rencontrer et de côtoyer notamment : Charlotte Münzer ; He Huan ; Quang Tam Nguyen ; Jean Benoit Kopp. Je les remercie pour les bons moments passés ensemble, les discussions enrichissantes.

Plus qu'un grand merci à mes chers Parents Feu Papa Joseph et maman Monica qui m'ont encouragé depuis mon enfance et ont su m'inculquer cette éducation afin que je puisse être ce que je suis aujourd'hui. Que le Seigneur vous bénisse abondamment. Merci aussi à Mes Sœurs Chantale, Emmerencia ; Caroline ; Mirabel ; Charlotte et Florence pour votre soutien et encouragements.

Enfin, mes pensées et mes remerciements vont à mes proches, qui sont pour moi une source d'inspiration et de motivation. Je n'oublierai pas tous mes amis pour leurs encouragements.

Merci à tous pour votre contribution à la réalisation de ce travail

Résumé

La valorisation de déchets de démolition en tant que granulats à béton présente un double objectif de préservation des ressources naturelles et de désengorgement des sites de stockage. Les granulats recyclés de béton présentent la particularité de contenir du mortier résiduel qui influence certaines de leurs propriétés et, par voie de conséquence, celles des bétons dans lesquels ils sont utilisés. Cette thèse a pour but de développer l'utilisation de bétons de granulats recyclés en remplacement total des matériaux naturels. Elle a été réalisée en partenariat industriel avec l'entreprise CHRYSO.

Une étude approfondie des propriétés des granulats recyclés de béton sur plusieurs lots (plateforme industrielle et laboratoire) a conduit à l'identification puis à l'analyse des spécificités de ces matériaux comparés aux matériaux naturels. La validité des protocoles expérimentaux a été testée, et de nouveaux protocoles ont été proposés axés sur ces spécificités. Les granulats recyclés présentent une absorption plus élevée, une résistance à l'abrasion plus faible, une distribution granulaire plus étalée et une circularité moindre que les granulats naturels. La granulométrie, la proportion d'éléments fins et l'absorption d'eau des sables recyclés sont des caractéristiques dépendantes d'une part, du prélèvement des granulats recyclés et d'autre part, de la robustesse des protocoles expérimentaux. Une réactivité des éléments fins a été démontrée pour les lots issus de laboratoire, mais son influence sur les propriétés des bétons peut être considérée de second ordre lorsque les éléments fins sont constitutifs du sable. Enfin, l'absorption et la morphologie des granulats recyclés sont dépendantes de la classe granulaire étudiée.

Des corrélations entre les propriétés morphologiques/géométriques et l'absorption ont été démontrées. A l'issue de l'analyse de ces propriétés, des corrections ou adaptations aux modèles prévisionnels de performances ont été proposées. La faisabilité de réalisation de bétons de granulats recyclés de béton avec remplacement total des matériaux naturels (BGRB à 100%) a ensuite été démontrée. Pour de tels matériaux, la conservation des éléments fins inférieurs à $63\mu\text{m}$ est conseillée car nécessaire à l'obtention d'un squelette granulaire correct.

Afin de compenser la perte d'ouvrabilité et de résistance mécanique observée avec l'utilisation des granulats recyclés de bétons, une recherche d'adjuvant a été menée et a conduit au choix de superplastifiants de la famille des polycarboxylates. Les interprétations proposées permettent de mieux comprendre la formulation des bétons de granulats recyclés de béton et des mortiers de bétons équivalents (MBE). Ainsi, la complexité des cinétiques d'absorption et de désorption d'eau conduit à une discussion autour de la notion d'eau efficace ; la différence de morphologie des granulats recyclés implique une correction du squelette granulaire ; enfin la fragilité des granulats recyclés à l'abrasion pose la question de sa prise en compte dans la détermination du squelette granulaire optimal.

Enfin, une analyse comparative des impacts environnementaux des bétons de granulats recyclés de bétons ouvre des perspectives intéressantes.

Mots clés : Bétons de Granulats Recyclés de Bétons, absorption, fines recyclées, morphologie, formulation, MBE, ACV.

Abstract

Promoting the use of demolition waste as recycled aggregates presents a double objective: first to preserve natural resources and secondly to relieve storage site. In regards to natural aggregates, recycled aggregates contain mortar that influences their properties and those of concrete in which they are used. The objective of this thesis is to develop the use of 100 % recycled aggregates in concrete. This study was realised in partnership with the company CHYRSO.

Properties of recycled concrete aggregates collected from several sources were studied to identify and analyse their specificities ; results were compared to natural ones. Normalised methods were modified in order to be applied on recycled aggregates and new methods were also proposed. Recycled aggregates present higher water absorption, lower mechanical strength, spreader granular distribution and a less circular shape compared to natural aggregates. The granulometry of recycled sand, fines content and the water absorption are properties that depend on the sampling and the robustness of protocols used. A reactivity of fines obtained from materials made at the laboratory have been established, meanwhile their influence on concrete properties is considered as minor. Finally, the absorption and morphology of recycled aggregate depend on the granular fraction.

Correlation between morphological and mechanical properties with water absorption have been demonstrated. After analysing these properties, correction were proposed on mechanical performance forecasting models. It was also shown that the use of fines in recycled aggregate concretes provides better mechanical properties. For such materials, keeping aggregates less than 63 μ m is advisable because it provides correct granular skeleton.

In order to balance the loss of workability and mechanical strength observed with the use of recycled aggregates, studies were carried with several superplasticisers. Polycarboxylates were identified as appropriate superplasticisers. Interpretations facilitate understanding of concrete formulation and concrete equivalent mortar formulation made with recycled aggregates. Thus, the complexity of absorption and desorption kinetics lead to a discussion around effective water definition. The difference between the morphology of recycled aggregates and natural ones involved a correction of the granular skeleton; finally, their weakness during mechanical test modifies the granular skeleton and need to be taken into consideration.

Finally, studies on environmental impacts of recycled aggregates concrete were done and compared with those of natural aggregates concrete. This study starts interesting perspectives.

Key Word: recycled aggregate concrete, absorption, recycled fines, morphology, design concrete, concrete equivalent mortar, life cycle assessment.

Sommaire

REMERCIEMENTS	3
RESUME	5
ABSTRACT	6
SOMMAIRE	7
ACRONYMES	9
INTRODUCTION GENERALE	13
CHAPITRE 1 - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	15
INTRODUCTION	15
1 CONSTITUANTS DES BETONS ET INTERACTIONS	18
1.1 <i>Les propriétés des bétons (rappel) : besoin/objectifs</i>	18
1.2 <i>Les constituants du béton</i>	19
1.3 <i>Méthodes traditionnelles de formulation des bétons</i>	28
2 LES GRANULATS RECYCLES DE BETON (GRB)	38
2.1 <i>Elaboration et utilisation des granulats recyclés</i>	38
2.2 <i>Les propriétés des granulats recyclés de béton (GRB)</i>	41
2.3 <i>Conclusion partielle : interactions entre propriétés des GRB</i>	57
3 LES BETONS DE GRANULATS RECYCLES (BGR).....	57
3.1 <i>Formulation des BGR</i>	58
3.2 <i>BGR à l'état frais</i>	59
3.3 <i>BGR à l'état durcissant</i>	66
3.4 <i>BGR à l'état durci</i>	67
3.5 <i>Adaptation des méthodes de formulation</i>	70
3.6 <i>Conclusion partielle : BGR et méthodes de formulation et de mise en œuvre</i>	73
CONCLUSION DU CHAPITRE 1 ET PROGRAMME D'ETUDE.....	73
CHAPITRE 2 - PROPRIETES ET SPECIFICITES DES GRANULATS RECYCLES	76
INTRODUCTION	76
1 MATERIAUX D'ETUDE ET METHODES EXPERIMENTALES.....	76
1.1 <i>Matériaux d'étude</i>	76
1.2 <i>Méthodes expérimentales</i>	79
1.3 <i>Conclusion</i>	95
2 RESULTATS	95
2.1 <i>Analyses dimensionnelles</i>	95
2.2 <i>Analyses physiques</i>	119
2.3 <i>Analyse des caractéristiques mécaniques</i>	125
2.4 <i>Propreté, réactivité et constitution</i>	128
3 SYNTHESE ET ANALYSE CRITIQUE DES RESULTATS SUR GRB	138
3.1 <i>Validation et adaptation des protocoles d'essais</i>	138
3.2 <i>Synthèse et analyse des propriétés spécifiques et interactions : influence sur les BGR</i>	140
CONCLUSION DU CHAPITRE 2	146
CHAPITRE 3 – LES BETONS DE GRANULATS RECYCLES ET LEURS METHODES DE FORMULATION	147

INTRODUCTION	147
1 COMPOSITIONS DE BGR ET METHODES EXPERIMENTALES.....	148
1.1 <i>Composition des bétons de références et mortiers équivalents</i>	148
1.2 <i>Programme d'expérimentation du screening d'adjuvants</i>	156
1.3 <i>Autres compositions de bétons et de mortiers équivalents</i>	156
1.4 <i>Description des essais à l'état frais et durci</i>	157
2 RESULTATS SUR BETONS A L'ÉTAT FRAIS ET DURCI	160
2.1 <i>Analyse comparative BGN et BGR non adjuvantés</i>	161
2.2 <i>Analyse comparative BGN et BGR adjuvantés Sélection des adjuvants</i>	163
2.3 <i>Influence du choix du squelette granulaire du GR</i>	171
3 APPLICABILITE DES METHODES DE FORMULATION USUELLES	175
3.1 <i>Validité de la méthode MBE à l'état frais pour les GR</i>	175
3.2 <i>Validité des formules prédictives de propriétés</i>	177
4 ADAPTATION DES METHODES DE FORMULATION ET DE MISE EN ŒUVRE.....	179
4.1 <i>Corrections de la méthode MBE</i>	180
4.2 <i>Modifications des paramètres de formulation et de mise en œuvre des bétons</i>	185
5 SYNTHÈSE ET ANALYSE CRITIQUE : BGR ET METHODES DE FORMULATION	194
CONCLUSION DU CHAPITRE 3	197
CHAPITRE 4 DISCUSSION ET PERSPECTIVES	199
1 PROPRIETES DES BGR LIEES AUX SPECIFICITES DES GRB	199
2 LE BGRB, UN BETON ECO-RESPECTUEUX A FAIBLE IMPACT ENVIRONNEMENTAL.....	203
2.1 <i>ACV et FDES</i>	204
2.2 <i>ACV des BGR</i>	205
3 PERSPECTIVES DE RECHERCHES SUR LES BGR ET LEURS METHODES DE FORMULATION	214
CONCLUSION GENERALE	216
TABLE DES FIGURES.....	219
TABLE DES TABLEAUX.....	223
TABLE DES EQUATIONS	226
BIBLIOGRAPHIE	227

Acronymes

Chapitre 1

Acronymes

GRB	Granulats recyclés de bétons
MBE	Mortiers de bétons équivalents
GR	Granulats recyclés
GN	Granulats naturels
BTP	Bâtiments et travaux publics
ACV	Analyse de cycle de vie
SNC	Sable naturel concassé
SNR	Sable naturel roulé
SFN	Sable fin naturel
SGN	Sable grossier naturel
SN	Sable naturel
SR	Sable recyclé
S	Sable
Gr	Gravillons
gr	Graviers
grN	Graviers naturels
GrR	Gravillons recyclés
GB	Granulat de brique
N	naturels
R	Recyclés
RCA	Recycled concrete aggregates
BGM/MAC	Béton de granulats mixte
BGN/NAC	Bétons de granulats naturels
BGR/RAC	Béton de granulats recyclés
VME	Volume mortier équivalent
ACV	Analyse de cycle de vie

Symboles

d_{10}	Diamètre du tamis qui correspond à un tamisât de 10%
d_{30}	Diamètre du tamis qui correspond à un tamisât de 30%
d_{60}	Diamètre du tamis qui correspond à un tamisât de 60%
C_u	Coefficient d'uniformité
C_c	Coefficient de courbure
E_{eff}	Eau efficace
D_{max}	Dimension maximale du granulat
D	Diamètre du plus gros grain
d	Diamètre du plus petit grain
C/E	Ciment sur l'eau
E/C	Eau sur le ciment
E_{tot}/C	Eau totale sur le ciment
E_{eff}/C	Eau efficace sur le ciment
V_c	Volume de ciment
V_e	Volume d'eau
V_v	Volume total d'air dans le matériau
G	Coefficient dépendant de la qualité des granulats
R_{c28j}	Classe de résistance vraie du ciment considéré à 28 jours [MPa]
f_{c28j}	Résistance mécanique requise à 28 jours [MPa]
C	Dosage en ciment [kg/m^3]
E	Dosage en eau [kg/m^3]
SE	Valeur obtenue de l'essai d'équivalent de sable sur le 0/2 mm,

MB	exprimée en pourcentage
WA ₂₄	Valeur de bleu sur la fraction 0/2 mm, exprimée en g/kg
ρ_{rd}	Coefficient d'absorption d'eau mesurée après 24 heures d'immersion exprimée en %
ρ_{ssd}	Masse volumique réelle après séchage à l'étuve exprimée en g/cm ³
ρ_a	Masse volumique réelle saturée à surface sèche exprimée en g/cm ³
LA	Masse volumique absolue exprimée en g/cm ³
M _{DE}	Coefficient Los Angeles est exprimé en %
K'	Coefficient micro-deval
Kb	Coefficient dépendant de la taille et de la distribution granululaire des granulats
CF	Coefficient granululaire
MF	Sable à gros grains
FF	Sable à moyen grains
	Sable à grains fins

Chapitre 2

Acronymes

GNR	Granulats naturels roulés
GNC	Granulats naturels concassés
GR	Granulats recyclés
ES	Equivalent de sable
SNC	Sable naturels concassés
SNR	Sable naturels roulés
GRB	Granulats recyclés de bétons

Symboles

WA ₂₄	Coefficient d'absorption d'eau mesurée après 24 heures d'immersion exprimée en %
W _i	Coefficient d'absorption au temps i
W _{sat}	Coefficient d'absorption déterminé en fin d'essai
M ₁	Masse du granulat saturé à surface sèche
M ₂	Masse du pycnomètre contenant l'échantillon de granulats saturés
M ₃	Masse du pycnomètre rempli d'eau uniquement
M ₄	Masse du granulat séché
M _{Lsat}	Masse finale lue sur la balance à saturation
M _{sat}	Masse du granulat saturé
M _{abs}	Masse d'eau absorbable
M _{Lini}	Masse lue initiale
M _{Li}	Valeur pesée lue sur la balance
M _{hi}	Masse du granulat à un instant t
M _{hi-1}	Masse du granulat à un instant i-1
M _{sec}	Masse du granulat sec
d _{wi}	Quantité d'eau désorbée à chaque instant i
W _i	Teneur en eau à l'instant initial
W _{ini-sat}	Teneur en eau à saturation à l'instant initial
%V _M /V _{GR}	Proportion volumique de mortier contenue dans les granulats recyclés
%V _{GP} /V _{GR}	Proportion volumique de granulat parent contenue dans les

$\%M_M/M_{GR}$	granulats recyclés Proportion massique de mortier contenue dans les granulats recyclés
$\%M_{GP}/M_{GR}$	Proportion massique de granulat parent dans les granulats recyclés
ρ_{GR}	Masse volumique des granulats recyclés
ρ_{GP}	Masse volumique des granulats parent
ρ_M	Masse volumique du mortier
ρ_a	Masse volumique absolue
ρ_{ssd}	Masse volumique réelle saturée à surface sèche
ρ_{rd}	Masse volumique réelle après séchage à l'étuve
ρ_{rdGR}	Masses volumiques réelles des granulats recyclés
ρ_{rd}^{mm}	Masse volumique réelle du micro mortiers
ρ_{rd}^{pc}	Masse volumique réelle du mortier
V_M	Volume du mortier
V_{GR}	Volume du granulat recyclé
M_M	Masse du mortier
M_{GR}	Masse du granulat recyclé
W_m	Coefficient d'absorption du mortier
W_{um}	Coefficient d'absorption du micro mortier
W_{pc}	Coefficient d'absorption de la pâte de ciment
CA	Cinétique d'absorption
C_u	Coefficient d'uniformité
C_c	Coefficient de courbure
M_{DE}	Micro deval
LA	Los Angeles

Chapitre 3

Acronymes

GR	Granulats recyclés
GNC	Granulats naturels concassés
GNR	Granulats naturels roulés
SNC	Sable naturels concassés
SNR	Sable naturels roulés
BGNR	Bétons de granulats naturels roulés
BGNC	Béton de granulats naturels concassés
BGR	Bétons de granulats recyclés
BGRS	Béton de granulats recyclés ayant subi un screening des adjuvants
SNC	Sable naturel concassé
SNR	Sable naturel roulé
SFN	Sable fin naturel
SGN	Sable grossier naturel
MBE	Mortier de béton équivalent
B/MBE	Béton/Mortier de béton équivalent
MBEGR	Mortier de béton équivalent de granulats recyclés
MBEGNC	Mortier de béton équivalent de granulats naturels concassés
MBEGNRoul	Mortier de béton équivalent de granulats naturels roulés
MBEGRS	Mortier de béton équivalent de granulats recyclés ayant été utilisé pour le screening des adjuvants
BGR-(G+EP+A)5min	Béton BGR est formulé en préhumidifiant les granulats avec de

BGR-(A)90sec	l'eau de préhumidification adjuvantée 5 minutes avant malaxage Béton BGR est formulé en introduisant l'adjuvant 90 secondes avant la fin du malaxage sans être mélangé à de l'eau
BGR-E+A-C-Gsat24h	Béton BGR est formulé en introduisant progressivement de l'eau adjuvantée avec du ciment puis les granulats saturés 24 heures avant malaxage
BGR-E+A-C-Gnonsat	Béton BGR est formulé en introduisant progressivement de l'eau adjuvantée avec du ciment puis les granulats dans son état naturel
BGR-Gsat+EP24h	Béton BGR est formulé avec des granulats saturés avec de l'eau de préhumidification 24 heures avant malaxage
BGR-(Gsat+EP+A)24h	Béton BGR est formulé avec des granulats saturés avec de l'eau de préhumidification adjuvantée 24 heures avant malaxage
BGR-G-EA-C	Béton BGR formulé en introduisant les matériaux de la façon suivante: granulats ; eau adjuvanté puis du ciment
BGRS-014	Béton BGR formulé avec l'adjuvant 014 selon la procédure suivante : Granulats préhumidifiés ; ciment ; eau efficace adjuvantée

Symboles

f_{c28}	Résistance moyenne prévisionnelle du béton à l'échéance considérée de 28 jours
f_{mc}	Classe vraie du ciment
k_f	Coefficient qui dépend des granulats
f_{CE}	Classe vrai du ciment
G	Coefficient granulaire
k_b	Coefficient granulaire

Chapitre 4

Acronymes

bgnr	Béton de granulats naturels roulés
bgnc	Béton de granulats naturels concassés
bgr	Béton de granulats recyclés
ACV	Analyse de cycle de vie
UF	Unité fonctionnelle
FDES	Fiches de déclarations environnementales et sanitaires
ICV	Inventaire de cycle de vie
B	Béton
MBE	Mortier de béton équivalent
GR	Granulats recyclés

Introduction Générale

Compte tenu des évolutions anthropiques de notre société, il devient essentiel de développer de nouvelles approches de la construction permettant de limiter ses impacts environnementaux et de prendre en compte le cycle de vie des matériaux mis en œuvre. Parmi les nombreuses pistes explorées actuellement, la valorisation des matériaux issus de la déconstruction a pour double objectif de préserver les ressources naturelles ainsi que de désengorger les sites de stockage. Les granulats constituent la matière première principale des bétons en représentant 60 à 70 % de leur volume. Contrairement aux granulats naturels, les granulats recyclés issus de la déconstruction présentent la particularité de contenir du mortier et de la pâte de ciment résiduels qui influencent différentes propriétés de ces granulats. Ces éléments peuvent se trouver sous forme broyée (éléments fins) ou concassée, accolée ou non au granulat du béton démolé (béton parent).

Le but de cette thèse est de développer l'utilisation de bétons de granulats recyclés en remplacement total des matériaux naturels, des graviers aux fines. La fabrication de tels bétons nécessite la caractérisation des matériaux recyclés mis en œuvre afin d'en appréhender précisément l'influence sur les propriétés à l'état frais mais également durci du matériau ainsi élaboré. Ainsi les paramètres de formulation de ces nouveaux bétons pourront être ajustés. L'analyse des liens entre la présence de mortier résiduel et les propriétés morphologiques, physiques et mécaniques des granulats, leur influence sur le comportement des bétons et mortiers ainsi que leur impact sur les méthodes de formulation et de mise en œuvre constituent les verrous scientifiques et techniques de cette thèse. De plus, étudier puis proposer des adaptations aux méthodes de formulation des bétons traditionnels et contribuer à l'analyse de la pertinence de normes vis-à-vis des spécificités des bétons de granulats recyclés de béton confèrera une application technologique et industrielle à ce travail réalisé en partenariat avec l'entreprise CHRYSO. Cette recherche doit ainsi répondre à des objectifs scientifiques, techniques et industriels.

Le chapitre 1 présentera une synthèse bibliographique des interactions des constituants des bétons sur leurs compositions et sur leurs comportements en ciblant sur les granulats. Puis, un état de l'art sur les granulats recyclés de béton est réalisé en incluant différents aspects qui concernent leur production et consommation, les normes de caractérisations relatives à ces granulats recyclés, leurs propriétés et leurs influences sur le comportement des bétons. Enfin, une analyse comparative de différentes méthodes de formulation adaptées à ces bétons est effectuée afin d'apporter une aide à la décision dans le choix de la composition des échantillons de bétons étudiés par la suite.

Le chapitre 2 est consacré à la caractérisation expérimentale des propriétés physiques, morphologiques et mécaniques des granulats recyclés de béton. Après une présentation du

programme expérimental mené sur GRB (Granulats Recyclés de Bétons) et des méthodes associées, les propriétés de différents granulats recyclés en plateforme industrielle ou en laboratoire sont étudiées puis comparées à celles de deux granulats naturels, roulés et concassés. Pour chaque propriété, la validité du protocole de caractérisation est évaluée. Des adaptations sont proposées le cas échéant. De nouveaux protocoles expérimentaux nécessaires à l'approfondissement des connaissances sur l'absorption/désorption, la morphologie, la qualification des fines ou la teneur en mortier des GRB résiduels sont explorés. L'ensemble des résultats est analysé et critiqué afin d'identifier les interactions entre les propriétés de GRB. La discussion autour des résultats obtenues dans ce chapitre 2 sur granulat recyclés de bétons (GRB) et leur pertinence au regard des résultats trouvés dans la littérature sont abordées au chapitre 4.

Le chapitre 3 est consacré à l'étude des propriétés aux états frais et durci de bétons et mortiers de granulats recyclés et naturels. En ce qui concerne leur composition, il a été décidé de rapprocher le plus possible les squelettes des granulats naturels concassés et recyclés. Le programme expérimental basé sur ce choix est ensuite présenté. Après une étude sur bétons non adjuvants, et dans le but de répondre à la problématique industrielle, différents adjuvants fournis et sélectionnés par le partenaire industriel sont testés sur les bétons. Puis, la validité de quelques méthodes de formulation telles que la méthode MBE (Mortier de Béton Equivalent) ou des modèles analytiques identifiés dans le chapitre 1, permettant de prédire les propriétés des BGR est étudiée. Des modifications ou corrections sont proposées et testées expérimentalement. Elles concernent le choix des paramètres de formulation, la préparation des matériaux et les modes de mises en œuvre. L'ensemble des résultats sur BGR (Bétons de Granulats Recyclés) et BGN (Bétons de Granulats Naturels) est synthétisé afin de proposer une justification aux différences de propriétés observées entre ces deux matériaux. Elle conduit à des propositions d'adaptation des méthodes de formulation pour obtenir des bétons de granulats recyclés de propriétés proches de celles des bétons de granulats naturels. L'accent est mis sur les caractéristiques qui sont modifiées par la présence de pâte et de mortier et qui influencent les propriétés des bétons qu'ils constitueront : morphologie, teneur en éléments fins, réactivité potentielle à l'eau, absorption et résistances mécaniques.

Le chapitre 4 propose une discussion et des perspectives autour des résultats obtenus sur l'identification des caractéristiques des granulats recyclés et leur influence sur les propriétés à l'état frais et durci des bétons. Afin de confirmer le caractère éco-respectueux des bétons de granulats recyclés, des analyses d'impacts environnementaux sont proposées sur les bétons de granulats recyclés et naturels.

Chapitre 1 - Etude bibliographique

Introduction

Production et consommation de granulats en France et en Alsace

La France a produit en 2013, 366 MT de granulats (+ 1,8% par rapport à 2012) répartie comme suit :

- 56% qui proviennent des roches massives,
- 37% qui proviennent de roches meubles,
- 7% qui proviennent du recyclage dont « 82% des matériaux de démolitions et 18% des autres tels que les laitiers, schistes et les granulats issus des MIDND (Mâchefers d'incinération de déchets non dangereux) (UNICEM and UNPG, 2013).

Le besoin annuel national de granulats est de 369 MT dont 79% pour le génie civil et les Voiries et Réseaux Divers (VRD) et 21% pour le bâtiment, sachant que 33% sont utilisés dans la formulation des bétons hydrauliques (UNICEM and UNPG, 2013). Cette consommation est en hausse de 1,6% par rapport à l'année 2012. Ainsi la consommation en granulats est supérieure à sa production. Afin de pallier ce déficit, la France effectue des opérations d'importation/exportation de granulats avec des pays voisins. Elle exporte ainsi 8 MT et importe 10,8 MT de granulats.

En Alsace, la production des granulats est évaluée à 18,6 MT en 2013 (+ 2,8% par rapport à 2012 ; - 3,2% sur 2011-2012). Contrairement à la tendance nationale, l'Alsace produit davantage de roches meubles (granulats alluvionnaires : 15,3 MT) que de roches massives (1,1 MT).

En Alsace, la consommation des granulats naturels (Dreal, 2012) est d'environ 15 MT. L'excédent est exporté dans les départements ou les pays voisins. La production de granulats recyclés représente environ 2 MT issus des déchets de chantiers.

Le Bas Rhin a produit 12,1 MT de granulats en 2013, il est le département qui produit le plus de granulat dans toute la France (UNICEM and UNPG, 2013)

Démolition, déconstruction et gestion des déchets

La France produit en moyenne 40 MT de déchets inertes sur un total de 50 MT dans le bâtiment (ADEME and FFB, 2013).

Les déchets de chantier (de construction ou de démolition) font partie des déchets industriels. Ces derniers sont classés en 3 catégories principales :

- Les déchets inertes (DI)
- Les déchets non dangereux (et non inertes) (DND) anciennement appelés déchets industriels banals (DIB)
- Les déchets dangereux (DD), anciennement appelés déchets industriels spéciaux (DIS)

Lorsqu'ils ne sont pas valorisés (valorisation thermique, matière ou biologique), ces déchets sont envoyés pour stockage en centre d'enfouissement technique ou CET. Il existe trois classes de CET directement corrélées aux 3 catégories de déchets citées ci-dessus. La différence majeure entre ces 3 classes réside dans le degré d'imperméabilité du sol constitutif des sites (Morel-Braymand, 1999) ; (Navarro et al., 1993) ; (Maes, 2004) ; (Braymand, 2015a) ; (Braymand et al., 2011).

Les déchets du bâtiment et des travaux publics sont soumis aux dispositions générales sur l'élimination des déchets reprises dans le Code de l'Environnement (article L. 541-1 à L. 541-50) (Legifrance.gov.fr, 2015). Cet article définit le rôle et les responsabilités des producteurs de déchets de chantier par rapport à leur élimination (Ministère de l'écologie et du développement, 2004).

En effet, tout producteur de déchets de chantiers est responsable de leur bonne élimination (Legifrance.gov.fr, 2015). Le code de l'environnement définit ainsi le principe du pollueur-payeur

Sur les déchets produits lors d'une démolition/déconstruction, 50% provient de la démolition des bâtiments et ouvrages d'art. Dans le cadre du bâtiment, 72,4% des déchets produits en 2013 sont inertes, 1,5% non dangereux et 26,10% de déchets dangereux. Les déchets inertes représente à ce jour plus de 90% des déchets issus de la déconstruction mais du fait que certains matériaux non inertes (type plâtre, bois, plastiques, ...) restent fixés au béton réduisant ainsi ce taux à environ 60% (Charonnat, 2011) et seuls 12% des déchets inertes en mélange sont recyclés et valorisés.

Tableau 1 : Données des déchets des BTP en France en 2004 (Ifen, 2008)

[Mt]	Travaux publics	Bâtiment				Total BTP
		Démolition	Réhabilitation	Construction neuve	Total	
Inertes	292,8	29,2	8,6	2,7	40,5	333,4
Non dangereux	1,5	1,8	3,5	0,4	5,7	7,2
Dangereux	1,2	0,2	1,4	0,1	1,7	2,9
Total	295,5	31,2	13,5	3,2	47,9	343,5

Conformément à la directive relative aux déchets du 19 Novembre 2008 (*Directive 2008/98/CE du parlement européen et du conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives*, 2008), à la circulaire du 15 février 2000 relative à la planification des déchets du bâtiment et travaux publics (Voynet et al., 2000) et à l'ordonnance déchet du 18 décembre 2010

il est spécifié l'importance de réduire le stockage, de favoriser la valorisation et le recyclage ; de développer l'utilisation des matériaux recyclés et de mettre en place un réseau de traitement bien réparti sur le territoire. Il est également précisé que les coûts seront intégrés et clairement répartis dans les marchés. Ainsi d'ici 2020, 70% des déchets de construction et de démolition considérés comme non dangereux (banals + inertes) devront être réemployés. De plus, les plans de gestion des déchets issus du BTP imposent des diagnostics déchets pour les ouvrages à démolir (Charonnat, 2011). Toute opération de déconstruction est soumise à l'obligation d'effectuer un audit doublé d'un inventaire complet des matériaux avec une identification des filières locales de recyclage.

Comme plus de 80% de la production des déchets de démolition de bâtiments n'est pas valorisée, les volumes stockés dans les centres d'enfouissement technique (CET) sont importants. Les perspectives sont de réduire les impacts environnementaux et économiques liés à :

- la pollution de l'atmosphère lors des transports,
- l'extraction des ressources naturelles,
- l'occupation de l'espace (CET)
- le coût de mise en stockage
- le coût d'importation

La faisabilité technique et l'intérêt économique des méthodes de déconstruction sélective sont aujourd'hui démontrés vis-à-vis de la démolition classique (Pilon and Laquerre, 1999).

Ces méthodes devront conduire à une augmentation du taux de valorisation des matériaux de démolition par recyclage. Une approche plus globale par la prise en compte dès la conception du cycle de vie des matériaux dans l'ouvrage permettrait d'optimiser leur recyclage et ainsi d'augmenter ces taux dans l'avenir. C'est pourquoi la tendance actuelle est de fournir un bilan environnemental des ouvrages construits par l'édition des ACV (Analyse du Cycle de Vie) dans lesquelles une analyse des indicateurs environnementaux est faite (énergie grise ou primaire, bilan carbone, etc.).

Ainsi, la valorisation des matériaux issus de la déconstruction/démolition d'ouvrages en bétons entre dans le contexte actuel du développement durable et représente un enjeu environnemental et économique important pour la construction. Dans le cadre de l'exploitation et de la préservation des ressources naturelles, il est nécessaire de trouver d'autres sources soit de remplacement soit de substitution partielle des constituants des bétons.

Le premier paragraphe de ce chapitre rappelle l'influence des propriétés des constituants des bétons et de leurs dosages sur les caractéristiques à l'état frais et durci des bétons. Les principales méthodes de formulation des bétons sont également présentées.

Puis, une analyse des propriétés des granulats recyclés de béton (GRB) et de leurs interactions est proposée.

Enfin les caractéristiques à l'état frais et durcis des bétons de granulats recyclés sont étudiées et leurs propriétés analysées en fonction des taux de substitution, des compositions et des propriétés des granulats recyclés. Une attention particulière sera apportée aux méthodes de formulation et compositions des BGR.

1 Constituants des bétons et interactions

Le choix des différents constituants utilisés dans la formulation des bétons dépend de l'environnement, des objectifs du béton fixé par le cahier de charges et des matériaux disponibles. Réciproquement, les propriétés recherchées du béton sont-elles mêmes influencées par les propriétés et la quantité des constituants employés (Butler et al., 2011) ; (Mas et al., 2012a) ; (Kılıç et al., 2008). Les constituants utilisés dans la fabrication d'un béton sont les granulats, le ciment et l'eau (Brito and Saikia, 2013); (Dreux, 1990). Des éléments d'ordre secondaire tels que des adjuvants ou des additifs peuvent également rentrer dans la composition de certains bétons dans le but d'améliorer leur comportement à l'état frais et/ou à l'état durci (Barbudo et al., 2013) ; (Pereira et al., 2012a).

Dans cette partie, les objectifs de formulation des bétons puis les propriétés, influences et interactions des constituants du béton et les principales méthodes de formulation des bétons fonction de ses objectifs et propriétés sont présentés.

1.1 Les propriétés des bétons (rappel) : besoin/objectifs

La maîtrise des caractéristiques des bétons à l'état frais comme durci nécessite la compréhension des rôles joués par chacun de ses constituants. De ce fait, la connaissance de leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques est nécessaire.

La conception d'un béton passe par la définition des objectifs à atteindre qui prennent en compte des critères en rapport avec :

- Les propriétés à l'état frais ;
- Les propriétés à l'état durci ;
- Les conditions environnementales (la durabilité du béton formulé).

De ce fait, il convient généralement de trouver la combinaison optimale des constituants qui après mélange permettra d'obtenir un béton dont les propriétés répondent aux spécifications du cahier de charges. Cela passe aussi par la vérification des constituants.

La norme NF EN 206 définit les valeurs requises de ces propriétés en fonction des classes environnement (Afnor, Norme NF EN 206-1, 2014).

1.1.1 Ouvrabilité

Selon la norme française NF EN 12 350-2 (Afnor, Norme NF EN 12 350-2, 2012), *"l'ouvrabilité d'un béton est la propriété déterminant l'effort demandé pour manipuler une certaine quantité de béton"*

frais avec un minimum de perte d'homogénéité''. On emploie aussi le terme « consistance » pour désigner la capacité du béton frais à s'écouler. Elle est conditionnée par la quantité et la viscosité de la pâte comprise dans le mélange. Plusieurs paramètres modifient ou influencent l'ouvrabilité des bétons (Association technique de l'industrie des liants hydrauliques et al., 1996) :

- Les paramètres intrinsèques aux bétons : constituants utilisés dans la formulation des bétons
- Les paramètres externes aux bétons : malaxage et les conditions atmosphériques.

Un suivi de l'ouvrabilité des bétons au cours des premières minutes voire des premières heures caractérise sa durée pratique d'utilisation (DPU), sa perte d'affaissement en fonction du temps. Pour des bétons, les affaissements et les étalements sont définis selon les classes de consistance (Afnor, Norme NF EN 12 350-2, 2012).

1.1.2 Résistances mécaniques

La résistance à la compression d'un béton est recherchée prioritairement lors de la formulation et de la fabrication du béton. Pour les bétons courants, cette résistance est conditionnée principalement par la qualité de la pâte et son adhésion aux granulats ainsi que par la constitution du squelette granulaire. Une attention particulière doit être portée aux conditions de maturation pendant le durcissement. Elle est étroitement dépendante et inversement proportionnelle à l'ouvrabilité pour un béton courant non adjuvanté (Dreux, 1990).

Dans le cas de la résistance à la traction, la qualité des granulats et les conditions de maturation jouent un rôle important (François de Larrard, 2000) ; (Neville, 2000).

Les valeurs régulières des résistances fonction de la classe d'exposition de l'ouvrage sont définies dans la norme NF EN 206-1 (Afnor, Norme NF EN 206-1, 2014).

1.1.3 Conditions environnementales –Classes d'exposition

Selon l'agressivité du milieu environnant, des paramètres tels que le rapport eau/ciment maximal, la teneur minimale en ciment, la classe de résistance minimale et la teneur minimale en air sont définis par la norme NF EN 206-1 (Afnor, Norme NF EN 206-1, 2014).

1.2 Les constituants du béton

Les constituants principaux des bétons courants sont, en volume :

- 7 à 14% de ciment ;
- 14 à 22 % d'eau
- 60 à 70% de granulats (sable, gravillons, graviers) ;

D'autres constituants peuvent également entrer dans sa composition :

- 0 à 2% d'adjuvants ;
- 0 à 2% de fines.

A l'état frais, ils renferment entre 1 à 6 % d'air (Roux, 2008).

1.2.1 Constituants de base

1.2.1.1 Ciment

Origine

Il existe 5 types de ciment, CEM I à CEM V, classés selon leur composition et définis dans la norme EN 197-1 (Afnor, Norme NF EN 197-1, 2012). La norme définit également 3 classes de résistances : 32,5/42,5/52,5.

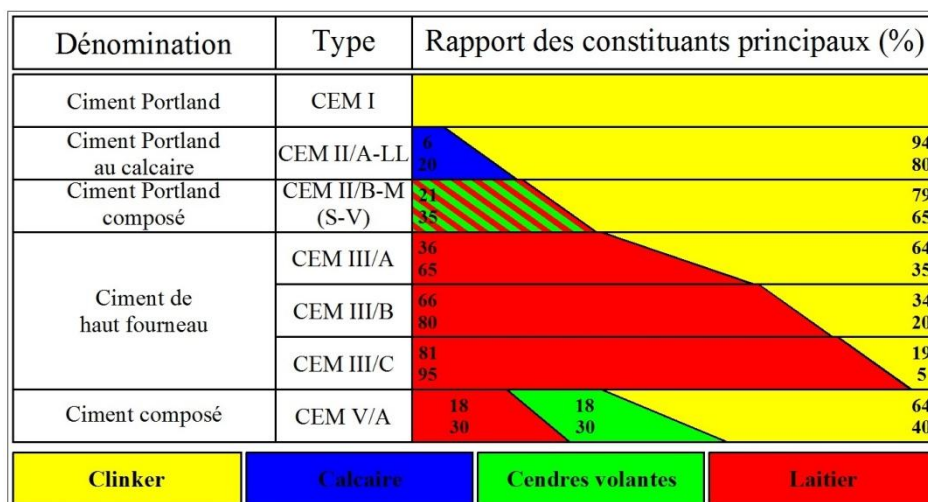


Figure 1 : compositions des ciments courants (Roux, 2008)

Influence sur les propriétés des bétons

Dès que le ciment est mis en contact avec l'eau, une cristallisation en quatre phases (initiale/dormante/prise/durcissement) se produit (Dreux, 1990) ; (Escadeillas, 2010), elle est régie par un ensemble de réactions hétérogènes (dissolution et précipitation) dont *“la vitesse de réaction dépendra des caractéristiques de la surface du solide c'est-à-dire la surface développée en contact avec la solution et de l'interface solide –solution”* (Vichot et al., 2008).

Le ciment utilisé a un impact sur le comportement mécanique des bétons. La quantité de ciment utilisé est déterminant pour l'atteinte des résistances mécaniques exprimées sous la forme $f_{cm} = k(C/E - 0,5)$ ou $f_{cm} = k(C/(E+V) - 0,5)$ appelée relation ou formule de Bolomey (Association technique de l'industrie des liants hydrauliques et al., 1996) ; (Bolomey, 1935).

Avec K fonction de la qualité des granulats et de la classe vraie des ciments.

Le dosage défini dans la norme EN 206-1 (Afnor, Norme NF EN 206-1, 2014) est fonction de la classe d'exposition de l'ouvrage, mais une valeur maximale de son dosage dans le béton est souvent choisie afin de limiter les phénomènes de retrait (Dreux, 1990).

1.2.1.2 Eau

L'eau contenue dans les bétons influence à toutes les étapes de vie du béton ses propriétés physiques, chimiques, mécaniques et de durabilité. Elle joue plusieurs rôles :

- Elle permet d'hydrater le ciment. La quantité d'eau nécessaire pour assurer l'hydratation du ciment est de l'ordre de 25 % de la masse de ciment (Laboratoire central des ponts et chaussées (France), 2001) ;
- Elle assure l'ouvrabilité du béton pendant les 2 premières heures. L'affaissement augmente avec la quantité d'eau utilisée, mais pas nécessairement proportionnellement (Laboratoire central des ponts et chaussées (France), 2001) (Figure 2).

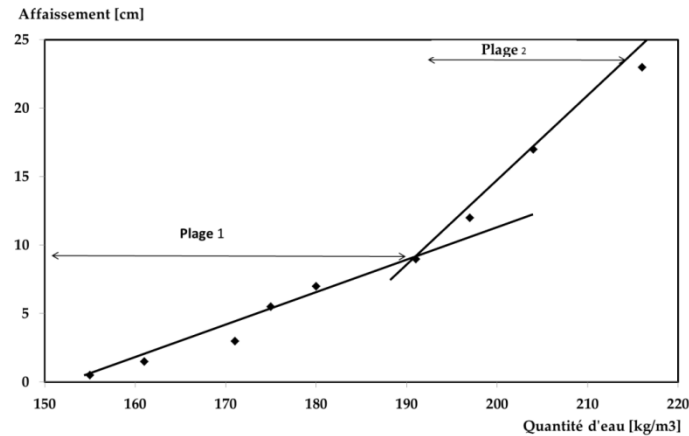


Figure 2 : Evolution de l'affaissement en fonction de la quantité d'eau (Laboratoire central des ponts et chaussées (France), 2001)

La norme NF P 18-303 précise les caractéristiques de l'eau requises pour la confection des bétons ; exempt de toutes impuretés nuisibles (Dreux, 1990).

L'eau est ainsi l'un des constituants les plus importants qui entre dans la formulation des bétons après le ciment (Bouny, 1994) ; (Colleparidi, 2010). On distingue :

- Eau efficace

Elle représente la quantité d'eau exacte définie lors de la formulation du béton pour assurer l'hydratation des ciments et la rhéologie du béton à l'état frais. La notion d'eau efficace telle que définie dans la norme EN 206-1 (Afnor, Norme NF EN 206-1, 2014) suppose que toute l'eau absorbée par les granulats reste non disponible, piégée dans les pores des granulats.

- Eau totale

Elle représente la quantité d'eau présente dans la gâchée de béton. Elle prend en compte l'eau efficace à laquelle l'eau d'absorption des granulats est ajoutée. L'eau d'absorption des granulats est définie par le coefficient normalisé WA_{24} (Afnor, Norme NF EN 1097-6, 2001).

Un excès d'eau diminue les propriétés mécaniques des bétons (Figure 3). En effet, un excédent d'eau dans le béton entraîne un excédent d'eau entre les particules, donc une augmentation de la porosité de la pâte et par la suite la diminution des résistances mécaniques.

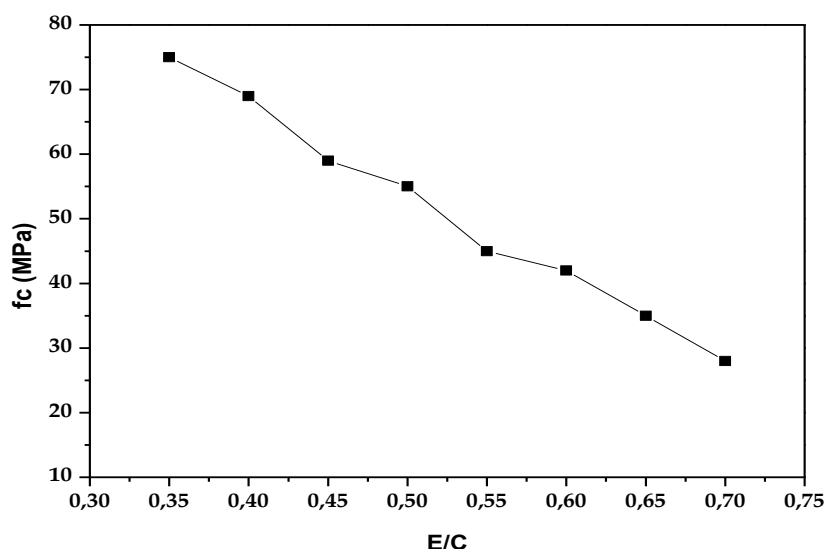


Figure 3 : Evolution de la résistance mécanique en fonction de la variation de la quantité d'eau introduite dans un béton (Nikbin et al., 2014)

1.2.1.3 Granulats et squelette granulaire

Origine des granulats

Ils sont définis comme des fragments de roches destinés à la fabrication d'ouvrages de travaux publics et de bâtiment (Guillemain and Ramahandry, 2014). On distingue :

- Les granulats naturels : ce sont les plus utilisés dans la fabrication des bétons, ils peuvent provenir des roches sédimentaires, métamorphiques ou magmatiques, généralement sous leurs formes roulées ou concassées.
 - Les granulats roulés dit alluvionnaires sont généralement obtenus dans les rivières. D'origine siliceuse, calcaire ou silico-calcaire, leurs formes sont obtenues suite à l'érosion. Une pénurie des granulats roulés alluvionnaires en France est observée (Hafid, 2012) donc il est nécessaire de trouver d'autres sources.
 - Les granulats concassés sont généralement obtenus des carrières ou issus des roches broyées à l'aide d'un concasseur et ayant des formes beaucoup plus angulaires ou irrégulières. Malgré leurs formes irrégulières qui sont l'une des causes d'une moins bonne ouvrabilité, une meilleure adhérence entre les éléments de bétons est en général obtenue avec ces granulats (Hafid, 2012).
- Les granulats artificiels : ce sont des sous-produits industriels, concassés ou non. Les plus employés sont les laitiers cristallisés concassés de haut fourneau (CIMBéton and Ecole Françaises du béton, 2005) ;
- Les granulats recyclés : ce sont des granulats issus des matériaux inorganiques provenant de bétons de démolitions de bâtiments ou d'ouvrages de génie civil. Ils sont obtenus à la suite d'un concassage des gravats.

Leurs tailles varient de 0 mm à 125 mm et sont définis selon leurs classes granulaires (d/D) (Afnor, Norme NF EN 12620, 2003) ; (Martín-Morales et al., 2011).

On retrouve :

- les fillers ou fines (diamètre $D < 2$ mm et $70\% < 0,063$ mm) ;
- les sables ($D=4$ mm et $d=0$) ;
- les gravillons ($D/d \leq 2$ ou $D \leq 11,2$ mm)
- les graviers ($D/d > 2$ et $D \geq 11,2$ mm)
- les graves $D \leq 45$ mm et $d = 0$

Couramment, l'appellation « *fine aggregate* » ou granulats fins est utilisée pour référencer les sables et éléments inférieurs en taille et l'appellation « *coarse aggregate* » ou granulats grossiers est utilisée pour les gravillons et graviers sans distinction entre les classes.

L'aptitude générale à l'emploi des granulats en France est régi par les normes Françaises complémentaires EN 12 620 (Afnor, Norme NF EN 12620, 2003) ;(Afnor, Pr NF EN 12620, 2011) et NF P 18-545 (Afnor, NF P 18-545, 2011) ainsi que par le fascicule de documentation FDP 18940.

Propriétés des granulats et influence sur le béton

Granularité

Afin de caractériser la répartition ou la distribution des granulats, des coefficients de courbure et d'uniformité peuvent être déterminés : $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ et $C_c = \frac{(d_{30})^2}{(d_{10} * d_{60})}$. Le terme d_x correspond à la taille théorique de la maille du tamis à $x\%$ de tamisât.

La granularité est définie comme la distribution statistique de la taille des grains d'un granulat. Elle peut être soit continue soit discontinue. Elle est continue lorsque toutes les classes granulométriques sont représentées. Une granularité continue permet d'obtenir des bétons plus plastiques et de bonne ouvrabilité (Neville, 2000) ; (Collepari, 2010) ; (López-Gayarre et al., 2009). Elle permet aux particules fines de remplir les vides créés par les granulats grossiers (Collepari, 2010). De ce fait, le taux de vides dans les bétons est réduit (Collepari, 2010). Néanmoins, la présence d'éléments fins induit une augmentation de la surface spécifique des grains. Ainsi, plus grande est la surface de contact, plus le mélange nécessitera d'eau et de pâte de ciment pour les lubrifier sinon une faible ouvrabilité pourra être induite. Une quantité d'eau plus importante est donc requise dans le béton. De plus, les bétons fabriqués avec des granulats dont le squelette est discontinu tendent à se ségréger.

Cependant, lorsque les fines sont sphériques (exemple de la fumée de silice), leur ajout améliore la consistance à l'état frais (Kwan, 2000). Par ailleurs, leur ajout réduit la ségrégation du béton (Kwan, 2000).

L'augmentation de la finesse du granulat entraîne une vitesse de réaction d'hydratation et des résistances mécaniques au jeune âge élevées (Escadeillas, 2010). Ainsi l'emploi des fines a été préconisé pour une optimisation de l'agencement des granulats et donc procure de ce fait une meilleure compacité qui conduit à l'obtention des bétons de résistances mécaniques optimisées.

Dimension maximale : Dmax

La dimension maximale du granulat doit rester compatible avec la facilité de mise en œuvre du béton fabriqué. La présence excessive d'air dans un béton en diminue la résistance mécanique. L'un des paramètres qui permet de réguler la quantité d'air dans le béton est la dimension maximale D des granulats (Collerparadi et al., 2007) (Figure 4).

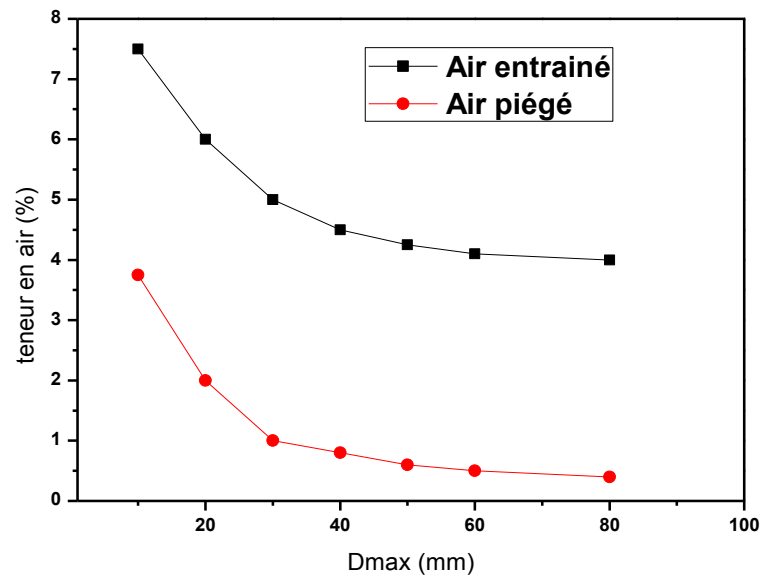


Figure 4 : Evolution de la teneur en air entrainé et piégé en fonction du diamètre maximal du granulat (Collerparadi et al., 2007).

Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre facilité de mise en œuvre et teneur en air.

Walker et Bloem en 1960 ont montré que pour un rapport Eau/Ciment constant, la résistance diminue avec l'augmentation de la dimension maximale des granulats, particulièrement pour une taille supérieure à 38 mm.

Porosité et absorption des granulats

La porosité du granulat est le rapport du volume de vide contenu dans un granulat au volume de ce dernier. Les propriétés des bétons dépendent de la porosité et du coefficient d'absorption des granulats.

Pour les granulats légers une porosité entre 25% et 75% de leur volume apparent est obtenue (Ke, 2008). L'absorption des granulats dépend de leur état de porosité et de sa connectivité (Zhang and Gjorv, 1990).

Leur influence sur les propriétés des bétons dépend de l'état du granulat au moment de son emploi (Ke, 2008); (Nguyen, 2013). L'eau contenue dans le granulat préhumidifié peut participer plus tard à la cure interne des bétons (Ke, 2008).

Les granulats exploitables dans les bétons hydrauliques doivent présenter des valeurs de coefficients d'absorption inférieures ou égales à 5%.

Morphologie des granulats

La morphologie a une influence sur les propriétés des bétons, particulièrement sur l'empilement granulaire et donc sur la compacité du mélange (Hafid, 2012). Parmi les paramètres morphologiques, l'allongement affecte fortement cette compacité (Hafid, 2012). La géométrie et l'état de surface des granulats influe sur l'adhérence de la pâte et donc sur la résistance mécanique du béton (François de Larrard, 2000).

De plus, d'autres propriétés telles que la dimension, la texture de surface, la porosité et la minéralogie modifient la zone d'interface pâte granulats (Escadeillas, 2010) ; (Akçaoğlu et al., 2002).

Une surface rugueuse augmente la force d'adhésion entre la matrice et le granulat. Si la surface est poreuse, elle absorbera l'eau et ainsi pourra positivement influencer le lien entre la pâte et le granulat (Neville, 2000) ; (Neville and Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton, 2000)

Masses volumiques

Les masses volumiques sont définies dans la norme NF EN 1097-6 (Afnor, Norme NF EN 1097-6, 2001), celles des granulats légers sont inférieures à 2000 kg/m^3 (Afnor, Norme NF EN 13055-1, 2002). La masse volumique des granulats influence celle du béton (Ke, 2008).

Propreté des granulats

La propreté des granulats est évaluée au travers des essais d'équivalents de sables (Afnor, Norme NF EN 933-8, 1999) et complétée par celui au bleu de méthylène (Afnor, Norme NF EN 933-9, 2009) afin d'évaluer la présence des argiles de types gonflantes néfastes pour le béton. Des valeurs limites sont définies pour l'utilisation des granulats dans la fabrication des bétons hydrauliques (Association technique de l'industrie des liants hydrauliques et al., 1996) ; (Afnor, NF P 18-545, 2011).

Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques caractéristiques des granulats sont une résistance à l'usure (attrition) et une résistance à la fragmentation. Elles sont évaluées à l'aide d'essais tels que l'essai Los Angeles pour la fragmentation (Afnor, Norme NF EN 1097-2, 2010) et l'essai Micro Deval pour l'attrition (Afnor, Norme NF EN 1097-1, 2011).

Des limites de la résistance à la fragmentation des granulats sont définies dans la norme NF EN 18 545 (Afnor, NF P 18-545, 2011) mais aucune condition normative n'est requise en ce qui concerne la résistance à l'usure. Cependant certains auteurs suggèrent une limite à appliquer concernant cette valeur de MDE dans le cas de la formulation d'un béton à résistance élevée, valeur dépendant de la résistance recherchée (Colleparidi, 2010).

Composition chimique et risque de détérioration

- Teneur en sulfates

La teneur en soufre total (sulfates et sulfures) ne doit pas excéder 0,4% en masse (Afnor, NF P 18-545, 2011) ; (Arliguie et al., 2007). Elle est déterminée selon la norme EN 1744-1 (Afnor, Norme NF EN 1744-1, 2010). Les dégradations peuvent se produire dans des bétons formulés avec des granulats ayant un taux de sulfures élevé, les sulfures peuvent se transformer en sulfates par oxydation. Les sulfates à leur tour peuvent influencer la prise et provoquer des gonflements (ettringite secondaire) et de ce fait conduisent à une augmentation de la porosité des bétons. Cette porosité pourra par la suite jouer un rôle important en cas d'attaque du béton par des agents externes tels que les solutions de sulfates, de chlorure. Leur présence est liée à l'environnement d'exploitation de l'ouvrage, et une porosité plus élevée facilite la pénétration de ces éléments agressifs vers le cœur des matériaux et en augmentant les surfaces de réaction. Afin de palier cela, l'emploi de ciment à faible teneur en chaux, fortement réactive, est préconisé (Arliguie et al., 2007).

- Teneur en silice

L'emploi des granulats contenant des silices solubles et réactives dans un environnement riche en alcalins peut conduire aux réactions d'alcali-silice pouvant provoquer un gonflement des bétons (Mohamed et al., 2007a) par la formation de produits amorphes ayant l'aspect de gels et nuisibles aux propriétés mécaniques des bétons (Arliguie et al., 2007) (Curtil and Habita, 1994) (Mohamed et al., 2007b) (Figure 5).

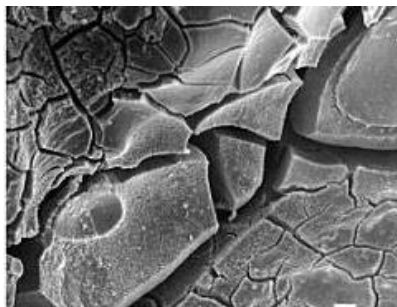


Figure 5 : gel craquelé silico-calco-alcalin dans un béton dégradé par la réaction alcali silice (Arliguie et al., 2007)

1.2.2 Constituants additionnels

1.2.2.1 Additions et fines

Les fines telles que définies dans la norme NF P 18 545 (Afnor, NF P 18-545, 2011) sont les fractions granulaires d'un granulat qui passent au tamis 0,063 mm. Ces matériaux finement divisés permettent d'améliorer la résistance mécanique et la durabilité des bétons (Cyr, 1999) ; (Chaid et al., 2010).

Ils sont communément appelés additions ou fillers et classés selon 3 types :

- Additions calcaires (Afnor, NF P 18-508, 1995) ;
- Additions siliceuse (Afnor, NF P 18-509, 1998) ;
- Filler, addition pour béton hydraulique.

L'ajout de fine a pour effet :

- Une modification du squelette granulaire agissant sur les propriétés rhéologiques et la compacité du matériau. Cet effet est appelé effet filler.

- Une modification des cinétiques de prise et durcissement. L'ampleur de cette modification dépend de la réactivité des fines.

Lorsque des additions calcaires ou siliceuses sont utilisées, la notion du rapport eau/ciment est modifié en $\frac{\text{Eau}}{\text{Ciment} + K \cdot \text{addition}}$; le dénominateur étant appelé liant équivalent (Afnor, Norme NF EN 206-1, 2014). La norme EN 206-1 (Afnor, Norme NF EN 206-1, 2014) définit le "liant équivalent comme étant la quantité de ciment à laquelle s'ajoute le produit d'un coefficient K et d'une quantité d'addition par mètre cube de béton" (Afnor, Norme NF EN 206-1, 2014); K étant le facteur qui prend en compte l'activité d'une addition, C la quantité de ciment CEM I. Les valeurs de coefficient prise en compte sont déterminées dans la norme EN 206-1 (Afnor, Norme NF EN 206-1, 2014).

Les fines influencent le comportement des bétons au travers de paramètres tels que la finesse, la distribution et leur surface spécifique : la demande en eau augmente avec la surface spécifique des fines (Figure 6). De ce fait l'emploi des fines nécessitera plus d'eau afin que l'ouvrabilité souhaitée soit atteinte.

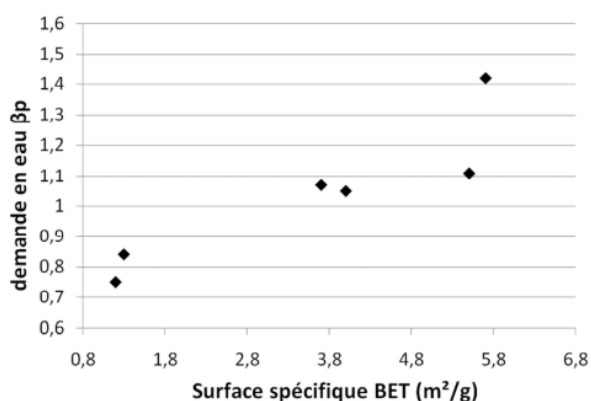


Figure 6 : relation entre la demande en eau des fillers calcaires et leur surface spécifique BET (Diederich, 2010)

L'emploi des fines peut jouer le rôle de "bouche pores". Ils comblent les vides entre les granulats et de ce fait augmente les propriétés mécaniques des bétons (Diederich, 2010).

Les fillers calcaires participent à l'hydratation du ciment en l'accélérateur et de ce fait les résistances mécaniques au jeune entre 1 et 7 jours (Diederich, 2010) ; (Escadeillas, 1988).

La combinaison de l'ajout de fines et d'adjuvants superplastifiants permet d'améliorer les propriétés à l'état frais et durci des bétons (Lagerblad et al., 2014) ; (Bessa-badreddine, 2004).

1.2.2.2 Adjuvants superplastifiants

“Les adjuvants sont des produits chimiques présents sous forme liquide ou solide (poudre) qui, lorsqu'ils sont incorporés à faible dose dans le béton, permettent d'en modifier certaines propriétés” (Association française de normalisation, 2012). Ils sont introduits dans un béton, mortier ou coulis soit avant ou pendant le malaxage, mais généralement avant sa mise en œuvre. Parmi les adjuvants, il y a notamment : les accélérateurs de durcissement, les retardateurs de prise, les entraîneurs d'air, les accélérateurs de prise, les hydrofuges de masses, les plastifiants et les superplastifiants. Ces derniers (appelés aussi hauts réducteurs d'eau) permettent, à ouvrabilité constante, d'augmenter les résistances mécaniques tout en réduisant la quantité d'eau introduite dans le mélange (Collerparadi et al., 2007) ; (Maximilien, 1995).

Initialement formulés à base de lignosulfonates, de sels d'acides organiques, de mélanines sulfonate, de naphthalène sulfonate et de dérivés de mélanine ou naphthalène. Ils sont aujourd'hui composés principalement de polymère ou copolymères.

Ces superplastifiants sont utilisés soit pour leur fonction fluidifiante, soit pour leur fonction réductrice d'eau (ils sont alors appelés réducteurs d'eau ou haut réducteurs d'eau).

L'action du superplastifiant passe par son adsorption sur les particules solides de ciment qui conduit à leur défloculation et par conséquent à l'augmentation de la fluidité des bétons, mortiers et coulis. Cette défloculation est conséquente à une répulsion électrostatique, en effet stérique ou une combinaison des 2 actions (Maximilien, 1995).

Les grandes familles de superplastifiants et leur mode d'action sont donnés en annexe 0.

1.3 Méthodes traditionnelles de formulation des bétons

La détermination de la formulation d'un béton doit permettre d'atteindre les objectifs de résistances et de durabilité à l'état durci tout en garantissant un état rhéologique et sa facilité de mise en œuvre, tels qu'évoqués précédemment.

L'association des différents éléments constitutifs des bétons et le calcul de leurs proportions respectives fait l'objet de nombreuses méthodes, généralement empiriques voire graphiques.

Ces méthodes, plus ou moins complexes, s'appuient sur une démarche comparable de calcul divisée en 3 grandes étapes :

- Optimisation du squelette granulaire afin d'obtenir une compacité maximale telle qu'illustrée ci-après (Figure 8) et/ou une rhéologie visée (Neville and Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton, 2000) ; (Evangelista and de Brito, 2014).

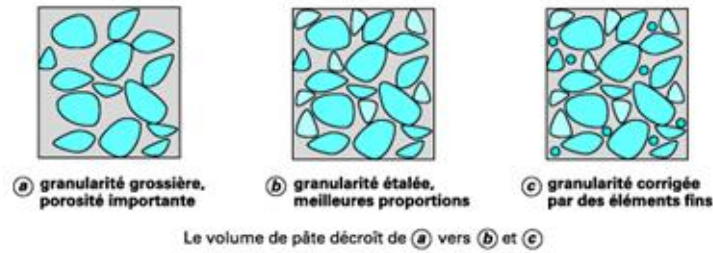


Figure 7 : Compacité d'un squelette granulaire en fonction de la granularité et des corrections effectuées (Bernier, 2004).

- Détermination des proportions de base des constituants. Les dosages des constituants sont déterminés en fonction des objectifs du béton en utilisant des modèles prévisionnels de résistance et/ou d'ouvrabilité. Cependant, afin de limiter la consommation de ciment, la tendance actuelle consiste à utiliser les dosages à leurs valeurs seuils imposés par la norme EN 206-1 (Afnor, Norme NF EN 206-1, 2014).
- Ajustement de la formulation en fonction de la classe d'exposition de l'ouvrage afin de garantir une bonne durabilité.

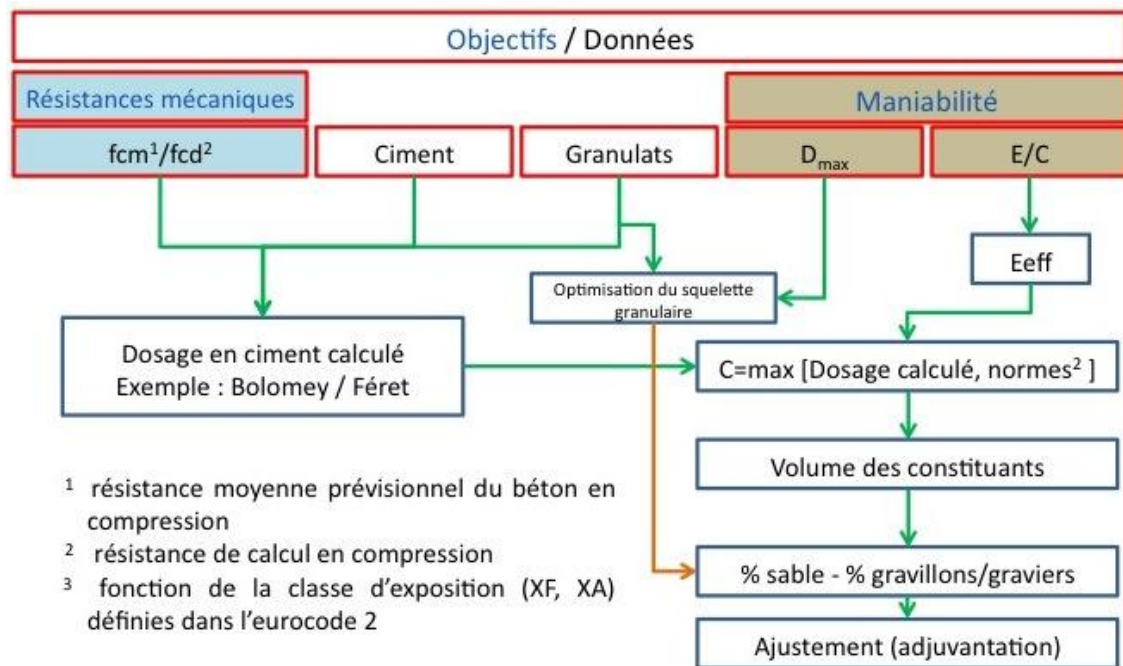


Figure 8 : Logigramme générique de la formulation des bétons

La rhéologie des bétons évolue pendant les phases initiales et dormantes, pour un béton de granulats naturels une perte de maniabilité est constatée sur des échéances variables en fonction du dosage en eau et en ciment. Cependant, la formulation de ces bétons est généralement mise au point seulement avec un objectif de consistance initiale exprimée sous

forme d'affaissement au cône, un ajustement peut ensuite être réalisé pour obtenir un maintien d'ouvrabilité correspondant aux objectifs fixés.

1.3.1 Principales méthodes

1.3.1.1 Optimisation du squelette granulaire

L'optimisation du squelette granulaire d'un béton a pour objectif d'obtenir un empilement compact et stable sans trop altérer la maniabilité de la pâte à l'état frais. L'optimisation du squelette granulaire passe ainsi par une recherche de sa compacité maximale qui correspond également à l'optimum de maniabilité pour une quantité de pâte donnée (Baron and Lesage, 1976). Cette correspondance compacité maximale / ouvrabilité optimale nécessite d'être adaptée pour des bétons très fluides (Bernier, 1983).

Plusieurs méthodes d'optimisation ont été mises au point depuis de nombreuses années. Deux types d'optimisation granulaires ont été débattus : répartition granulaire continue (Caquot, Faury, etc.) ou discontinue (Valette).

Les bétons actuels sont formulés très souvent avec un objectif de grande ouvrabilité. Ainsi, l'optimisation de squelettes granulaires discontinus est une méthode moins adaptée (Osta, 2011). C'est pourquoi, seules les méthodes continues, répondant aux exigences actuelles, sont présentées par la suite. Parmi les méthodes les plus récentes, celle de De Larrard (François de Larrard, 2000) propose une méthode d'optimisation d'un squelette granulaire continu qui intègre la mesure de la compacité de chacune des fractions granulaires. Cette méthode impose d'avoir recours à des moyens de calculs numériques.

Seules les méthodes simples basées sur des compacités prévisionnelles empiriques sont présentées dans ce qui suit. La justification de ce choix de méthodes pour les bétons de granulats recyclés sera détaillée et discutée au chapitre 3.

Méthode de Caquot

La méthode de Caquot est une méthode dont l'origine expérimentale, basée sur la théorie de l'empilement granulaire, a montré que la distribution granulaire optimale de référence suit une courbe bilinéaire lorsqu'exprimée en $\sqrt[5]{d}$.

Ainsi, pour déterminer la compacité maximale, la méthode de Caquot propose de modéliser la porosité du mélange granulaire d/D selon l'équation (François de Larrard, 2000) :

$$N_{min} = \sqrt[5]{d/D}$$

Avec :

- N_{min} la porosité minimale

- D le diamètre du plus gros grain
- d le diamètre du plus petit grain

Cette équation permet ainsi de déterminer les proportions relatives des différents grains du mélange en considérant que la distribution granulaire est modélisée par une suite géométrique de raison k (Bernier, 2004) :

$$P_k - P_{k-1} = A \times \sqrt[5]{d_k}$$

En considérant : $A = \frac{V_{g1}}{\sum_{j=1}^n V_{gj}} \frac{1}{(d_1)^{1/5}}$

Avec :

- d_i : la dimension du grain i
- P_i la proportion du grain de dimension d_i
- V_{gi} le volume de granulats de dimension i

Méthode de Faury

La méthode de Faury se base sur les travaux de Caquot mais différencie les éléments moyens et fins des éléments grossiers, cette frontière étant fixée à $D/2$. Ainsi, Comme dans le modèle de Caquot, la courbe caractéristique de la distribution granulaire permettant d'obtenir une compacité maximale est une courbe bilinéaire lorsqu'exprimée en $\sqrt[5]{d}$ dont le changement de pente correspond à la séparation entre les deux domaines éléments fins et moyen / éléments grossier. On définit les coordonnées de ce point $\{D/2 ; P_{(D/2)}\}$ (Bernier, 2004) ; (Zdiri, 2008) ; (Dreux, 1982) :

$$P_{(D/2)} = A + \sqrt[5]{D} + 17 \times \frac{B}{R/D + 0,75}$$

Avec :

- $P_{(D/2)}$: proportion du grain de dimension $D/2$
- A un coefficient dépendant de la maniabilité (valeur tabulée variant de 22 à 38, augmente avec l'angularité du granulat)
- B un coefficient variant de 1 à 2 lié à la consistance du béton, aux conditions de serrage (1 pour un serrage « énergétique » ; 1,5 pour un serrage normal)
- R le rayon moyen du moule traduisant l'effet de paroi, le quotient du volume de béton par la surface de paroi mouillée par le béton

Méthode de Bolomey

La méthode de Bolomey (Dreux, 1990) ; (Zdiri, 2008) propose de reconstituer, à partir des granulats à disposition, un squelette granulaire, théoriquement continu, qui se rapproche d'une courbe théorique. Cette courbe de référence répond à l'équation :

$$P_d = A + (100 - A) \times \sqrt{d/D}$$

Avec :

- P_d le pourcentage de passant au tamis d'ouverture d
- D le diamètre du plus gros granulat
- A un coefficient variant ajustable fonction soit du dosage en ciment soit de la maniabilité souhaitée

Méthode d'Abrams

La méthode d'Abrams (Dreux, 1982) est une règle de mélange dont l'objectif d'obtenir un module de finesse idéal global pour l'ensemble du granulat final à partir des différents granulats à disposition. Cet objectif de module de finesse doit permettre de réduire au maximum le volume des vides dans le squelette et donc d'optimiser la compacité. Cette méthode est déclinée dans les pays anglo-saxon sous l'appellation ACI 211 (méthode américaine)

Méthode de Baron et Lesage

La détermination de l'optimum du squelette granulaire dans la méthode de Baron et Lesage s'appuie sur la recherche d'une maniabilité granulaire optimale (Dreux, 1982). Pour cela, un processus expérimental itératif est effectué afin d'obtenir le rapport Sable/(Graviers + Gravillons) qui donne la maniabilité optimale du béton. Lors de la mise au point de cette méthode, un appareil expérimental, le maniabilimètre Lesage (désormais appelé maniabilimètre LCPC) a été développé. Cette méthode est basée sur un retour d'expériences et nécessite un grand nombre de gâchées.

Méthode de Dreux

La méthode de Dreux (François de Larrard, 2000) ; (Bernier, 2004) basée sur l'expérience consiste à reconstituer un granulat dont la distribution granulaire se confond avec une courbe de référence bilinéaire dans un plan semi-logarithmique. Cette méthode se rapproche de celle de Faury par l'allure de la courbe optimale bilinéaire. Le changement de pente de cette courbe correspond au point :

- dont l'abscisse x dépend de la dimension D du plus gros granulat :
 - o si $D \leq 25$ mm, alors $x = D/2$
 - o si $D > 25$ mm, alors $x = (D-5)/2$

- dont l'ordonnée $y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$

Avec :

- K terme de correction dépendant de l'arrangement granulaire (angularité, teneur en ciment, intensité du serrage)
- K_s terme de correction dépendant du module de finesse du sable
- K_p terme de correction lors de la réalisation d'un béton pompable

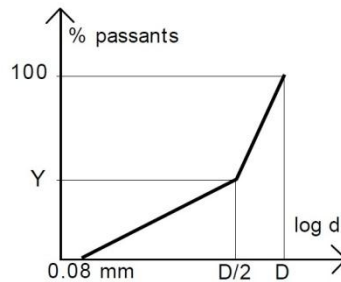


Fig. 4.6.3. Courbe granulométrique de référence selon Dreux [Dreux 1970].

Le détail du calcul du squelette granulaire selon la méthode de Dreux sera présenté dans la partie matériaux et méthode du chapitre 3.

1.3.1.2 Calcul des proportions des constituants

Le calcul des proportions des constituants aboutit à un dosage volumétrique de ces derniers retranscrit en dosage pondéral afin de faciliter la mise en œuvre du béton sur le chantier. Le nombre de facteurs pris en compte dans les différentes méthodes ne peut être exhaustif et tous les paramètres influents sur les propriétés des bétons, décrits en première partie de ce chapitre, ne sont pas intégrés dans les modèles de calcul prédictifs ou dans les abaques de résistance et d'ouvrabilité.

Elles reposent sur :

- la détermination d'un rapport E/C,
- la détermination d'un dosage en ciment et/ou en eau,
- la détermination du volume des granulats. Il est tiré du volume de la phase solide déduit d'une estimation de la compacité du béton dans les méthodes simples ; soit pas abaques (Dreux, 1990), soit par calcul (Volume des granulats = 1 - volume {ciment + eau + air entraîné} (Osta, 2011)).

Les modèles les plus couramment utilisés sont décrits ci-dessous. Ils permettent de déterminer les dosages en ciment et en eau.

Formule de Féret

La formule de Féret (Association technique de l'industrie des liants hydrauliques et al., 1996) est basée sur l'estimation de la résistance d'un mortier ou d'un béton, elle relie les paramètres suivants :

$$f_{c28j} = K' \times R_{c28j} \times \left[\frac{V_c}{(V_c + V_e + V_v)} \right]^2$$

Avec :

- f_{c28j} la résistance en compression requise à 28 jours [MPa]
- K' un coefficient dépendant de la taille et de la distribution granulaire des granulats (≈ 7 pour les mortiers ; ≈ 5 pour les bétons)
- R_{c28j} la classe de résistance vraie du ciment considéré à 28 jours [MPa]
- V_c le volume de ciment
- V_e le volume d'eau
- V_v le volume total d'air dans le matériau

Formule de Bolomey

La formule de Bolomey (Association technique de l'industrie des liants hydrauliques et al., 1996) propose le modèle prédictif des résistances mécaniques des bétons suivant :

$$f_{c28j} = G \times R_{c28j} \times \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

Avec :

- f_{c28j} la résistance en compression requise à 28 jours [MPa]
- G un coefficient dépendant de la qualité des granulats
- R_{c28j} la classe de résistance vraie du ciment considéré à 28 jours [MPa]
- C le dosage massique en ciment
- E le dosage massique en eau]

Baron et Ollivier (Association technique de l'industrie des liants hydrauliques et al., 1996) proposent une formule généralisée de la relation de Bolomey

$$f_{c28j} = K \times R_{c28j} \times \left(\frac{C}{E + V} - 0,5 \right)$$

Formule de Bolomey généralisée

La relation de Bolomey mise en place dans les années 1935 a été modifiée pour prendre en compte la teneur en air à l'état frais, ainsi elle donne (Équation 1).

$$f_{c28} = f_m * K_b * \left(\frac{C}{(E + V)} - 0,5 \right)$$

Équation 1

Où :

f_{c28} étant la résistance moyenne prévisionnelle à 28 Jours

f_m classe vraie du ciment soit dans notre cas $F_{CE} = 65 \text{ MPa}$

K_b le coefficient granulaire.

Les valeurs de K_b sont définies selon la nature minéralogique du granulat ou l'état poreux des granulats pour les granulats calcaires.

La difficulté d'application des méthodes de Bolomey ou Feret réside dans la détermination du coefficient granulaire.

Méthode de Baron et Lesage

La méthode de formulation de Baron et Lesage recherche par optimisation une formule de béton possédant 3 qualités :

- Un minimum de vide,
- Un minimum d'eau,
- Une homogénéité maximale (minimum de ségrégabilité).

La recherche de la maniabilité optimale du mélange granulaire est étendue à celle de la maniabilité du mélange.

Méthode de Dreux-Gorisse

La méthode Dreux-Gorisse s'appuie sur la formule de Bolomey pour déterminer le rapport E_{eff}/C .

Par la suite un abaque (Figure 9) propose des corrélations entre le rapport C/E , le dosage en ciment et l'ouvrabilité exprimée sous la forme d'un affaissement au cône d'Abrams. L'incorporation d'adjuvants est prise en compte de manière simplifiée par le décalage des courbes de l'abaque

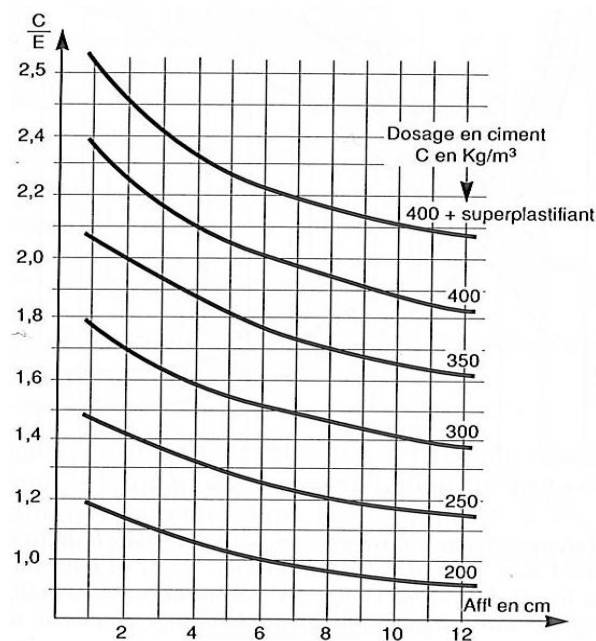


Figure 9 : Corrélations entre le rapport C/E , le dosage en ciment et l'ouvrabilité (Dreux, 1990)

Autres méthodes

Des modèles plus complets tels que le modèle proposé par De Larrard (François de Larrard, 2000), (Larrard and Buil, 1987) introduisent le critère Epaisseur Maximal de Pâte qui correspond à la distance entre deux gros grains adjacents dans un empilement aléatoire. Cette épaisseur de pâte est dépendante de la compacité du squelette granulaire, elle-même déterminée par le Modèle d'Empilement Compressible basé sur la compacité résiduelle des granulats mesurée expérimentalement en amont. Ce modèle nécessite l'utilisation d'un logiciel bétonlab pro.

1.3.1.3 *Ajustement des formulations*

Le dosage en ciment, défini selon les méthodes décrites précédemment, peut être ajusté afin de répondre aux exigences de la norme EN 206-1 (classe d'exposition) ou de certains DTU (en fonction de la destination de l'ouvrage, par exemple un dallage).

La valeur pratique retenue pour le dosage en ciment devrait être la valeur maximale entre celle obtenue par calcul (Bolomey, Féret) et celles définies par les textes règlementaires. Le facteur économique induit souvent une approche minimaliste du dosage en ciment qui est alors fixé et duquel sont déduites les proportions des autres constituants.

Hormis les corrections sur la teneur en eau des granulats et des éventuels adjuvants au moment du gâchage, un ajustement de la teneur en eau tenant compte de l'adjuvantation pourra être réalisé à l'issue d'une gâchée test.

1.3.2 **MBE : Mortier de béton équivalent**

1.3.2.1 *Origine de la méthode*

Dans les années 1990, une méthode empirique d'aide à la formulation des bétons adjuvés a été mise au point dans le cadre du projet national Calibé (Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil (France), 2004). L'objectif de cette méthode est ainsi de reproduire en laboratoire et sur mortier des conditions proches du malaxage du béton en centrale ou sur chantier en diminuant le nombre de gâchées de béton. On cherche généralement à identifier et tester l'efficacité des adjuvants, démarche fastidieuse et consommatrice de matériaux.

1.3.2.2 *Principe*

La méthode s'appuie sur l'hypothèse qu'il existe une corrélation entre les propriétés rhéologiques d'un béton et celles du mortier qui le compose. La constitution du « mortier qui compose le béton » correspond au matériau frais passant au tamis de 5mm, il est appelé Mortier de Béton Equivalent (MBE). Ainsi le mortier (pâte + sable) adhérant aux gravillons et graviers (>5mm) ne composent pas ce MBE.

1.3.2.3 Méthode de composition

Afin de déterminer la composition de ces MBE, les phénomènes mis en jeu dans la rhéologie des bétons à l'état frais ont été étudiés et il ressort que l'influence des surfaces de contacts entre constituants sur les propriétés à l'état frais est plus grande que celle de leurs volumes respectifs (Dierkens, 2005). Les mécanismes de frottement et de prise des hydrates à la surface des grains expliquent cette conclusion.

Plusieurs mortiers « corrigés » ont été testés dans le cadre de cette méthode et il s'avère que le mortier se rapprochant le plus de celui présent dans le béton vis-à-vis du comportement rhéologique à l'état frais est celui dans lequel une correction en sable de surface spécifique équivalente à celle des gravillons et graviers (>5 mm) est faite. Ainsi les surfaces de contact et donc la quantité de pâte adhérente restent identiques (Schwartzentruber and Catherine, 2000).

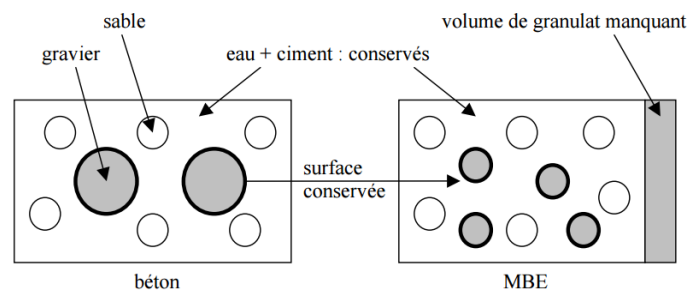


Figure 10 Passage du béton au MBE selon Dierkens (Dierkens, 2005)

Le détail du calcul des MBE sera présenté dans la partie matériaux et méthode du chapitre 3.

1.3.2.4 Limites de la méthode

Les corrélations établies entre un béton et son mortier équivalent sont valables selon la méthode Calibé, pour des granulats naturels. Chaque composition théorique de béton donnant lieu à une courbe de corrélation, il n'est pas à ce jour possible d'utiliser une courbe de corrélation universelle pour tous les types de granulat, les dosages en eau ou en ciment, même si cette pratique est courante dans le monde industriel comme première approche.

Par ailleurs les corrélations ne peuvent être établies que pour les essais de caractérisation de l'ouvrabilité. En effet, l'étendue granulométrique étant réduite, les distances inter granulaires sont augmentées (Dierkens, 2005), les temps de prise seront alors modifiés, ce qui pourra avoir une influence sur le maintien d'ouvrabilité. De plus, le gravier et le gravillon sont remplacés par un volume donc une masse moindre de sable (puisque c'est le rapport des surfaces de grains qui est équivalent), la capacité calorifique du mortier sera plus faible que celle du béton. *A contrario* sa chaleur d'hydratation totale est identique puisque les mêmes quantités d'eau et de ciment sont conservées pour un volume moindre. Ainsi les

températures atteintes seront plus élevées (à volume équivalent le dosage en ciment sera plus grand) tout comme les résistances mécaniques (Dierkens, 2005).

Pour des raisons du même ordre, l'ouvrabilité des MBE est plus grande que celles de leurs bétons correspondant et donc la mesure se fera à l'aide d'un essai d'étalement au mini cône (Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil (France), 2004). La corrélation établie (de type linéaire) relie ainsi l'étalement des MBE à l'affaissement des bétons (mesurée au cône d'Abrams) (Dierkens, 2005).

2 Les granulats recyclés de béton (GRB)

Dans cette partie, après une présentation de l'élaboration des granulats recyclés et de leurs potentielles utilisations, leurs constitutions et propriétés sont analysées afin de mettre en exergue les interactions entre celles-ci.

2.1 Elaboration et utilisation des granulats recyclés

2.1.1 L'élaboration des granulats recyclés à partir des gravats

A l'issue de la déconstruction, le traitement des déchets inertes est effectué sur des plateformes de recyclage. Sa complexité est due au mélange de déchets lorsqu'ils sont livrés : parmi les éléments retrouvés dans ces déchets on peut citer les mortiers, les bitumes, le gypse, le verre, la terre, des métaux, etc... (Zhao, 2014a). Ces déchets sont livrés sous forme de débris de matériaux de tailles grossières généralement appelés des gravats. Dès leur réception, ces gravats subissent un ensemble de traitement jusqu'à l'obtention des nouveaux matériaux (Schéma 1).



Schéma 1 : Déconstruction et élaboration des déchets

Les installations peuvent être fixes ou mobiles, ces dernières permettant de réaliser des interventions ponctuelles sur des plateformes de regroupement ou des chantiers de déconstruction et comporter selon les cas :

- une préparation avant concassage (réduction du volume par BRH, cisailles...);
- une fonction de pré criblage;
- un ou plusieurs niveaux de concassage;
- un ou plusieurs niveaux de criblage;
- un ou plusieurs niveaux de déferrailage;
- un poste de tri manuel et/ou mécanisé (aéroulique ou hydraulique).

Selon le gisement accepté en entrée et la qualité recherchée, l'installation de recyclage devra être équipée de tout ou partie de ces fonctions. D'une manière générale, les installations fixes sont les plus abouties et peuvent produire avec régularité plusieurs classes de matériaux bien déterminées (Cerema, 2014).

2.1.2 L'élimination des polluants

Lors du processus de traitement, des opérations visent à assainir le matériau. Les éléments qui sont ôtés des bétons sont le bois, le métal, le plâtre, le carton, le papier ou encore le plastique. Plusieurs techniques sont employées telles que l'élimination manuelle (tiges d'acier, plâtre, ...), la séparation magnétique (type déferrailleur par « overband »), l'élimination par jet d'air : (plastique, papier, carton, ...) ou encore l'élimination par flottation (bois, débris dont la masse volumique est inférieure à celle de l'eau).

Selon l'origine de l'ouvrage démolé, les granulats recyclés obtenus peuvent être de trois types :

- Les granulats recyclés de béton désignés par RTB : recyclés tout béton ;
- Les granulats comportant de l'enrobé, désignés par RE ou REB : recyclés enrobés ou recyclés enrobés/béton ;
- Les granulats comportant des matériaux de construction variables non triés (bétons, briques, carrelage...) désignés par RTV : recyclé tout venant (Sandrine Braymand, 2014).

Ils doivent être constitués exclusivement de déchets inertes tels que définis selon la directive européenne 1999/31/CE du 26 Avril 1999 : Un déchet inerte est défini comme inerte " *s'il ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante. Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique, chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine*" (Legifrance.gov.fr, 2015).

Actuellement, la voie de valorisation de ces granulats recyclés la plus pratiquée est celle de leur utilisation dans les travaux publics. Les granulats recyclés ainsi produits sont alors valorisés sous forme de grave de démolition (Cerema, 2014).

L'exploitation d'une autre source d'approvisionnement en granulats pour bétons est envisageable. Dans ce contexte, un projet national ayant pour thèse le recyclage complet des bétons « Récybéton » a été initié en 2011 (Colina, 2010); les études de faisabilité ont mis en exergue les défis suivants à relever :

- Techniques : Vis-à-vis de la réglementation normative, les déchets de démolition obtenus sont-ils exploitables ou non ? le problème de constance et d'uniformité de la qualité de granulats produits est aussi un frein (Dao, 2012). Les méthodes de caractérisation des granulats recyclés sont-elles les mêmes que celles utilisées pour les caractérisations des matériaux naturels ? les bétons formulés avec des granulats recyclés de béton possèdent –ils les mêmes propriétés que ceux formulés avec des granulats naturels ?
- Economiques : Les matériaux recyclés avant leur ré emploi subissent un traitement en amont afin de soustraire toutes les impuretés qui y sont contenus. Le coût de ce traitement vis-à-vis de celui réservé à l'obtention des granulats naturels ne favorise pas l'emploi des déchets ;
- Psychologiques: depuis des décennies, l'homme s'est servi des granulats naturels comme matériaux de construction. N'ayant pas encore un fort retour d'expérience de ces nouveaux matériaux, ils sont méfiants vis-à-vis de son emploi.

Pour répondre à ces problématiques, la synthèse bibliographique qui suit est axée sur l'étude des propriétés des granulats recyclés et leurs influences sur le comportement des bétons fabriqués avec les granulats recyclés tant à l'état frais que durci.

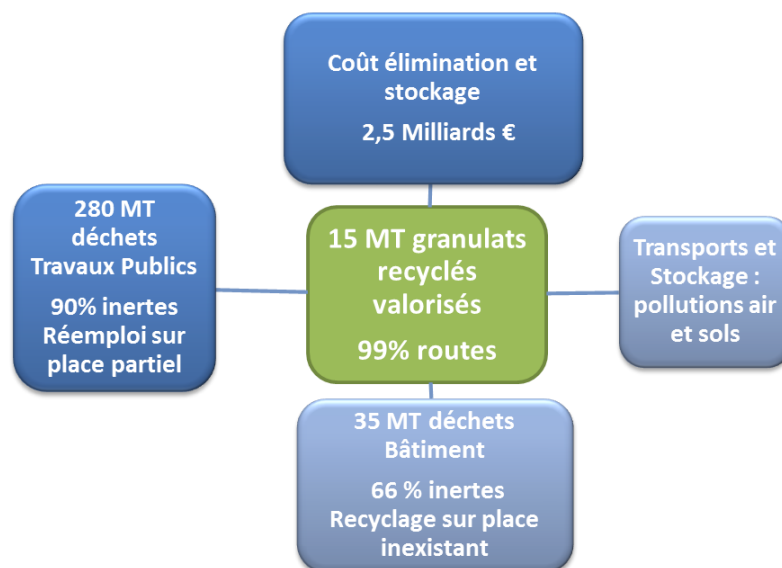


Figure 11 : Gestion des déchets du Génie Civil, décapage des routes, déconstruction d'ouvrages (Braymand et al., 2014)

2.1.3 Utilisation des granulats recyclés dans les bétons conformément aux normes en vigueur

Les granulats recyclés ne font l'objet d'aucune norme spécifique. C'est pourquoi, malgré leurs importantes différences avec les granulats naturels, les granulats de béton recyclés doivent se conformer aux spécifications génériques des normes NF EN 12 620 (Afnor, Norme NF EN 12620, 2003) et la NF P 18-545 (Afnor, NF P 18-545, 2011). Lorsque leur utilisation comme granulat à béton est envisagée, les spécifications des normes suscitées doivent être complétées par des dispositions particulières définies dans la norme NF EN 206-1/CN (Afnor, Norme NF EN 206-1/CN, 2012). Les dispositions réglementaires concernant l'utilisation des granulats recyclés dans les bétons sont en pleine évolution. En 2004, l'édition de la norme EN 206-1 (Afnor, Norme NF EN 206-1, 2004) ne prévoyait pas de dispositions particulières et renvoyait aux normes nationales pour ces dispositions.

Depuis 2012, la norme EN 206-1/CN (Afnor, Norme NF EN 206-1/CN, 2012) (version nationale de la norme EN 206) prévoit des dispositions particulières pour les gravillons (ou graviers) recyclés et les sables. Ces dispositions comportent des éléments sur

- Leur code basé sur une classification issue de la norme EN 12 620 de 2008, et la norme EN 933-11 de 2009.
- Les exigences spécifiques auxquelles ils doivent répondre
- Les taux de substitution

Ce sont ces taux qui sont référencés dans la suite du document

En novembre 2014, la norme européenne EN 206-1 (Afnor, Norme NF EN 206-1, 2014) a été mise à jour en intégrant l'utilisation des granulats recyclés (Annexe E : recommandation pour l'utilisation de gravillon recyclés - coarse aggregate dans le document original, soit gravillon et gravier).

Cependant, la codification (nombre de type et appellation du code) et les taux de substitution autorisés diffèrent de la version EN 206-1/CN. De plus, aucune recommandation relative à l'utilisation des sables recyclés n'y figure contrairement à la version EN 206-1/CN de 2012.

Dans le manuscrit de thèse, les références normatives utilisées se reportent à la version EN 206-1/CN

En annexe 1 une chronologie de l'évolution des normes avec leur contenu (codification/exigences/taux de substitution) se référant aux granulats recyclés est présentée.

2.2 Les propriétés des granulats recyclés de béton (GRB)

Les granulats recyclés, provenant de plateformes, sont issus de bétons dont la composition initiale est souvent inconnue. Un grand nombre d'études a été réalisé sur la caractérisation des granulats recyclés, il est donc possible d'évaluer leur variabilité de compositions et de

propriétés. Les principaux résultats en ce qui concerne leurs comportements physico-chimiques et mécaniques sont présentés dans cette section.

2.2.1 Constitution

Dans les granulats recyclés, nous pouvons distinguer (Figure 12) :

- Les fines recyclées

Les fines recyclées sont des éléments broyés dont la taille peut être comprise entre 0 et 500 μm . Ces éléments sont essentiellement constitués de pâte de ciment durci ou/et des granulats broyés d'origine naturels ou/et du ciment anhydre.

- Le sable recyclé (granulats fins)

Généralement de fraction granulaire 0/4 mm, il est constitué du sable de la fraction 500 μm à 4 mm plus les éléments fins (0/500 μm). Ce dernier est constitué des granulats d'origine naturelle et de mortier primaire qui comprend à son tour du ciment anhydre et hydraté.

- Les gravillons et les graviers recyclés (granulats grossiers) : ce sont les granulats recyclés dont la fraction granulaire est supérieure à 4 mm. Leur constitution est proche de celle des sables recyclés avec une teneur en mortier accolé supérieure.

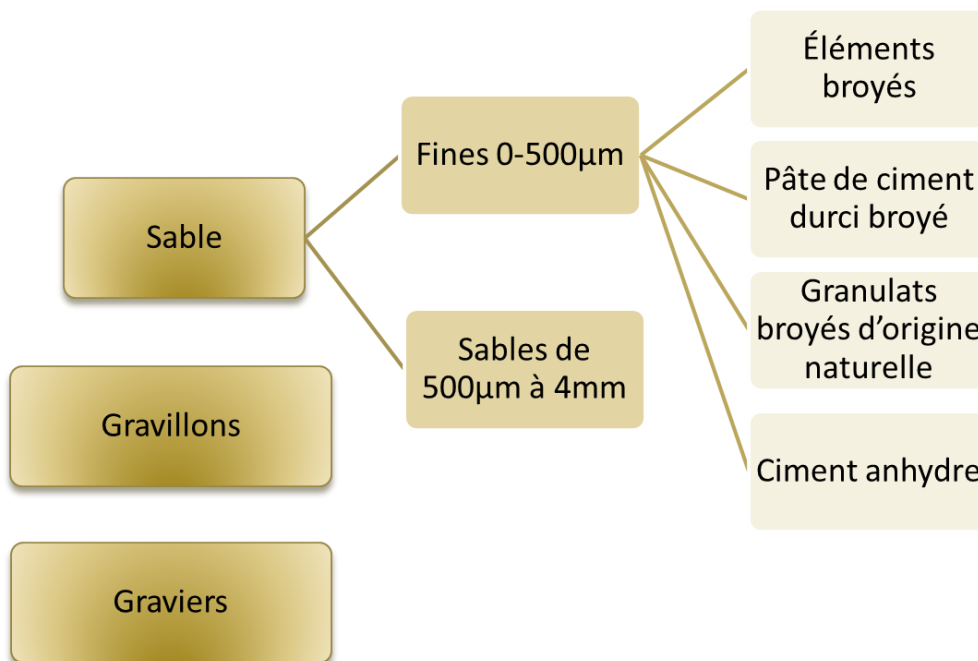


Figure 12 : Constituants des granulats recyclés

Ainsi, les granulats recyclés sont constitués de granulats enrobés de mortier primaire, ces éléments peuvent être attachés ou séparés (Figure 13). La présence de ce mortier primaire est

à l'origine des différences de comportement entre les granulats de béton recyclés et les granulats naturels. L'ampleur de ces modifications de comportement, généralement néfastes pour les béton à l'état frais et/ou durci est dépendant de la quantité de mortier primaire compris dans le granulat recyclé (Katz, 2003).

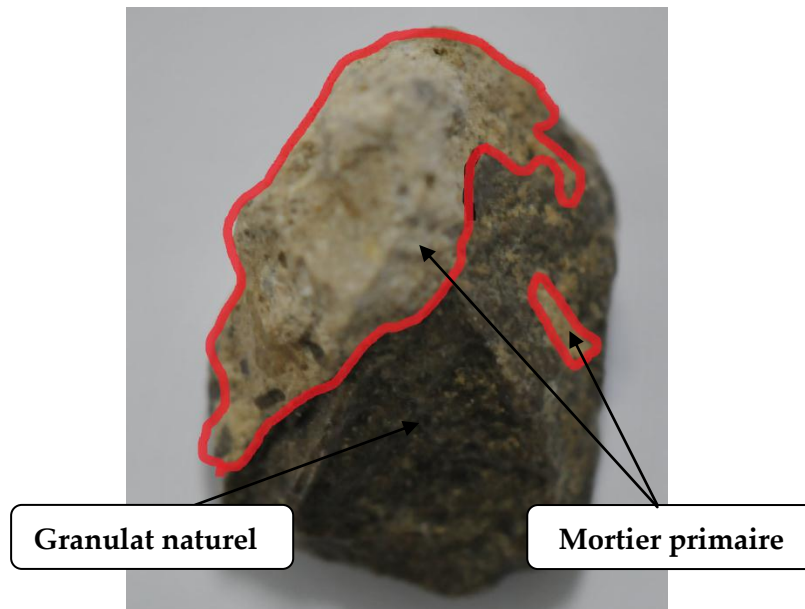


Figure 13 : Constitution des granulats recyclés

Peu d'auteurs se sont attachés à relier teneur en mortier et propriétés des granulats recyclés. Cependant de nombreux auteurs ont cherché à estimer la quantité de mortiers primaire présent (accolé ou non). (Voir Annexe 2.)

Les méthodes envisageables pour estimer la quantité de mortier sont de plusieurs natures et basées sur 2 approches :

- Méthodes destructives :
 - o Chimiques, par attaque acide
 - o Thermiques, par réalisation de cycles gel-dégel ou de montée en température élevée avec une trempe post traitement
 - o Physiques, par impulsion électriques, ou sonores (micro-ondes)
 - o Mécaniques par abrasion ou usure
- Méthodes non destructives
 - o Analyse d'image (différentiation de couleur ou de teinte)
 - o Analyse indirecte : corrélation avec des mesures de porosité ou de masse volumiques

Peu d'études analysent la fiabilité de ces méthodes (rendement et comparaison avec les valeurs de masses volumiques des granulats parents par exemple). Leurs inconvénients sont parfois indiqués (coût, détérioration du granulat parent, passage à l'échelle industrielle,...).

De plus, les méthodes mécaniques seules sont peu étudiées.

Il convient donc de rester prudent sur les valeurs obtenues et reportées en annexe 2.

Les valeurs moyennes et écart types calculés et donnés ainsi que la dispersion des valeurs représentée Figure 14, indiquent qu'il est difficile de donner une valeur moyenne de teneur en mortier pour les granulats grossiers, soit du fait de sa variation d'un lot à l'autre, soit du fait du manque de fiabilité de la méthode.

Cependant il peut être noté que les granulats fins (sables) présentent des teneurs en mortier plus élevées (10 à 15% de plus) lorsque l'analyse est faite sur un même prélèvement.

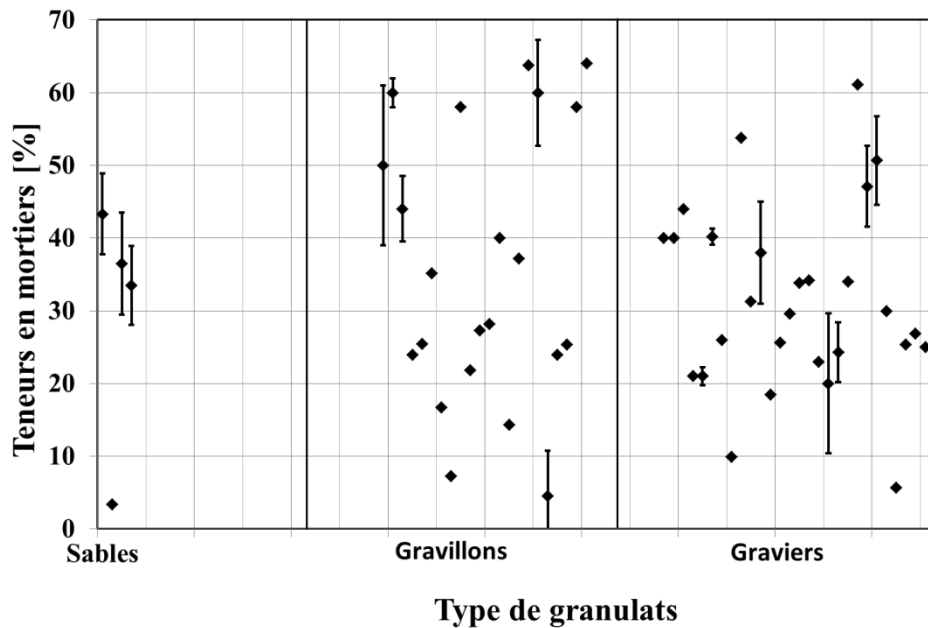


Figure 14 : Teneurs en mortiers

Tableau 2: Estimation des teneurs en mortiers

Particularité du granulat	sable	gravillon	gravier
Valeurs Moyennes/ Ecart type	29,18 / 15,31	35,87 / 18,42	31,55 / 12,29

L'interaction de cette présence de mortier (et de sa teneur lorsqu'une étude comparative est faite) avec les propriétés des granulats est présentée dans la suite de ce document.

2.2.2 Forme et granulométrie

2.2.2.1 Forme et squelette granulaire

A l'issue du concassage des gravats, des granulats sont obtenus dont la granulométrie est dépendante du type de concasseur utilisé, et est fortement liée à la qualité du béton de départ car un béton de plus faible résistance conduit à une teneur en fines plus élevée

(International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, 1992) ; (Sri Ravindrarajah and Tam, 1987a) ; (Sri Ravindrarajah and Tam, 1987b).

La forme des granulats recyclés produits est angulaire d'une part, allongée d'autre part (Dao, 2012). La morphologie des granulats est susceptible d'affecter également la mesure de sa distribution. Cependant, il n'est pas fait état dans les études sur les granulats recyclés d'une influence de la modification de la forme des granulats sur l'interprétation de l'analyse granulométrique.

La détermination du coefficient d'aplatissement des granulats défini selon la norme NF EN 933-3 (Afnor, Norme, NF EN 933-3, 1997) s'applique aux granulats naturels, artificiels ou recyclés dont la taille est comprise entre 4 et 100 mm. C'est un critère de la forme des granulats. Le concassage dans le cas des granulats naturels se fait en deux phases : un concassage primaire et un concassage secondaire. Ce dernier favorise l'obtention d'un granulat plus rond et moins pointu tandis que les granulats recyclés qui ne subissent que la procédure du concassage primaire sont plus plats et plus nets (Barbudo et al., 2013). C'est ainsi que les granulats recyclés sont caractérisés par des coefficients d'aplatissement faibles comparés aux granulats naturels.

Le squelette granulaire (distribution granulométrique) des sables recyclés est différent de celui des sables naturels tandis que celui des gravillons recyclés et naturels sont semblables (Figure 15) (Evangelista and de Brito, 2007) ; (Corinaldesi and Moriconi, 2009).

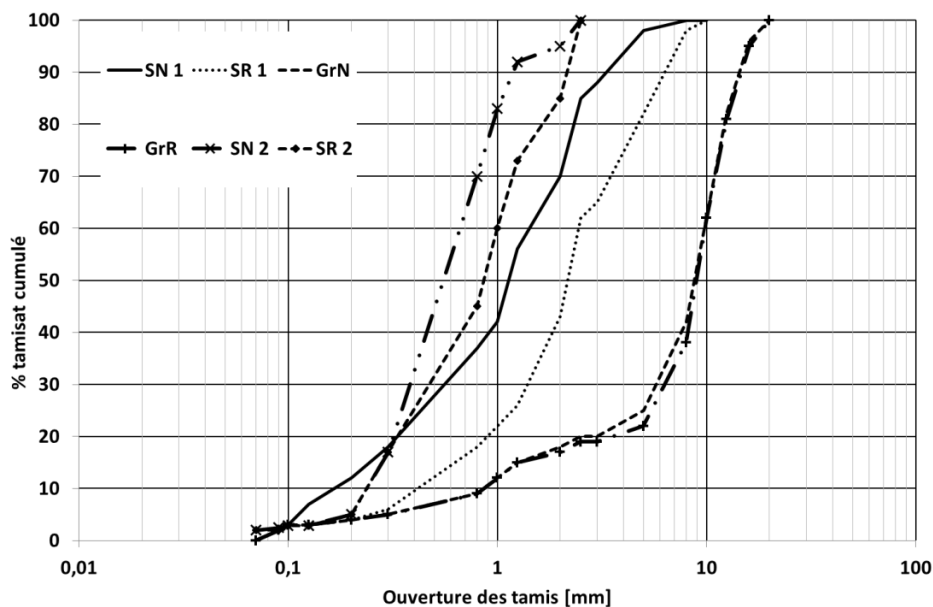


Figure 15 : Distribution granulométrique de sables (S) et gravillons (Gr) naturels (N) et recyclés (R) (Evangelista and de Brito, 2007) ; (Corinaldesi and Moriconi, 2009)

2.2.2.2 Module de finesse des sables

A partir des courbes granulométriques (Figure 15), des modules de finesse sont calculés. Le module de finesse représente une valeur moyenne de la distribution granulaire d'un sable.

Sa valeur est ensuite utilisée ou vérifiée lors de la réalisation des compositions de bétons, elle permet de classer les granulats.

Tableau 3 : classification des sables fonction du module de finesse (NF EN 12620) (Afnor, Norme NF EN 12620, 2003)

Module de finesse selon la norme Française EN 12620		
CF : sable à gros grains	MF : sable à moyen grains	FF : sable à grains fins
4,0 à 2,4	2,8 à 1,5	2,1 à 0,6

Des répartitions granulométriques différentes peuvent conduire à des modules de finesse égaux, ainsi Evangelista trouve un module moyen de 2,38 pour les 2 sables (Evangelista and de Brito, 2007). Cependant les valeurs des modules de finesse varient d'une plateforme à une autre ou d'une carrière à une autre. Les valeurs obtenues permettent de considérer le sable recyclé comme un sable à béton. (Tableau 4) selon les normes, à l'exception de celui trouvé par Meftah (Meftah et al., 2013) ; (Meftah and Arabi, 2011) pour lequel du sable à grains fins a été utilisé.

Tableau 4 : Modules de finesse selon la NF EN 12 620

Type de granulats	Module de finesse selon NF EN 12 620	Nombre d'échantillons	Auteurs
GR	2,38	1	(Evangelista and de Brito, 2007)
	3,8	1	(Gómez-Soberón, 2002)
	3,64	1	(Dao, 2012)
GN (siliceux)	3,1		
GN (Calcaire)	3,4		
GN	2,38	1	(Evangelista and de Brito, 2007)
	1,27	1	(Meftah et al., 2013) ; (Meftah and Arabi, 2011)
	2,1		(Poon et al., 2006)
	3,3	1	(Gómez-Soberón, 2002)
Valeurs moyennes/écart type pour les GR	3,27 /0,6		-
Valeurs moyennes/écart type pour les GN	2,59 / 0,76		-

2.2.2.3 Teneur en fines et surfaces spécifiques

Quelques auteurs ont spécifiquement déterminé les proportions de fines (< 63 µm) des sables recyclés (0/4mm ou 0/6mm). La valeur maximale de la teneur en éléments fins du sable recyclé est proche de celle du granulat naturel. Selon l'origine du granulat naturel et le procédé de fabrication du granulat recyclé, cette teneur varie entre 0,5 et 8% environ. Les granulats recyclés de deuxième génération (2 recyclages successifs réalisés en laboratoire) présentent une teneur en fines supérieure à celle des granulats recyclés de première génération fabriqués en laboratoire dans les mêmes conditions à partir des mêmes matériaux

d'origine (4 à 8% comparativement à 0,1 à 1%) (Dao, 2012). Un granulat issu de plateforme de recyclage (stockage extérieur) peut présenter des teneurs en fines proches de 8 à 10% dès le premier recyclage (Braymand et al., 2015a).

Ces teneurs sont fortement dépendantes du processus de concassage puis surtout de scalpage et du mode de conservation (abri du vent). Cependant ces teneurs sont toutes inférieures à la valeur limite supérieure définie dans la norme XP P 18 545 qui est de 16 % (Afnor, NF P 18-545, 2011).

Pour des teneurs en fines (<63 µm) similaires, la répartition granulométrique étudiée par sédimentométrie sur la fraction 0-500 µm est très différente entre un granulat naturel et un granulat recyclé. Sur cette fraction, des teneurs 5 à 10 fois supérieures en éléments inférieurs à 10 µm sont obtenues sur les granulats recyclés. L'analyse granulométrique d'un sable recyclé doit donc être complétée soit par une analyse sédimentométrique, soit par une analyse laser.

L'analyse des surfaces spécifiques des éléments fins inférieurs à 63 µm déterminées par la méthode BET confirment ces résultats sur les fractions fines (Tableau 5). En effet les valeurs des surfaces spécifiques des fines recyclées sont au moins 4 fois supérieures à celles des fines naturelles ; avec cependant des variations d'un lot à l'autre non négligeables (Fumoto and Yamada, 2002).

Il peut être constaté que la surface spécifique des granulats recyclés obtenus de façon industrielle sur les plateformes est souvent faible que celle des granulats obtenus en laboratoire (Zhao, 2014a).

Tableau 5 : Surface spécifique des fines de granulats recyclés

Type de granulats	Surface spécifique m ² /g	Auteurs
SN (Japon)	1,83	(Fumoto and Yamada, 2002)
SN (Chine)	0,82	
SN broyé calcaire	0,74	
SR plateforme	4,08	
SR démolition d'un bâtiment de 1932	4,91	
SR démolition d'un bâtiment de 1957	4,42	
SR plateforme (France)	8,2	(Zhao, 2014a)
SR plateforme (France)	4,9	
SR plateforme (France)	5,1	
SR laboratoire (France)	7,5	
Valeurs moyennes/écart type pour les GR	5,59 ± 1,48	
Valeurs moyennes/écart type pour les GN	1,33 ± 0,51	

2.2.2.4 Propreté des sables (éléments fins)

La propreté des sables est évaluée à l'aide des essais d'équivalents de sable et de d'absorption au bleu de méthylène. Seule la propreté correspondant à une teneur en argile est évaluée par ces tests. Ainsi, au regard des seuils normatifs (cf Tableau 6), les granulats étudiés sont considérés propres. Des valeurs d'équivalent de sable supérieures à 70% voire 80% sont préconisées pour la fabrication des bétons de ce qui correspond à une faible proportion d'éléments fins argileux. Une valeur d'équivalent de sable inférieur à 60% ne permet pas d'utiliser au regard des normes les granulats en tant que granulats à béton, le risque de retrait lié à la proportion d'argile est alors trop important. Les résultats d'absorption au bleu confirment ces teneurs en argiles acceptables.

Tableau 6 : Equivalent de sable et Bleu de méthylène

Essais	Type de granulats	Valeurs	Auteurs
Equivalent sable sur fraction 0/2 mm (%)	GN (siliceux)	85	(Dao, 2012)
	GN (Calcaire)	74	
	GN	93,8	(Gómez-Soberón, 2002)
	GR	93,6 84,66	
Mesure au Bleu sur fraction 0/2 mm (g/kg)	GR	0,2	(Dao, 2012)
	GN (siliceux)	1	
	GN (Calcaire)	1,4	

Les auteurs n'ont pas précisé la provenance des granulats ainsi une analyse pertinente reliant l'origine du granulat et surtout ses conditions de stockage à la teneur en argile ne peut pas être proposée ici. En outre, il n'est pas surprenant de trouver de faible teneur en argile dans les granulats recyclés, ce critère n'est pas discriminant de la propreté des sables recyclés au regard d'autres éléments constitutifs que les seules argiles.

2.2.3 Porosité

La porosité est directement dépendante de la teneur en mortier primaire qu'il soit accolé ou non. Ainsi, comme la teneur en mortier, la porosité diminue avec la taille des granulats recyclés (Gómez-Soberón, 2002) ; ou des granulats naturels (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Cependant, cette porosité est aussi fonction de la nature du granulat naturel parent utilisé (Dao, 2012). Elle est plus importante pour les granulats recyclés (13% \pm 3% contre 0 à 4%) dont le béton parent a été formulé avec des granulats calcaires qu'avec des granulats siliceux, le granulat calcaire parent étant lui-même plus poreux.

Elle dépend également de l'état de carbonatation du granulat recyclé. La carbonatation diminue la porosité dans un granulat recyclé : la plage de variation des pores passe de 0,01-0,1micron à 0,001-0,01 micron lorsque les granulats recyclés sont carbonatés (Zhao, 2014a) ; (Arandigoyen et al., 2006). La transformation de la portlandite en calcite est à l'origine de cette baisse de porosité (Morandeu, 2013). La qualité du béton parent en termes de résistance n'influe que très peu sur cette porosité puisque des bétons parents de résistance visée respectivement de 35 et 65 MPa conduisent à des valeurs de porosité de granulats

recyclés très proches selon Dao (Dao, 2012), comme le montrent les résultats présentés Tableau 7 .

Tableau 7 : Porosité des granulats

Type de granulats	Classe [mm]	Porosité [%]	Auteurs
Recyclé	5/10	14,9	(Gómez-Soberón, 2002); Porosité totale à l'eau
	10/20	13,4	
Naturel	5/12	2,8	
	10/20	2,7	
Recyclé	6/20	12,5	(Zaharieva et al., 2003) ; (Buyle-Bodin, F and Hadjieva-Zaharieva, 2002)
Naturel		0,3	
Recyclé	4/12	11,33	(González-Fonteboa and Martínez-Abella, 2008)
	10/25	10,88	
Naturel	0/4	2,36	
	4/12	0,19	
	10/25	0,45	
Recyclé	5/25	12,3	(Abbas et al., 2009)
Naturel calcaire		8,1	
		0,9	
		2,4	
Recyclé	5/10	8,69	(Poon et al., 2006)
Naturel		1,62	
Recyclé	2,5/5	14,12	(Zhao, 2014a) « porosimètre au mercure »
Recyclé carbonaté		7,83	
Naturel siliceux	0/22	1	(Dao, 2012)
Naturel calcaire	0/22	8,2	
Recyclé issu de béton GN siliceux 35MPa/65MPa	0/6	12,7/12,8	
Recyclé issu de béton GN calcaire 35MPa/65MPa		20,9/19,9	
Recyclé issu de béton GN mixte 35MPa/65MPa		17,6/16,7	
Recyclé issu de béton GN siliceux 35MPa/65MPa	6/11	8,5/10,2	
Recyclé issu de béton GN calcaire 35MPa/65MPa		16,5/16,4	
Recyclé issu de béton GN mixte 35MPa/65MPa		10,1/13,2	
Recyclé issu de béton GN siliceux 35MPa/65MPa	11/22	8,3/10,5	
Recyclé issu de béton GN calcaire 35MPa/65MPa		16 /16,2	
Recyclé issu de béton GN mixte 35MPa/65MPa		14,3/12,9	
moyennes/écart type pour les GR		13,13 ± 3,53	
moyennes/écart type pour les GN		2,08 ± 2,15	

Le multi recyclage du béton conduit à une augmentation de cette porosité directement liée à l'augmentation de la teneur en mortier. Les valeurs de porosité obtenues sont voisines de 20% dans ce cas (Dao, 2012).

2.2.4 Masses volumiques et coefficients d'absorption d'eau

La capacité d'absorption d'un granulats est directement liée à sa porosité accessible à l'eau. Ainsi les études s'accordent à confirmer que cette caractéristique est directement liée à la teneur en mortier primaire. L'évolution de la masse volumique des granulats et surtout de la masse volumique réelle l'est également. Ainsi les coefficients d'absorption seront plus élevés pour les matériaux recyclés (7 à 10%) que pour les naturels (0,4 à 2,2%) et plus élevés pour les matériaux les plus fins. Les coefficients d'absorption croissent avec la diminution de la taille des granulats pour des teneurs en mortiers identiques dans ces classes (Gómez-Soberón, 2002). Les résultats détaillés sont reportés en annexe 2 et les valeurs moyennes et écart types Tableau 8.

Des études menées sur l'influence de l'âge du béton parent sur le coefficient d'absorption et de masses volumiques des sables recyclés indiquent que celui-ci n'a que peu d'influence (Katz, 2003) ; (Hansen, 1986). Le même résultat est observé en ce qui concerne la teneur en eau du béton parent selon Hansen (voir annexe 2).

Tableau 8 : Synthèse des résultats des masses volumiques ρ_{rd} , ρ_{ssd} , ρ_a et coefficients d'absorption WA_{24} des granulats recyclés et naturels

Type de matériau		Paramètres étudiés	Sable	Gravillon	Gravier
Synthèse	GN	WA_{24} [%]	1,32 ± 0,90	1,65 ± 1,18	0,92 ± 0,47
		ρ_{rd} [g/cm ³]	2,57 ± 0,04	2,58 ± 0,13	2,58 ± 0,06
		ρ_{ssd} [g/cm ³]	2,60 ± 0,03	2,57 ± 0,06	2,61 ± 0,01
		ρ_a [g/cm ³]	2,67 ± 0,02	2,65 ± 0,02	2,63
	GR	WA_{24} [%]	8,67 ± 1,94	7,48 ± 1,31	5,33 ± 1,70
		ρ_{rd} [g/cm ³]	2,13 ± 0,06	2,21 ± 0,11	2,25 ± 0,08
		ρ_{ssd} [g/cm ³]	2,33 ± 0,01	2,36 ± 0,04	2,40 ± 0,03
		ρ_a [g/cm ³]	2,63 1 essai	2,36	2,40

- WA_{24} représente le coefficient d'absorption d'eau mesurée après 24 heures d'immersion exprimée en %
- ρ_{rd} représente la masse volumique réelle après séchage à l'étuve exprimée en g/cm³
- ρ_{ssd} représente la masse volumique réelle saturée à surface sèche exprimée en g/cm³
- ρ_a représente la masse volumique absolue exprimée en g/cm³
- fractions analysées en [mm]

Bien que de nombreuses études s'accordent à relier le coefficient d'absorption et la masse volumique à la teneur en mortier, peu ont effectivement analysé cette corrélation. Lorsque cela est réalisé, la diminution de la masse volumique et l'augmentation de l'absorption d'eau avec la teneur en mortier est confirmée (Mefteh et al., 2013) ; (Mefteh and Arabi, 2011)

(Figure 16 et Figure 17), mais il faut rester prudent quant au protocole de détermination de la teneur en mortier.

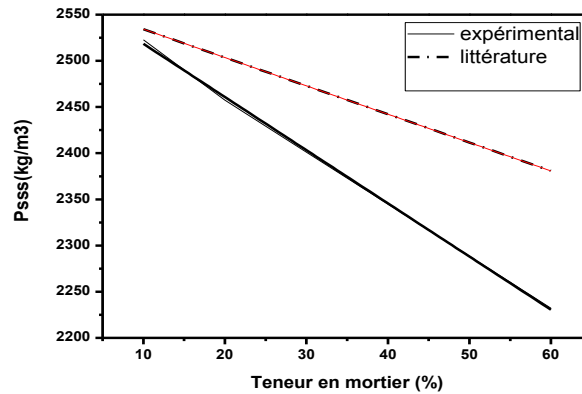


Figure 16: Influence de teneur en mortier sur les valeurs de masses volumiques (Mefteh et al., 2013) ; (Meftah and Arabi, 2011)

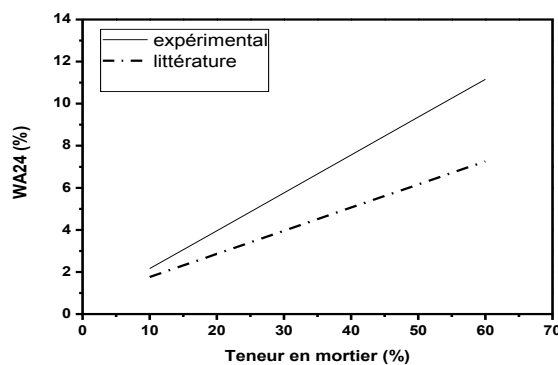


Figure 17 : Influence de la teneur en mortier sur le coefficient d'absorption (Mefteh et al., 2013) ; (Meftah and Arabi, 2011)

2.2.5 Cinétique d'absorption d'eau et temps de saturation

Ces résultats de capacité d'absorption peuvent cependant être modifiés en fonction de la méthode expérimentale utilisée et notamment du temps de saturation des granulats. La méthode normalisée de détermination des coefficients d'absorption et des masses volumiques est réalisée après une immersion de 24h (Afnor, Norme NF EN 1097-6, 2001). Cette méthode a été réadaptée pour tenir compte du temps de saturation des granulats qui peut être supérieur à 24h (Djerbi Tegguer, 2012), hypothèse confirmée par d'autres études (Figure 18) (Mefteh et al., 2013) ; (Meftah and Arabi, 2011) ; (Mahmoud, 2005).

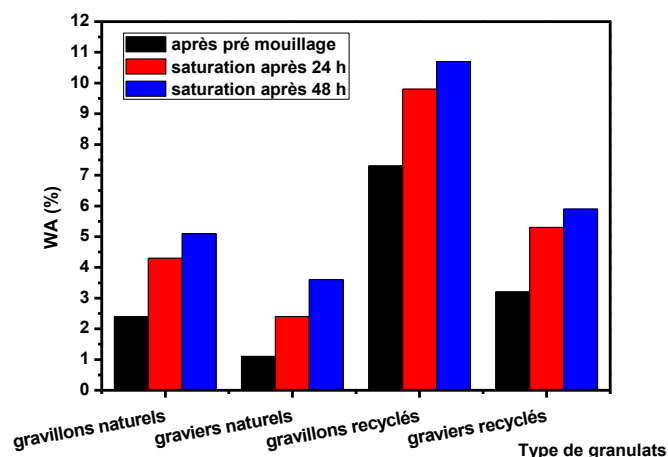


Figure 18: Absorption d'eau des granulats en fonction du temps de saturation, Meftah (Meftah et al., 2013) ; (Meftah and Arabi, 2011)

Comme les valeurs d'absorption, les temps de saturation varient d'un granulat recyclé à l'autre et dépendent de la quantité de mortier (Evangelista and de Brito, 2014) ; (Djerbi Tegger, 2012) ; (Tam et al., 2008) ; (F. Rodrigues et al., 2013) ; (García-González et al., 2014). Il existe une grande disparité des résultats selon les études, ainsi à 24 heures le taux d'absorption observé varie entre 60 et plus de 95% de l'absorption totale et les temps de saturation peuvent atteindre 10 jours (García-González et al., 2014). Une étude des cinétiques d'absorption montre par ailleurs que les granulats mis dans l'eau à 10 minutes absorbent au moins 80% de leur absorption à 24 heures (Mahmoud, 2005). Les méthodes utilisées pour la détermination de la cinétique d'absorption varient d'un auteur à un autre, ce qui explique en partie cette disparité des résultats. Une méthode de suivi en temps réel fut utilisé par Tam (Tam et al., 2008) ; celle par pesée hydrostatique issue de la norme NF EN 1097-6 adaptée par Djerbi (Djerbi Tegger, 2012) et celle de la norme NF EN 1096-6 par les autres auteurs (Djerbi Tegger, 2012) ; (Afnor, Norme NF EN 1097-6, 2001).

Tableau 9 : Suivi de l'absorption des granulats recyclés

Type de granulats	Taille des granulats	Temps de saturation	Auteurs
GR	0/16 mm	Temps de saturation de 10 jours avec l'atteinte 70% d'absorption à 24 heures, de 56% la première heure. 50,2% à 5 min 47,2% à 3 min	(García-González et al., 2014)
GR	12,5/20mm et 5/12,5 mm	L'absorption est de 60% après 24 heures d'immersion et de 70% après 85 heures ou 110 heures selon la fraction étudiée	(Djerbi Tegger, 2012)
GR	5/40 mm	L'absorption est de 80% après 5 heures d'immersion ;	(Tam et al., 2008)

2.2.6 Propriétés mécaniques des granulats recyclés

2.2.6.1 Résistance à la fragmentation

L'essai Los Angeles est utilisé pour déterminer la résistance à la fragmentation d'un gravillon (Afnor, Norme NF EN 1097-2, 2010). Un coefficient de LA élevé est signe d'un granulat peu résistant. Comme les autres propriétés des GR, le coefficient de Los Angeles (LA), qui représente une fraction de matériau inférieure à un diamètre fixé récupérée après l'essai, augmente avec la teneur en mortier primaire dans les granulats recyclés (Zhao, 2014a). Cependant, la corrélation n'est pas aussi nette que pour les autres propriétés (Figure 19). Les granulats recyclés sont souvent moins résistants que les granulats naturels même si les valeurs sont assez dispersées d'une étude à l'autre. (Tableau 10). Lors de la fabrication d'un granulat recyclé de 2^{ème} génération, l'augmentation du taux de recyclage conduit à une plus mauvaise résistance à la fragmentation tel qu'illustré (Tableau 11). Le coefficient augmente progressivement pour passer de 24 pour un béton de granulat recyclé dont le béton parent était constitué de granulats naturels à 35 pour un béton de granulat recyclé dont le béton parent était constitué de 100% de granulats recyclés.

Cette résistance à la fragmentation dépend également de la résistance du béton parent (donc de sa composition), elle augmente avec cette dernière et diminue lorsque E/C augmente (Hansen, 1986) (Tableau 12).

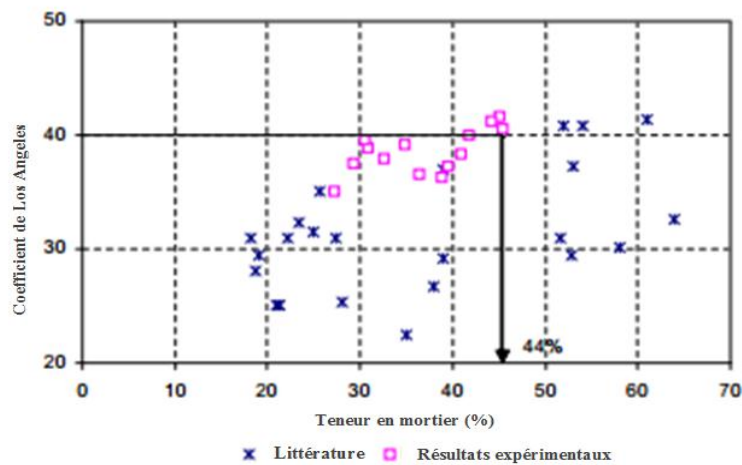


Figure 19 : Relation entre le mortier accolé et les coefficients Los Angeles selon De Juan (de Juan and Gutiérrez, 2009)

Tableau 10 : Tableau récapitulatif des données de résistance à la fragmentation

Type de granulats	LA sur sable		LA sur gravillons ou graviers		Auteurs
	Valeurs	fractions analysées	Valeurs	fractions analysées	
GN	-	-	30,8		(Pereira et al., 2012a)
GR	39 ± 2	0/4	10/14	-	(de Juan and Gutiérrez, 2009)
	36	0/20	-		(Mas et al., 2012a)
	40	4/22,4			
GN	23	2/6	27	6/12	(Barbudo et al., 2013)
	-	-	25	12/20	(Dao, 2012)
	24 siliceux	4/10	28 siliceux	10/20	
	26 calcaire		29 calcaire		
GR	34 ± 3	6/11	39 ± 3	11/22	(Hansen, 1986)
	41	4/8	22	16/32	
	-	-	33-37	4/20	(López-Gayarre et al., 2009)
GN	26	4/14	24	8/20	(Hansen, 1986)
	25,9	4/8	22,7	8/16	
GR (béton parent E/C =0,4)	30,1		26,7		
GR (béton parent E/C =0,7)	32,6		29,2		
GR (béton parent E/C =1,2)	41,4		37,0		

Tableau 11 : Tableau des données de résistance à la fragmentation sur les granulats

Origine des granulats recyclés	Coef LA	Fractions analysées [mm]	Auteurs
GR 1 (béton parent avec GN)	24	6,3/10	(Mefteh et al., 2013); (Mefteh and Arabi, 2011)
GR 2 (béton parent avec 20%GR)	25		
GR 3 (béton parent avec 40%GR)	27		
GR 4 (béton parent avec 60%GR)	30		
GR 5 (béton parent avec 80%GR)	32		
GR 6 (béton parent avec 100%GR)	35		

Tableau 12 : Variation de la résistance à la fragmentation des granulats recyclés en fonction de la résistance du béton parent

Echantillons	1	2	3	4	5	6	Auteurs
Résistance des bétons Parents (MPa)	15	16	21	30	38	40	(Hansen, 1986)
LA	28,7	27,3	28	25,6	22,9	20,1	

Résistance à l'usure

La résistance à l'usure, mesurée à l'aide de l'essai micro Deval, dépend de la nature du granulat analysé. Un coefficient de MDE élevé est signe d'un granulat peu résistant. Ainsi un granulat naturel de nature siliceux résiste mieux à l'usure qu'un granulat recyclé dont la résistance est proche de celle de granulats naturels calcaires. Des résultats similaires à ceux obtenus sur l'essai de fragmentation sont observés en ce qui concerne les granulats de deuxième génération (Mefteh et al., 2013) (Tableau 13).

Tableau 13 : Tableau récapitulatif des données de Micro Deval

Type de granulats	Valeurs de M_{DE}	fractions analysées	Auteurs
GR	19 ± 6	6/11	(Dao, 2012)
	21 ± 3	11/22	
GN	3 granulat siliceux 22 granulat calcaire	4/10	
	3 granulat siliceux 21 granulat calcaire	10/20	
GR 1 (béton parent avec GN)	24	6,3/10	
GR 2 (béton parent avec 20%GR)	28		
GR 3 (béton parent avec 40%GR)	31		
GR 4 (béton parent avec 60%GR)	34		
GR 5 (béton parent avec 80%GR)	35		

2.2.7 Composition chimique et minéralogique, pollution et réactivité

La détermination de la composition chimique et ou minéralogique dans le cas des granulats recyclés doit être concentrée sur la détermination de (Silva et al., 2014) ; (Dhir and Plaine, 2004) ; (Dhir and plaine, 2003) ; (Dhir et al., 2005) et (Dhir and plaine, 2007) .

- La teneur en sulfates et en soufre total. En effet, une teneur en sulfate trop élevée conduit à un risque de formation d'ettringite secondaire ou sel de Candlot. Les sulfates peuvent être présents dans les granulats recyclés à cause du plâtre résiduel.
- La teneur en chlorure. La présence de chlorure dans le béton peut provoquer après migration des ions une corrosion prématurée des armatures. Une présence élevée en chlorure peut aussi provoquer la formation de chloroaluminate de chaux ou sel de Friedel, expansif. Les ions chlorures présents dans les granulats recyclés peuvent provenir du recyclage de bétons en zone maritime.
- La teneur en silice et alcalins libres (Na_2O , K_2O). Dans le cas d'une présence de silice réactive, celle-ci peut interagir avec les alcalins libres du ciment ou même des granulats recyclés s'ils en contiennent (présence de verre résiduel). La réaction conséquente est la formation d'un gel d'alcali silice, expansif et très nuisible à la durabilité des bétons.

La norme NFP 1744-1 définit les méthodes d'analyse chimique et minéralogique des granulats. La norme NFEN 12620 définit leurs appellations, en fonction des valeurs atteintes, quelques valeurs seuils sont imposées. Seule la teneur en soufre total est limitée à 1% pour les granulats recyclés. Les teneurs en sulfates solubles dans l'eau, en ions chlorure définissent une désignation des granulats sans qu'un seuil ne soit imposé. Cependant une valeur maximale de 0,01% et de 0,8% respectivement pour les teneurs en ions chlorures et en sulfate soluble dans l'eau sont préconisées.

Quelques études reportent des valeurs de teneur en sulfate supérieures à ces seuils préconisés (cf Tableau 14).

Tableau 14 : Analyse chimique sur des granulats recyclés (Evangelista and de Brito, 2014) ; (Thomas et al., n.d.)

Auteurs	Type de granulats	Paramètres							
		SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Sulfate soluble à l'acide	Teneur en sulfure	oxyde de potassium et de sodium et feldspath
(Galvín et al., 2014)	SN	-	-	-	-	-	-	<0,01	-
	(Gr+gr)N	-	-	-	-	-	<0,01	<0,02	-
	(Gr+gr)R	-	-	-	-	-	0,86	0,96	-
(Mahmoud, 2005)	GR	60,1 et 81,1%	4,3 et 12,4%	-	-	-	-	-	-
(Dhir et al., 2008)		55,5 et 75,9%	5,2 et 18,1%	1,1 et 8%	1,5 et 9,7%	-	< 1%	-	-
(Ulsen et al., 2013)	GR > 150 µm	65 à 75%	7 à 11%	2,5%	6 à 10%	1 à 2%	-	-	Na ₂ O (0,5-2%) K ₂ O (1,5-3%)
(Florea et al., 2014)	GR <150 µm	44,6	32,8	1,4	2,3	0,7	-	-	-
(Fernando Rodrigues et al., 2013)	0/4 mm	-	-	-	-	-	1,53%	0,6%	Grande dispersion des valeurs
(Limbachiya et al., 2007)	(Gr + gr)Naturels	97,03	0,26	0,10	0,34	0,65	-	-	Na ₂ O (0,16%) K ₂ O (0,01%) P ₂ O ₅ (0,02%)
	(Gr+gr) Recyclés 1	65,37	13,93	2,16	5,33	1,91			Na ₂ O (1,19%) K ₂ O (0,61%) P ₂ O ₅ (0,11%)
	(Gr+gr) Recyclés 2	68,43	11,19	2,40	5,49	2,84			Na ₂ O (0,94%) K ₂ O (0,62%) P ₂ O ₅ (0,10%)
	(Gr+gr) Recyclés «	63,61	16,86	2,03	3,57	2,62			Na ₂ O (0,87%) K ₂ O (0,51%) P ₂ O ₅ (0,49%)
	SN	88,54	5,33	0,76	1,21	0,42			Na ₂ O (0,33%) K ₂ O (0,31%) P ₂ O ₅ (0,08%)

Concernant le risque d'alcali réaction, la norme préconise un essai d'évaluation du risque, des valeurs seuils ne sont pas déterminées.

Le risque d'alcali réaction sera augmenté lorsque des granulats issus de bétons parents affectés par l'alcali réaction sont utilisés. Les granulats recyclés affectés produisent un effet similaire aux granulats naturels réactifs (Shehata et al., 2010).

L'analyse chimique et minéralogique peut être approfondie par une détection de présence de certains polluants. Hormis les sulfates chlorures et alcalins, les éléments susceptibles de provoquer par la suite une baisse de résistance mécanique ont les éléments organiques et particulièrement le bitume (Silva et al., 2014). Les seuils tolérés sont définis dans les normes en vigueur. Un seuil de 5% pour la présence de bitume est défini. La présence d'éléments métalliques résiduels est également à proscrire pour ne pas nuire à l'aspect esthétique du béton notamment lorsque cette présence est concomitante à celle d'ions chlorures

(International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, 1992).

La plupart du temps, les réactivités étudiées font références à l'alcali réaction mais quelques études ont cependant été menées sur les fines recyclées et indiquent que celles-ci peuvent se réhydrater en présence d'eau (Shui et al., 2008).

2.3 Conclusion partielle : interactions entre propriétés des GBR

De cette étude bibliographique, il ressort que les auteurs s'accordent sur les points suivants :

L'absorption, les masses volumiques et résistances intrinsèques des granulats recyclés sont directement liée à la porosité du granulat recyclé, plus élevée que celle d'un granulat naturel. Elle est elle-même corrélée à la teneur en mortier. L'estimation de cette teneur en mortier est sujette à discussion principalement en raison de la diversité des protocoles utilisés et de la qualification de ce mortier : accolé, résiduel, pâte de ciment,.... La difficulté pour expliquer les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats recyclés réside dans la méconnaissance de la composition du béton parent et des propriétés des granulats parents.

Certains auteurs s'accordent à noter que le temps de saturation des granulats dans l'eau est supérieur à 24h, pourtant cette valeur est toujours utilisée comme valeur de référence pour déterminer le coefficient d'absorption des granulats.

La forme et distribution granulaire des GR sont directement liées au mode de fabrication/concassage et de ce fait à la présence de mortier. Là aussi, un manque d'information sur le procédé de concassage utilisé limite l'analyse critique des résultats obtenus. Le granulat recyclé, même s'il présente une teneur en éléments fins plus élevée est plus grossier sur l'étendue granulaire d'un sable.

Cette présence d'éléments fins en quantité élevée, qualifiés parfois de « polluants », est liée au mode de concassage et surtout de conservation des matériaux depuis leur lieu de concassage jusqu'à leur lieu d'utilisation.

3 Les bétons de granulats recyclés (BGR)

De par leurs propriétés spécifiques, la présence de granulats recyclés dans les bétons influence à la fois les propriétés du matériau à l'état frais comme durci. Dans ce paragraphe, les caractéristiques à ces deux états des bétons de granulats recyclés sont étudiées et leurs propriétés analysées en fonction des taux de substitution, des compositions et des propriétés des granulats recyclés lorsqu'elles sont connues. Enfin, les méthodes de formulations adaptées aux bétons de granulats recyclés sont présentées.

3.1 Formulation des BGR

3.1.1 Taux de substitution des GN par les GR

La composition des bétons de granulats recyclés est dépendante à la fois de textes réglementaires et des considérations pratiques de mise en œuvre et d'utilisation des matériaux. En effet, la substitution de granulats naturels par des granulats recyclés présente un effet de seuil, une réduction significative des résistances mécaniques est observé au-delà de ce taux seuil (Evangelista and de Brito, 2007) ; (Etxeberria et al., 2007).

Aujourd'hui des taux maximum de substitution sont imposés, en France, par la norme EN 206 et son annexe nationale. Par exemple, les sables recyclés ne sont autorisés qu'à hauteur de 30% pour la classe d'exposition XC0 mais leur utilisation est proscrite pour les autres classes d'exposition. Les gravillons recyclés peuvent quant à eux être substitués jusqu'à 60%. Ce taux maximal est fonction du type de gravillon et de la classe d'exposition (voir tableau synthétique en annexe 2). Le seuil de substitution est plus élevé lorsque l'ouvrage est réalisé dans un environnement où le risque de corrosion est absent, il varie de 30 à 60%.

Des études sont en cours dans le cadre du projet national Recybéton (Charonnat, 2011) afin de proposer éventuellement des modifications de ces seuils dans la norme française. Dans les autres pays européens, ces valeurs ne sont pas nécessairement définies bien que l'utilisation de la fraction sableuse soit très souvent limitée ou interdite.(voir annexe 2 tableau de synthèse « Récapitulatif normatif des taux de substitution de granulats recyclés dans un béton » en annexe 2)

Très peu d'auteurs ont réalisé des bétons contenant 100% de granulats recyclés (sable, gravillons et gravier) et les fines recyclées ne sont jamais distinguées du sable. Une synthèse des proportions d'utilisation des granulats recyclés par les différents auteurs, indépendamment des normes en vigueur, a été faite et est donnée en annexe 2. Les compositions des bétons étudiés sont également identifiées. Les conclusions qui suivent ressortent de la lecture de ce tableau.

Afin de respecter les objectifs de résistances et de rhéologie des bétons, ces valeurs sont systématiquement à mettre en perspective avec la teneur en ciment et le rapport E/C. Or, il n'est pas toujours spécifié si les compositions ont été réalisées à E_{eff}/C ou E_{totale}/C , ce qui rend difficile la comparaison des compositions. L'utilisation d'adjuvant est souvent faite pour permettre une mise en œuvre correcte.

Les taux d'utilisation sont souvent limités car les caractéristiques des granulats recyclés, généralement moins avantageuses que celles des granulats naturels, notamment du fait de la présence de mortier et d'impuretés résiduelles, provoquent souvent des baisses des résistances mécaniques (Mas et al., 2012b). Un béton initial de qualité moindre aura tendance à diminuer les caractéristiques du béton de granulats recyclés dans lequel il est utilisé concassé (Charonnat, 2011); (Evangelista and de Brito, 2007); (Etxeberria et al.,

2007). Cependant pour la résistance à la compression des bétons de granulats recyclés, la résistance du béton parent n'est pas un facteur limitant (Sandrine Braymand et al., 2012b) ; (Ajdukiewicz and Kliszczewicz, 2002) ; (Rao et al., 2007). Ainsi, l'utilisation de granulats recyclés, même en remplacement partiel du granulat naturel peut modifier les compositions des bétons pour les raisons suivantes:

- une augmentation de la demande en eau lorsque l'ouvrabilité doit être conservée (forte absorption des granulats).
- une baisse des résistances mécaniques qui peut être compensée par une teneur en ciment plus élevée ou une teneur en eau plus faible (ouvrabilité non conservée).

Pour les bétons à très fort taux de substitution, la conservation du sable naturel peut contribuer à l'augmentation des propriétés mécaniques (Hansen, 1986) ; (Topçu, 1997). Cependant même cette approche est actuellement à l'origine d'une controverse (S Braymand et al., 2012) ; (Sandrine Braymand et al., 2012a) ; (Sandrine Braymand et al., 2012b) notamment concernant les sables naturels roulés (Sandrine Braymand et al., 2012a). En effet, le mélange de granulats concassés et roulés ne permet pas d'obtenir une stabilité satisfaisante de l'empilement granulaire, dégradant ainsi les propriétés mécaniques

Ces points sont discutés par les auteurs car directement dépendants des compositions de bétons choisies. Les méthodes de formulation justifiant de ces compositions seront présentées plus loin dans ce manuscrit avec l'analyse des comportements à l'état frais et durcis des BGR puis en fin de chapitre lorsque des méthodes spécifiques ont été développées.

3.2 BGR à l'état frais

La présence du mortier primaire confère aux granulats recyclés des propriétés spécifiques (squelette granulaire, morphologie et porosité - chapitre 1.2) qui, à leur tour, influencent les propriétés des bétons à l'état frais par une modification de la compacité, de la rugosité et de l'absorption.

3.2.1 Ouvrabilité

Plusieurs paramètres des granulats recyclés peuvent influencer l'ouvrabilité des bétons conçus, toujours en la réduisant. La maniabilité est d'autant plus faible lorsque le taux de substitution des granulats recyclés est supérieur à 50 % (Topçu, 1997). La demande en eau est fortement augmentée lorsque que l'ouvrabilité du matériau doit être importante. Ainsi, Mukai et Kukichi ont trouvé que l'augmentation de 5% d'eau dans les bétons contenant des graviers recyclés et des sables naturels permettraient d'avoir des propriétés à l'état frais sensiblement identiques à celles des bétons de granulats naturels (Mukai T., et al, 1979) ; dans le cas des granulats recyclés à 100%, une quantité de 15 % est requise]. Butler et al (Butler et al., 2013) préconisent une augmentation de 3,1 à 9,4% d'eau totale dans les bétons de granulats recyclés afin de retrouver des ouvrabilités et résistances mécaniques

sensiblement égales à celles des bétons de granulats naturels. Dans le même sens, ils préconisent une diminution de 9,0 à 14,8% de quantité de ciment.

Influence de la géométrie : morphologie et distribution granulaire

Les granulats recyclés obtenus par concassage ont une rugosité/texture et une angularité importante qui entraînent une augmentation de la demande en eau des granulats (absorption des grains et compacité du squelette) (Laboratoire central des ponts et chaussées (France), 2001); (Buyle-Bodin, F and Hadjieva-Zaharieva, 2002); (Evangelista and Brito, 2009). L'utilisation de granulats recyclés, dont les dimensions sont supérieures à 4 mm et d'origines diverses, a révélé que l'augmentation de l'angularité et/ou de l'allongement du granulat conduit à la réduction de l'ouvrabilité des bétons sans qu'aucune corrélation entre texture de la surface des granulats et ouvrabilité des bétons n'ait pu être établie (Hafid, 2012). La forme allongée et angulaire contribue à augmenter la surface de contact avec l'eau, plus de pâte est donc nécessaire pour les lubrifier. Cependant, pour conserver les résistances mécaniques et l'ouvrabilité il est possible de maintenir le rapport eau/ciment par :

- l'utilisation d'adjuvants plastifiants/superplastifiants
- une augmentation du volume de pâte (Pereira et al., 2012a), qui a pour effet d'augmenter l'eau présente dans le mélange.

Lorsque le sable recyclé est conservé dans le squelette granulaire du béton, sa présence induit automatiquement celle d'éléments fins, influençant les propriétés à l'état frais et durcis du béton au même titre que des fillers ou addition. Dans le squelette granulaire, le sable est le constituant qui provoque la plus forte augmentation de la demande en eau (Yaprak et al., 2011); (Westerholm, 2006). Celle-ci est proportionnelle à son absorption et son adsorption, elles-mêmes liées à la surface spécifique du sable (Braymand et al., 2014).

La notion de fines recyclées n'est pas clairement définie à ce jour et les auteurs emploient ce terme des fines présentant un diamètre maximum de 63 à 500 μm , voire parfois jusqu'à 4 mm (fine aggregates) (Zhao, 2014a). Ces appellations ne sont pas en accord avec celles données par la norme NF 18 545 (Afnor, NF P 18-545, 2011). Bien qu'elles ne soient que rarement conservées lors de la réalisation des bétons de granulats recyclés dans les études menées jusqu'à ce jour, le projet national Recybéton a, parmi ses objectifs, celui d'étudier l'utilisation des fines recyclées comme ajout, en tant que filler ou addition minérale.

De plus, la substitution du ciment par des fines recyclées influence la rhéologie de mortiers (Nelfia et al., 2013). La consistance obtenue est alors plus plastique que celle des mortiers sans fines recyclées quel que soit le taux de substitution. L'origine de cette modification est plus attribuée à une augmentation de compacité qu'à une réactivité hydraulique.

Par ailleurs, Katz (Katz, 2003) préconise l'emploi des fines mixtes (naturelles et recyclées) jouant le rôle de « lubrifiant » afin d'obtenir des affaissements sensiblement identiques à celles des bétons de granulats naturels.

Influence de la porosité

Les granulats recyclés ont une porosité élevée qui est à l'origine de leur forte capacité d'absorption. Afin de pallier ce problème tout en maintenant la quantité d'eau efficace constante au sens de la norme, il est parfois préconisé d'augmenter la quantité d'eau totale (Torben and Hendriks, 1983) ; (Topçu and Şengel, 2004) ; (Sagoe-Crentsil et al., 2001) ; (Hendriks et al., 2005) ; (Limbachiya et al., 2012) ; (Hadjieva-Zaharieva, 1998). L'ensemble des résultats obtenus par les auteurs est synthétisé dans un tableau en annexe 2. Les principales conclusions sont présentées ci-après.

Plusieurs moyens ont été utilisés afin de compenser la baisse d'ouvrabilité liée à l'absorption d'eau élevée :

- augmenter la teneur en eau totale (absorption);
- préhumidifier les granulats à un taux et sur une durée variables ; Par exemple, les préhumidifier à raison de 70 à 80 % de leur coefficient d'absorption pendant 24 heures (voir annexe 2);
- adjuvanter (superplastifiants);
- augmenter la teneur en ciment dans la composition de béton en conservant le rapport Eau/Ciment.

Les protocoles mis en œuvres au cours de différentes études incluent une préhumidification des granulats. Cette préhumidification a notamment pour but de maîtriser l'ouvrabilité initiale des matériaux à l'état frais. Par exemple, Padmini et al en 2009 ont suggéré de préhumidifier les granulats recyclés pendant 10 minutes avant leur emploi (Padmini et al., 2009). Gonzalez en 2011 préconise de les préhumidifier avec 70% de leur eau de saturation (González-Fonteboia et al., 2011) et Etxeberria en 2007, avec 80% d'eau de saturation répandue sur les granulats 1 jour avant le mélange (Etxeberria et al., 2007). Yang en 2011 observe une réduction de 27% d'ouvrabilité lorsque les granulats recyclés préhumidifiés sont utilisés en substitution des granulats naturels grossiers. Meftah (Meftah et al., 2013), (Meftah and Arabi, 2011) et Poon (Poon et al., 2004) ont également étudié l'influence du taux de préhumidification sur l'ouvrabilité des bétons à différents taux de substitution. Les résultats de ces études en terme de maniabilité des pâtes réalisées sont synthétisés dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Influence du taux de préhumidification sur l'ouvrabilité initiale en fonction des taux de substitutions (Meftah et al., 2013) ; (Meftah and Arabi, 2011) ; (Poon et al., 2004)

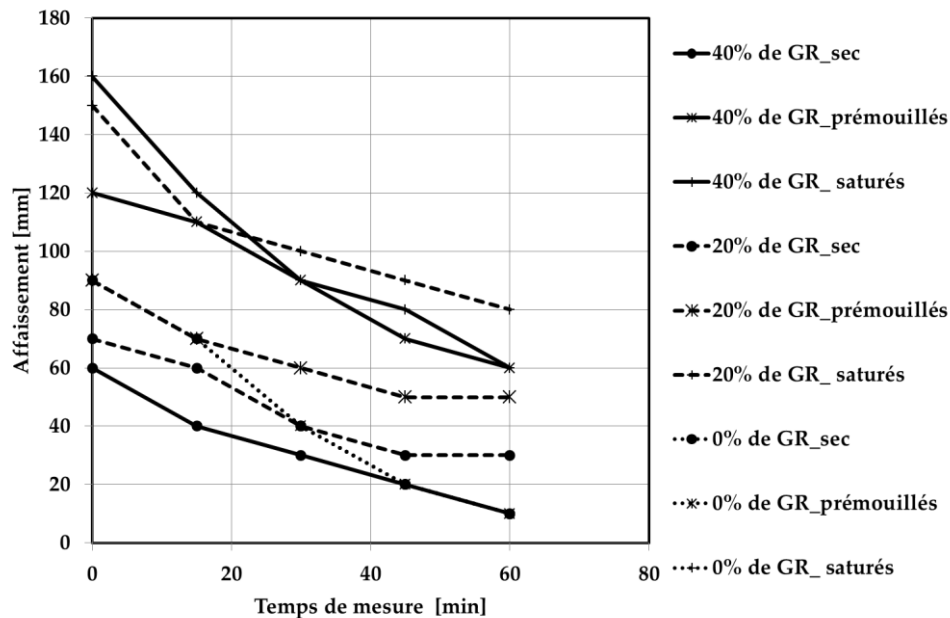
Auteurs	proportion sGN/GR	Etat des gravillons/graviers	Eau de gâchage [kg/m ³]	Ciment [kg/m ³]	Sable [kg/m ³]	Gravillons/ graviers naturels		Gravillons/ graviers recyclés		Affaissement à T=0
						10 mm	20 mm	10 mm	20 mm	
(Poon et al., 2004)	100 % de GN	Humide (teneur en eau)	214	353	667	362	724			110
		Séché à l'étuve	221	353	667	360	720			105
		Saturé surface séché	209	353	666	364	729			100
	80 % GN et 20 % GR	Humide (teneur en eau)	217	353	660	287	574	70	139	120
		Séché à l'étuve	230	353	660	284	569	67	135	90
		Saturé surface séché	206	353	661	288	576	72	144	105
	50 % de GN et 50 % de GR	Humide (teneur en eau)	229	353	647	176	351	170	343	130
		Séché à l'étuve	247	353	647	175	349	164	332	100
		Saturé surface séché	207	353	649	177	354	177	354	110
	100 % de GR	Humide	241	353	625	-	-	330	663	145
		Séché à l'étuve	271	353	625	-	-	317	642	125
		Saturé surface séché	209	353	625	-	-	342	684	100
(Meftah et al., 2013) ; (Meftah and Arabi, 2011)	0% de Gravillons et graviers recyclés	Sec	189 (Eeff)	350	585,67	256,10	955,34	-	-	90
		Prémouillés								90
		saturés								90
	20% de Gravillons et graviers recyclés	Sec				70				
		Prémouillés				90				
		saturés				150				
	40% de Gravillons et graviers recyclés	Sec				60				
		Prémouillés				120				
		saturés				160				
	60% de Gravillons et graviers recyclés	Sec				30				
		Prémouillés				100				
		saturés				180				
	80% de Gravillons et graviers recyclés	Sec				20				
		Prémouillés				140				
		saturés				150				
100% de Gravillons et graviers recyclés	Sec	15								
	Prémouillés	150								
	saturés	140								

3.2.2 Maintien d'ouvrabilité

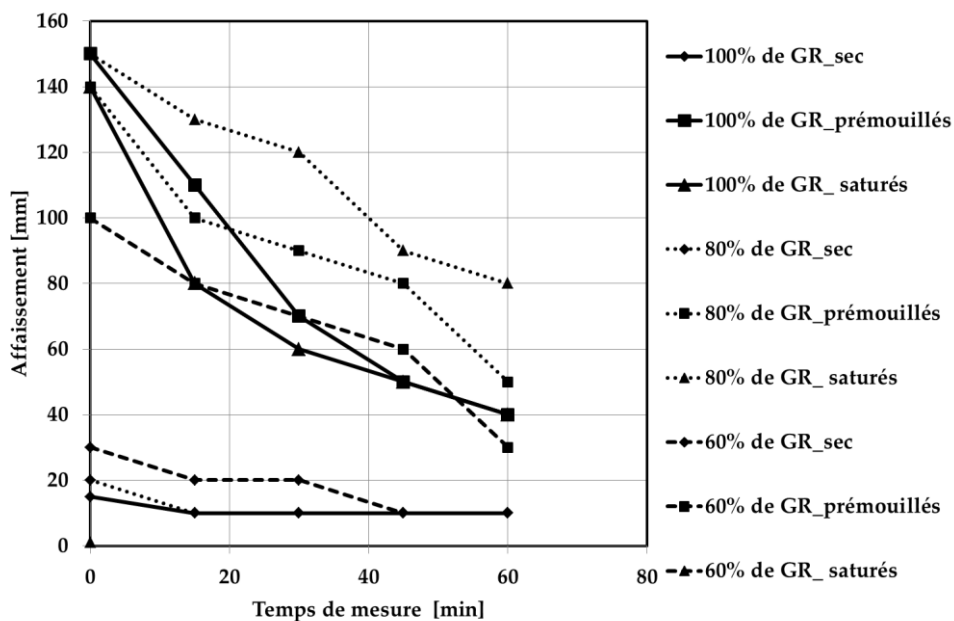
On constate généralement des pertes importantes de maniabilité avec le temps. Dans le but d'étudier l'évolution de l'ouvrabilité au cours du temps, Meftah et al (Meftah et al., 2013) ont réalisé des bétons par la méthode Dreux Gorisse (Dreux and Festa, 1998) avec des granulats naturels, des granulats recyclés sec, des granulats recyclés pré mouillés et des granulats recyclés dans leur état saturé. Les graviers naturels ont été substitués progressivement par les graviers recyclés (0 ; 20 ; 40 ; 60 ; 80 ; 100%).

Cette étude a permis de montrer premièrement que l'affaissement des bétons à l'instant initial des bétons de granulats recyclés est inférieur à celui des bétons de granulats naturels.

Deuxièmement, une perte de maniabilité est observée entre 15 et 30 minutes après le gâchage pour le béton réalisé avec des granulats recyclés secs. Tandis que pour les bétons réalisés avec des granulats préalablement prémouillés ou complètement saturés, l'ouvrabilité est bien meilleure. Meftah a pu montrer que l'emploi des granulats recyclés secs dans la formulation des bétons joue un rôle d'éponge dans les 30 premières minutes. Au-delà, une partie de cette eau absorbée est relarguée dans le béton.



a)



b)

Figure 20 : L'influence du taux de substitution des granulats recyclés à l'état sec, prémouillés et saturés sur la maniabilité (Meftah et al., 2013) ; (Meftah and Arabi, 2011)

Une étude menée par C.S Poon en 2003 (Poon et al., 2004) sur l'influence de l'état d'humidité des granulats recyclés (état séché à l'air libre, état séché à l'étuve et l'état saturé à surface

sèche) a montré que l'ouvrabilité initiale du béton à l'état frais dépend de la quantité d'eau libre tandis que le maintien d'ouvrabilité du même béton dépend de l'état d'humidité des granulats recyclés. Lorsque le rapport E/C est calculé sur la base d'un granulat complètement sec sans tenir compte par la suite de leur absorption, la teneur en eau efficace réelle est plus faible que celle prévue.

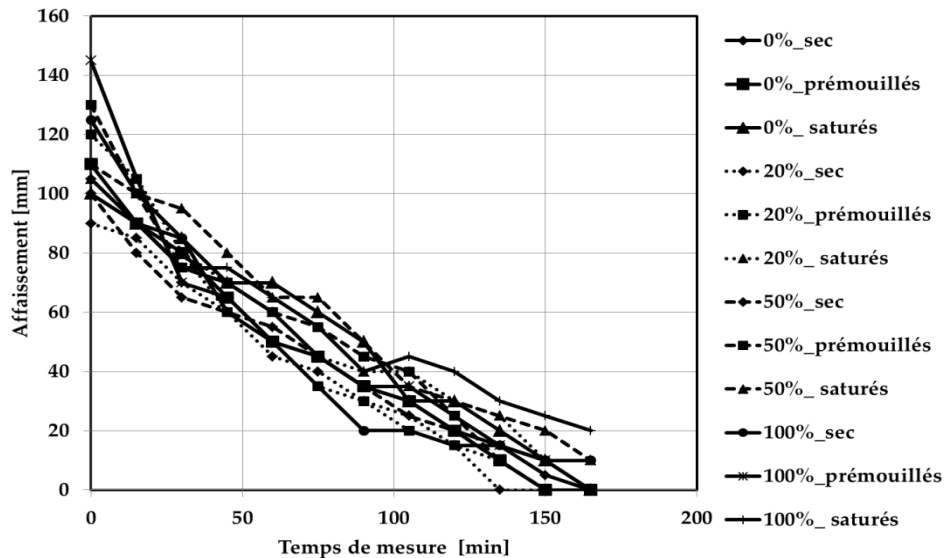


Figure 21 : L'influence du taux de substitution des granulats recyclés à l'état séché à l'air, séché à l'étuve et saturé surfaces sèches sur la maniabilité (Poon et al., 2004)

Butler et al en 2011 (Butler et al., 2011) ont réalisé des bétons de granulats recyclés et des bétons de granulats naturels avec pour objectif de rechercher un affaissement compris entre 75 et 100 mm et des résistances mécaniques de 30 et 50 MPa. A l'issue de ces essais, il a mis en évidence que la préhumidification des granulats grossiers de GR1 et GR2 permet la réduction significative de la perte d'ouvrabilité ; néanmoins les valeurs obtenues sur les bétons de granulats recyclés sont inférieures à celles des bétons de granulats naturels. La raison donnée est la forme angulaire des granulats recyclés ainsi que leur texture rugueuse qui augmentent les frictions dans les bétons frais (Butler et al., 2011). La valeur de 75 mm a été obtenue sur un béton de granulats recyclés comparés à la valeur de 100 mm pour la composition correspondante réalisée avec des granulats naturels, plusieurs auteurs ont obtenus la même évolution tels que Hansen (Hansen, 1986); Buck (Buck A.D., 1977) ; Rasheeduzzafar et Khan (Wedding et al., 1984) et Katz (Katz, 2003).

3.2.3 Masses volumiques et teneur en air

La masse volumique à l'état frais pour les bétons recyclés est plus faible que celle des bétons classiques due à la présence de mortier primaire durci (Evangelista and de Brito, 2014) ; (Zhao, 2014a) ; (Dao, 2012) ; (Meftah et al., 2013) ; (Meftah and Arabi, 2011) ; (Buyle-Bodin, F and Hadjieva-Zaharieva, 2002) ; (Québaud et al., 1998) ; (Evangelista and Brito, 2009) ; (Fernando Rodrigues et al., 2013) ; (Zhao et al., 2013). Cette valeur est comprise dans l'intervalle définie par Hansen et Narud (Torben and Hendriks, 1983) : de 2000 à 2250 kg/m³

pour les masses volumiques des bétons de granulats recyclés dans leur état frais. Par exemple celle mesurée par Katz en 2003 est d'environ 2400 kg/m³ pour un béton de granulats naturels et d'environ 2150 kg/m³ pour un béton de granulats recyclés (Meftah et al., 2013) ; (Meftah and Arabi, 2011) ; (García-González et al., 2014). Et la masse volumique du béton de granulats recyclés trouvée par Topçu et al en 1997 est de 2235 kg/m³ comparativement à celle des bétons de granulats naturels qui est de 2370 kg/m³ (Topçu, 1997).

D'autres auteurs confirment que les faibles masses volumiques des bétons de granulats recyclés vis-à-vis des bétons de granulats naturels sont dues aux masses volumiques des granulats recyclés (Rao et al., 2007) ; (Topçu, 1997). Butler en 2011 évoque quant à lui la forte porosité des pâtes des granulats recyclés (Butler et al., 2011).

De même en 2004, Topçu et Sengel (Topçu and Şengel, 2004) ont réalisé des essais sur bétons en faisant varier le pourcentage de granulats recyclés de 30%, 50%, 70% et 100% en masse, les résultats montrent que les masses volumiques des bétons décroissent avec l'augmentation de la quantité de granulats recyclés. Les résultats sont synthétisés en annexe 2 dans un tableau.

La teneur en air des bétons de granulats recyclés est légèrement plus importante que celle des bétons classiques. Elle est due à la forme et à la rugosité des granulats recyclés qui induisent une plus grande difficulté pour les bulles d'air à s'extraire lors de la vibration. Les valeurs de teneur en air recensés de la bibliographie sont consignées dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Teneurs en air obtenues sur des bétons (Brito and Saikia, 2013) ; (Dao, 2012).

Appellation	Type de granulats	E/C	Teneur en air (%)
Sagoe-Crentsil et al. 2001 (Sagoe-Crentsil et al., 2001)	Basalte grossier (0,15/19 mm)	0,76	2,4
	Graviers recyclés (0,15/19 mm) (100%)	0,73	2,4
		0,74	1,8
		0,70	2,3
Katz 2003 (Katz, 2003)	GN		1,3
	GR (avec du ciment blanc)		5,4 (1 Jour)
			4,1 (3 Jour)
		5,0 (28 Jour)	
Katz 2003 (Katz, 2003)	GR (avec du ciment portland)		4,8 (1 Jour)
			5,4 (3 Jour)
			5,6 (28 Jour)
Dao (Dao, 2012)	GR		3

En conclusion de cette analyse des propriétés à l'état frais des BGR, il ressort que les effets d'une distribution granulaire non continue, de la présence d'éléments fins, d'une morphologie anguleuse donc d'une surface spécifique élevée, d'une texture plus rugueuse sont identiques à ceux observés sur les granulats naturels possédant ces caractéristiques. Ils ont été décrits dans le chapitre 1.1. Les remèdes sont donc identiques.

3.3 BGR à l'état durcissant

3.3.1 Cinétique de prise et de durcissement

Pendant la prise, les granulats sont supposés être dans leur condition de surface saturée sèche. Lorsque les granulats sont utilisés dans leur état sec, les pâtes de ciment peuvent être entraînées lors de la phase d'absorption et boucher les pores des granulats provoquant ainsi des modifications des taux effectifs d'absorption et du rapport E_{eff}/C réel.

Concernant le potentiel de prise et de durcissement des fines recyclées, Hansen et Narud (Torben and Hendriks, 1983) ont constaté que la proportion d'éléments anhydres de dimension inférieure à 2 mm est telle que le potentiel hydraulique résultant n'est pas suffisant pour provoquer une prise effective qui conduit à un durcissement. Ainsi, selon ces auteurs, la substitution par des fines recyclées n'est pas envisageable. Par ailleurs, ils attribuent la faible réactivité observée à la carbonatation de l'hydroxyde de calcium plutôt qu'à une prise hydraulique.

Peu de recherches ont pour objet l'étude des modifications des cinétiques de prise et de durcissement des pâtes, mortiers ou bétons liées à la présence de granulats recyclés. La finalité des études sur le potentiel réactif des granulats recyclés est toujours liée à une substitution du ciment par les fines recyclées.

Nelfia (Nelfia et al., 2013) a étudié l'influence de la substitution du ciment par des fines recyclées sur la réactivité de mortiers. Les résultats de mesure de la chaleur d'hydratation ont montré que :

- Les fines seules n'ont pas de potentiel hydraulique, ce qui confirme les résultats de Hansen ;
- La substitution modifie la réaction d'hydratation du ciment (augmentation et accélération du processus d'hydratation) principalement par création de sites de nucléation ;

3.3.2 Retrait

La prise et le durcissement des matériaux cimentaires sont à l'origine de différents phénomènes de retrait dont l'amplitude doit être maîtrisée. Deux types de retrait peuvent être différenciés :

- Le retrait plastique est lié aux conditions atmosphériques, à la cure et au ressuage et apparaît juste après sa mise en œuvre. L'absorption différée d'eau par les granulats et la quantité importante de fines réduit le ressuage et augmente le risque de retrait plastique en cas de cure insuffisante.
- Le retrait endogène est lié à l'auto-dessiccation et apparaît essentiellement dans des bétons à faible rapport E/C.

Les études menées sur les phénomènes de retrait des bétons élaborés à partir de granulats recyclés de béton montrent qu'ils présentent des amplitudes plus importantes que les bétons traditionnels. La Figure 22 présente les résultats obtenus par Québaud (Québaud et al., 1998) et Whiting (Whiting et al., 2012) illustrant ces conclusions.

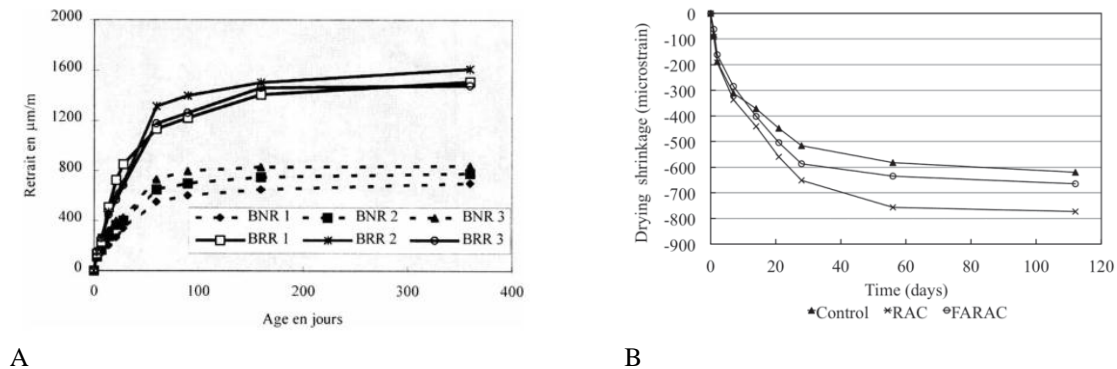


Figure 22 : mesure de retrait effectuée par Québaud (Québaud et al., 1998) (A) et Whiting (Whiting et al., 2012) (B)

Ces études montrent que le retrait des bétons de granulats recyclés était plus important que celui des bétons de granulats naturels. Ce retrait est compris entre 200 et 400 $\mu\text{m/m}$ et est expliqué entre autres par le relargage dans le béton de l'eau absorbée par les granulats recyclés pendant le malaxage puis par le phénomène d'évaporation. Le départ de cette eau à l'origine du retrait, et aussi la présence des éléments fins favoriseraient le retrait des bétons de granulats recyclés. Concernant le retrait endogène, il a été stipulé que le rapport E/C était bas pour les bétons recyclés favorisant ainsi théoriquement ce type de retrait. Cependant les granulats recyclés, de par leur porosité, possèdent une importante réserve d'eau qui est capable de suppléer à la raréfaction de l'eau présente dans les pores de la matrice. Par conséquent, le retrait endogène est réduit pour ces bétons et l'incorporation de granulats recyclés constituerait même une stratégie efficace pour réduire le retrait endogène des BHP.

Les études sur l'évolution du retrait au cours du temps ne permettent pas de conclure clairement sur l'origine de l'eau qui après migration s'évapore, au cours du durcissement du béton, et provoque un retrait : cette eau est-elle celle contenue dans la pâte ou celle contenue dans les granulats.

3.4 BGR à l'état durci

3.4.1 Masses volumiques porosité

A des échéances de 28 jours, les bétons de granulats recyclés présentent des faibles densités qui varient en fonction des conditions environnementales et qui ne dépendent pas uniquement de la nature des granulats utilisés (Tableau 17).

De même, la porosité augmente aussi en fonction du milieu de stockage des bétons, il est constaté que cette porosité augmente lorsque les bétons sont conservés à l'air (de 2 à 7% pour les bétons de granulats recyclés et de 13 % pour les bétons de granulats naturels).

Tableau 17 : Caractéristiques obtenues sur des bétons réalisés par Buyle-Bodin et al (Buyle-Bodin,F and Hadjieva-Zaharieva, 2002)

Conditions de stockages	Affaissement [mm]	Densité [kg/m ³]		Résistances mécaniques [MPa]		Porosité [%]	
		Conditions de conservation					
		Eau	Air	Eau	Air	Eau	Air
NAC1	65	2345	2315	42,6	37,7	11,2	12,6
NAC2	45	2440	2380	54,8	47,7	7,2	8,1
MAC	55	2370	2305	43,3	37,8	12,5	14,2
RAC1	50	2195	2155	31,5	29,5	22,6	23,1
RAC2	90	2205	2160	35,4	34,2	22	22,8
RAC3	50	2225	2190	39,4	38,1	19,7	21,1

- NAC : béton de granulat naturel
- MAC : béton mixte constitué de granulats naturels et de granulats recyclés
- RAC : béton de granulats recyclé

3.4.2 Résistances mécaniques

L'une des caractéristiques des bétons de granulats recyclés étudiées et comparées à celui des bétons de granulats naturels est la résistance mécanique. Les résistances à la compression (et à la traction) des bétons de granulats recyclés sont toujours inférieures à celles de bétons de granulats naturels, de 5 jusqu'à 40%. Et, selon les études menées par Zhao, de 27 % à 33% pour les mortiers en fonction de l'état des sables (Zhao, 2014a) ; (Zhao et al., 2015) L'adhérence entre la pâte et les granulats est considérée de moins bonne qualité.

La résistance à la compression des bétons de granulats recyclés dépend de 7 paramètres :

- Du taux de substitution à rapport E/C constant, la résistance à la compression diminue avec ce taux de substitution. A noter que la diminution de la résistance à la compression est peu importante lorsque le taux de remplacement des graviers est inférieur ou égal à 25% et celui des sables inférieur à 30%. On attribue cette baisse à une porosité plus importante dans les bétons de granulats recyclés ainsi qu'une mauvaise interface granulats/liant.
- Des paramètres de formulation et plus particulièrement du rapport E/C.
- Des conditions de cure car il apparaît clairement que le béton à granulats recyclés conservé à l'air suite à une cure humide partielle possède une résistance inférieure à celle des bétons conservés en permanence en milieu humide (Buyle-Bodin,F and Hadjieva-Zaharieva, 2002).
- De la nature du ciment.
- De la qualité du béton de démolition constituant les granulats recyclés. Le module d'élasticité est plus important si les granulats sont issus de bétons à haute résistance à la compression. Une baisse de la teneur en mortier primaire (ou résiduel) diminue l'impact négatif sur les résistances mécaniques. Ainsi les granulats dont la teneur en mortier primaire est inférieure à 44% pourront être utilisés dans la production des bétons armés de bonnes qualités (meilleures résistances mécaniques) (Parekh and Modhera, 2011), (de Juan and Gutiérrez, 2009), (López-Gayarre et al., 2009), (Padmini et al., 2009).

- Du malaxage surtout pour les résistances au jeune âge. Le procédé TSMA (pré malaxage des granulats et eau incorporés en plusieurs étapes) conduisant à des résistances à la compression plus élevées (Salas et al., 2010).
- De la nature des ajouts éventuels d'origine minérale (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, 1992) , (Ajdukiewicz and Kliszczewicz, 2002).

La résistance à la compression des bétons résulte aussi de celles des granulats, présentant une forte résistance (Los Angeles) et un faible module d'élasticité, soit un module d'élasticité qui n'est pas très différente de celui de la pâte de ciment.

En revanche, Katz a étudié le comportement des bétons à l'état durci réalisé avec des granulats obtenus sur des bétons d'âge de concassage varié (1 jour, 3 jours et 28 jours). Il a montré que l'âge des granulats recyclés avait peu d'influence sur le comportement des bétons de granulats recyclés.

La liaison entre la pâte et les granulats joue un rôle important dans l'obtention des résistances mécaniques mais les auteurs ne s'accordent pas sur sa qualité dans le cas des BGR. En effet, certains auteurs indiquent que leur forme influence la résistance des bétons mais essentiellement en ce qui concerne la résistance à la flexion à cause des liens entre les granulats et la nouvelle pâte de mortier dont l'adhésion n'est pas toujours effective (Neville, 2000) ; (Agrela et al., 2013) ; (Parekh and Modhera, 2011) ; (Rahman et al., 2009) ; (Marta Sanchez de Juan and Pilar Aloejos Gutiérrez, 2004). La présence du mortier fragilise la zone interfaciale entre le nouveau mortier et l'ancien mortier qui à son tour baissera les performances mécaniques des bétons de granulats recyclés. Cependant Braymand a identifié visuellement une bonne liaison pâte granulat sur des bétons formulés à 100% de GR dont les propriétés mécaniques obtenues sont égales à celles des GN (Sandrine Braymand et al., 2012a)(Sandrine Braymand et al., 2012b). De même, Kaplan en 1959, suite à une étude réalisée sur 13 lots de granulats recyclés différents (> à 4mm), le facteur influençant la résistance mécanique mis en évidence a été la texture extérieure du granulat. Une surface rugueuse augmente la force d'adhésion entre la matrice et le granulat. Si la surface est poreuse, elle absorbera l'eau et ainsi pourra positivement influencer le lien entre la pâte et le granulat (Stock et al. 1979 et Neville., 1995).

La résistance mécanique est donc affectée par la qualité du granulat recyclé. Mais si le rapport Eau totale/Ciment est maintenu constant et la perte d'ouvrabilité due à l'effet des granulats recyclés est compensé par l'emploi des additions ou adjuvants, l'augmentation du taux de granulat recyclé ne pourra pas modifier de façon considérable les résistances mécaniques. Walker et Bloem en 1960 ont montré que pour un rapport Eau/Ciment constant, la résistance diminue avec l'augmentation de la dimension maximale des granulats, particulièrement pour la taille supérieure à 38 mm. Ceci est dû à plusieurs paramètres : zone d'interface granulat pâte, les faibles adhérences entre les granulats et la pâte.

Sur un ensemble de 21 bétons réalisés avec des granulats recyclés, Rasheeduzzafar et al (Wedding et al., 1984) ont montré qu'avec un rapport eau/ciment égal à 0,35, les bétons de granulats recyclés présentent des résistances plus basses de 30% comparés aux bétons de granulats naturels. Ces résistances sont sensiblement identiques lorsque le ratio est ramené à 0,7. Rao et al ont montré que les résistances mécaniques des bétons de granulats recyclés et celles des granulats naturels pouvaient être comparées et pour cela, il faut utiliser un rapport E/C supérieur à 0,55 et qu'une différence de 25 % de résistance est observée entre un béton de granulats recyclés et naturels lorsque le rapport E/C est ramené à 0,4% (Rao et al., 2007) .

Il est cependant difficile, parfois, d'interpréter les résultats de la bibliographie en ce qui concerne l'influence du dosage en eau, la notion d'eau efficace ou totale n'étant pas toujours clairement précisée. Certains relèvent cependant que l'absorption d'eau des granulats recyclés croît avec l'augmentation de la résistance du béton parent dont ils dérivent (Hansen, 1986) . Par contre, elle décroît avec l'augmentation de la taille des particules de granulats. De ce fait, la forte absorption des granulats recyclés nécessite un réajustement de la quantité d'eau de malaxage afin d'atteindre l'ouvrabilité et la résistance désirées (Hansen, 1986) , point évoqués précédemment lors de l'étude des GRB.

De plus, l'hétérogénéité et la présence d'impuretés pourraient aussi affecter les propriétés mécaniques du BGR (Buyle-Bodin,F and Hadjieva-Zaharieva, 2002). Buyle-Bodin et al (Buyle-Bodin,F and Hadjieva-Zaharieva, 2002) et Hansen et al (Torben and Hendriks, 1983) supposent que le fait que les granulats recyclés ne soient pas complètement inertes influencerait le comportement des bétons à l'état frais et à l'état durci

3.5 Adaptation des méthodes de formulation

3.5.1 Amélioration des propriétés des BGR : Adjuvantation par utilisation de superplastifiants

Pereira et al montre que l'emploi d'un superplastifiant (à base de lignosulfonates et à base de polycarboxylates modifiés) permet d'obtenir un béton de granulat recyclé avec fines recyclées dont l'écart de résistances avec celles des bétons de granulats naturels est inférieure à 5% (Figure 23) (Pereira et al., 2012a). D'autres auteurs confirment le fait qu'ils améliorent les performances mécaniques des bétons de granulats recyclés afin qu'elles puissent se rapprocher aux mieux de celles des bétons de granulats naturels (S Braymand et al., 2012) ; (Sagoe-Crentsil et al., 2001) ; (Braymand et al., 2013), (Sandrine Braymand et al., 2012b).

Sur l'aspect ouvrabilité, De Juan montre que l'emploi des superplastifiants améliorent l'ouvrabilité (De Juan and Gutiérrez, 2004), ils permettent à ouvrabilité constante de limiter l'ajout d'eau et de ce fait réduire la porosité des bétons (Dao, 2012).

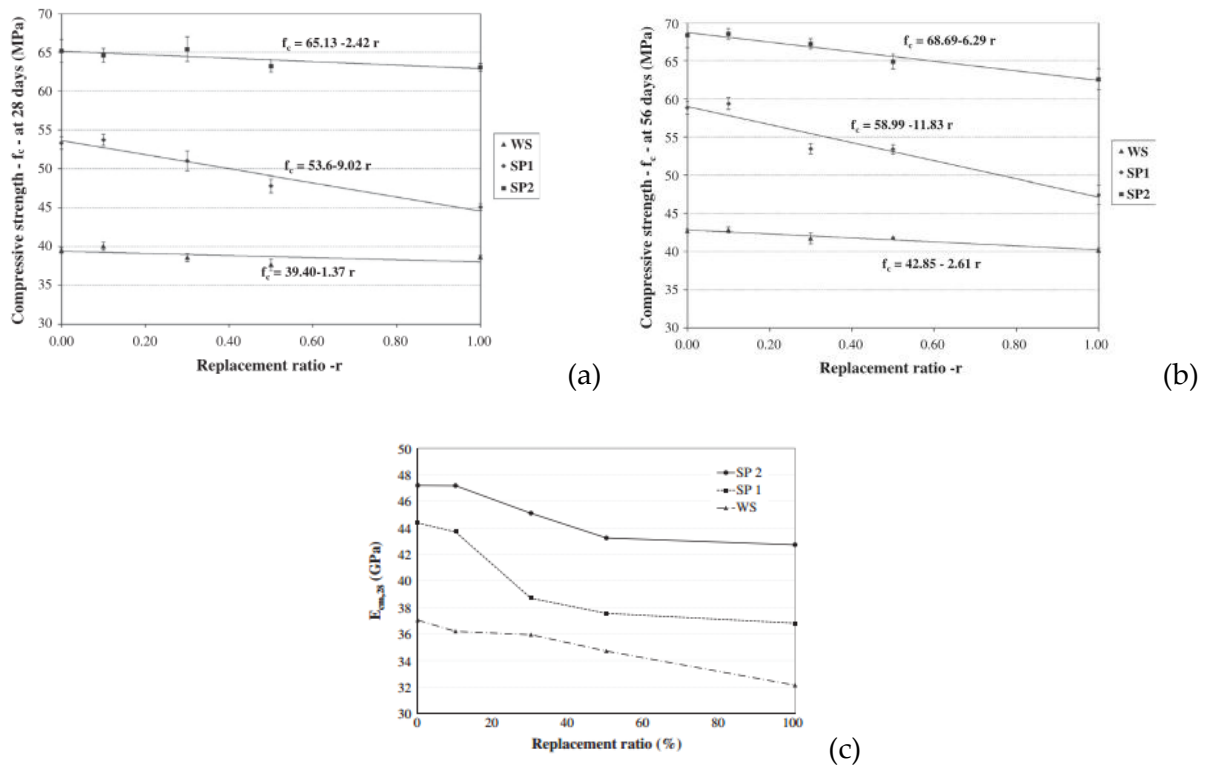


Figure 23 : Influence de l'emploi des superplastifiants sur les propriétés mécaniques des BGR selon Pereira et al (Pereira et al., 2012a)

SP1 : superplastifiant à base de lignosulfonates ; SP2 : superplastifiants à base de polycarboxylates modifiés et WS : béton réalisé sans adjuvant

(a)résistances mécaniques en fonction du rapport FN/FR à 28 jours ; (b) résistances mécaniques en fonction du rapport FN/FR à 56 jours ; (c) Module d'élasticité en fonction du rapport FN/FR à 28 jours.

Braymand et al ont montré que l'efficacité des superplastifiants dépendait de leur nature. Ainsi, les superplastifiants les plus efficaces pour fluidifier les mortiers de sables recyclés sont ceux à base de copolymère polycarboxylate ou d'éther polycarboxylique modifié, leur action sur les fines de sable recyclé explique en partie cette efficacité. L'influence des adjuvants sur le comportement rhéologique à l'état frais des coulis de fines recyclées (inférieures à 500 μm) confirme les résultats des études sur mortiers de sable recyclé. (Sandrine Braymand et al., 2012a)(Braymand et al., 2015a). Ainsi, le recours systématique à la suppression des fines (éléments fins) peut être évité par l'ajout de superplastifiants et permettre ainsi de conserver ces fines qui ont un effet bénéfique sur les propriétés mécaniques (Braymand et al., 2013).

3.5.2 Adaptation des méthodes de formulation

Corinaldesi et al en 2009 (Corinaldesi and Moriconi, 2009) a réalisé un béton de granulats recyclés sans fines recyclées en utilisant la méthode de Bolomey. En plus des granulats recyclés, il emploie des cendres volantes et des fumées de silice. L'affaissement initial trouvé

est compris entre 150 et 165 mm. Evangelista et al en 2007 (Evangelista and de Brito, 2007), selon la méthode Faury, avec pour affaissement 80 ± 10 mm a préconisé l'emploi de 30% de substitution de sable naturel par du sable recyclé. Les cendres volantes et les gravillons naturels étant utilisés. Avec 30 % de substitution, le béton de granulats recyclés présente des résistances mécaniques sensiblement identiques à celui d'un béton de granulats naturels. Braymand en 2010 (Braymand, 2010) utilise la méthode Dreux Gorisse, sans ajout d'eau d'absorption mais avec utilisation de superplastifiant. Un béton de granulats recyclés (100%) de propriétés mécaniques égales à celle du béton de granulats naturels est alors obtenu.

Abbas et al en 2009 (Abbas et al., 2009) a utilisé une nouvelle méthode de formulation appelée Volume de mortier équivalent « VME » qui consiste à prendre en compte le volume de pâte de mortier des granulats comme étant le mortier du béton de granulats recyclés. Donc, le volume total de mortier est composé de mortier accolé et du nouveau mortier. Les bétons de granulats recyclés formulés selon la méthode VME avaient des propriétés de résistances mécaniques et des masses volumiques à l'état frais et durci supérieures à celles des bétons de granulats recyclés formulés selon les méthodes classiques. L'ouvrabilité de ces bétons est proche de celles des bétons de granulats naturels.

Dao en 2012 (Dao, 2012) a démontré l'applicabilité de la méthode De Larrard, introduisant le critère Epaisseur Maximal de Pâte (EMP) et faisant intervenir le Modèle d'Empilement Compressible (MEC). Cette méthode nécessite cependant une connaissance de compacités individuelles des granulats entrant dans la formulation.

3.5.3 MBE de Granulats recyclés

Zhao (Zhao, 2014a) a réalisé des essais d'ouvrabilité et de résistances mécaniques sur des mortiers de bétons équivalents avec des sables préalablement saturés pendant 24 heures avant essais pour certains mortiers et non saturés pour d'autres (compositions données en annexe 2). Les mortiers réalisés avec des granulats qui n'ont pas été pré saturés présentent des affaissements élevés aux instants initiaux, ceci est dû à la quantité importante d'eau contenue dans le mortier comparativement aux mortiers réalisés avec des granulats recyclés saturés. Néanmoins la perte d'ouvrabilité est plus importante pour les mortiers réalisés avec des granulats non saturés, ceci est expliqué par le fait que l'eau contenue dans les mortiers soit absorbée.

En ce qui concerne les résistances mécaniques, celles des mortiers de granulats recyclés sont inférieures à celles des sables naturels. Corinaldesi et Moriconi ont aussi trouvé les mêmes résultats (Corinaldesi and Moriconi, 2009). Les diminutions varient de 31% pour les mortiers avec sables non saturés à 33% pour les mortiers avec sables saturés.

Cependant aucun des auteurs ne s'attache à vérifier la validité de cette méthode et notamment sa corrélation avec les propriétés des bétons auxquels ils sont équivalents.

3.6 Conclusion partielle : BGR et méthodes de formulation et de mise en œuvre

L'utilisation de GRB dans les bétons est généralement considérée comme négative au regard des propriétés des bétons obtenus, mais les formulations sont rarement effectuées à paramètres constants, la comparaison de ces propriétés est donc difficile.

L'emploi de superplastifiants n'est pas systématique dans les formulations des BGR et peu d'études se sont attachées à identifier les adjuvants les plus efficaces au regard de l'ouvrabilité ou des résistances.

Beaucoup de BGR sont constitués d'un mélange de granulats naturels et recyclés, le sable recyclé étant souvent substitué par du naturel. La notion de fines recyclées, lorsqu'elles sont conservées, n'est pas clairement définie à ce jour et les auteurs emploient ce terme des fines présentant un diamètre maximum de 63 à 500 μm , voire parfois jusqu'à 4 mm.

La plupart des auteurs préconisent la préhumidification des granulats recyclés avant le malaxage tant pour l'amélioration des propriétés à l'état frais que de celles à l'état durci. Cependant, la migration de l'eau d'absorption ajoutée (en préhumidification ou non) à l'eau efficace dans le mélange dans les granulats puis son relargage dans la pâte est discutée et les auteurs ne s'accordent pas sur ce point.

Il semble que la mise en œuvre des GRB ne peut se calquer directement sur celle des granulats naturels et leurs spécificités doivent être prises en compte à la fois pour l'élaboration des formulations et pour la mise en œuvre du béton. La formulation des bétons avec les granulats recyclés n'est pas standardisée. Or des méthodes telles que la méthode MBE sont appliquées sans que la corrélation avec leurs bétons référents ne soit validée.

Conclusion du chapitre 1 et programme d'étude

Cette étude bibliographique, après un rappel des facteurs influençant les propriétés des bétons traditionnels et de ce fait leurs méthodes de formulation, s'est attachée à identifier les propriétés particulières des granulats recyclés de bétons (GRB) et leurs influences sur les caractéristiques des bétons qu'ils constituent (BGR).

Des différences notoires de propriétés sont observées entre GRB et GN (granulats naturels) (géométrie, teneur en fines, absorption, résistance mécanique), elles sont fortement liées à la porosité du GRB elle-même dépendante de la teneur en mortier. Cette dernière n'est toutefois pas facile à évaluer.

Peu de modifications aux protocoles normalisés d'évaluation des granulats sont proposées, sauf en ce qui concerne le suivi de la cinétique d'absorption qui identifie un temps de saturation supérieur à 24h.

Les influences de ces spécificités sur les BGR sont multiples et complexes, très dépendantes des paramètres de composition choisis, notamment de la proportion de GRB utilisée, du dosage en ciment, de l'utilisation d'adjuvants et du dosage en eau. Ce dernier est parfois exprimé en eau efficace à laquelle est ajoutée l'eau d'absorption (non prise en compte dans les modèles analytiques prévisionnels), parfois en eau totale intégrant ou non une part de l'eau d'absorption. Les conclusions des auteurs sont donc différentes quant à l'influence de l'utilisation des GRB sur la résistance mécanique des BGR. Toutefois, ils s'accordent à observer une perte d'ouvrabilité lorsque les GRB sont utilisés, surtout en terme de maintien. Quelles que soient ces influences (perte d'ouvrabilité, baisse des densités, retrait augmenté et résistances mécaniques affaiblies,...), la forte absorption des GRB, leur teneur en éléments fins et leur forme en sont les principaux facteurs.

De ce fait, ces propriétés restent les spécificités les plus mises en avant qui conduisent à des adaptations de formulation ou de mise en œuvre, notamment par une correction du dosage en eau, une préhumidification des granulats ou le remplacement du sable recyclé par le sable naturel. Par contre, peu d'études se sont focalisées sur le rôle joué par les éléments fins recyclés inférieurs à 100 μm et, leur retrait, comme celui du sable est souvent réalisé. La désorption potentielle de l'eau contenue dans les granulats vers la pâte de ciment et son influence sur les propriétés mécaniques ne sont que peu évoquées.

Dans le but d'apporter des éléments à la compréhension des phénomènes mis en jeu lors de la fabrication de BGR et ainsi de proposer des adaptations aux méthodes de formulation, le programme expérimental suivant a été réalisé :

- Une étude approfondie des propriétés des GRB, effectuée sur plusieurs lots de GRB est réalisée. Une attention particulière sera apportée à la validité pour les GRB des protocoles expérimentaux habituellement utilisés pour les GN. De plus, la caractérisation de la morphologie des granulats, la quantification des éléments fins et la qualification de leur réactivité, ainsi que le suivi des cinétiques d'absorption et de désorption sont approfondies. Une proposition d'essai pour quantifier la teneur en mortier résiduel est initiée. Cette étude fait l'objet du chapitre 2.
- Parallèlement à cette étude sur GRB, des BGR (à 100% de GRB) ont été formulés et mis en œuvre dans le but premier de comparer les propriétés des BGR et des BGN lorsque tout autre paramètre hormis le squelette granulaire est gardé identique. L'influence de l'introduction d'adjuvants superplastifiants sur les propriétés à l'état frais et durci est également comparée entre les BGR et les BGN. Puis, au regard des conclusions du chapitre 2, des propositions d'adaptations aux méthodes de formulation des bétons d'une part, et de celles des Mortier de Bétons Equivalents d'autre part sont faites et testées. L'étude sur BGR fait l'objet du chapitre 3.
- Enfin, l'ensemble des résultats obtenus aux chapitres 2 et 3 sont comparés et confrontés aux résultats de la bibliographie et il est proposé d'ajouter un critère d'évaluation aux BGR : son impact environnemental quantifié au travers d'une étude d'ACV (Analyse du

Cycle de Vie). Ces éléments de discussions et de perspectives sont présentés dans le chapitre 4.

Chapitre 2 - Propriétés et spécificités des granulats recyclés

Introduction

Dans ce chapitre, les propriétés physiques et mécaniques de différents granulats recyclés en plateforme industrielle ou en laboratoire ont été étudiées puis comparées à celles de deux granulats naturels, roulés et concassés. Pour cela, une étude comparative des variations sur plusieurs lots des propriétés des granulats recyclés est proposée.

Une étude exhaustive des caractéristiques des GRB (Granulats recyclés de bétons) a ainsi été menée. L'accent a été mis sur les caractéristiques qui sont modifiées par la présence de pâte et de mortier résiduels et qui influencent les propriétés des bétons qu'ils constitueront : teneur en éléments fins et distribution granulaire, morphologie, réactivité potentielle à l'eau, absorption à l'eau, potentiel de désorption et résistances mécaniques à l'usure et à la fragmentation.

Une analyse critique des protocoles normalisés ou usuels de caractérisation des granulats est aussi faite et des adaptations sont proposées qui tiennent compte des spécificités des GRB.

Ensuite, comme la particularité des GRB est de contenir du mortier et de la pâte de ciment résiduels qui influencent plusieurs de leurs propriétés, une première approche de la détermination de cette quantité de matière résiduelle est proposée et critiquée.

Enfin les adaptations de protocoles et les résultats expérimentaux obtenus sur GRB sont synthétisés et critiqués relativement aux interactions entre les propriétés étudiées.

1 Matériaux d'étude et méthodes expérimentales

Différents granulats ont été utilisés et caractérisés :

- des granulats naturels roulés et concassés
- des granulats recyclés d'origines différentes.

Les essais normalisés permettant de valider l'usage des granulats comme granulats pour bétons sont privilégiés. Cependant certains protocoles d'analyses ont été modifiés afin de les rendre cohérents au regard des spécificités des granulats recyclés.

1.1 Matériaux d'étude

Les **granulats naturels roulés (GNR)** proviennent de l'usine Helmbacher dont le site est à Eschau en Alsace (67). Ces matériaux ont été livrés en trois classes granulométriques : de 0 à 4 mm ; de 4 à 8 mm et de 8 à 16 mm. Ils sont de nature silico-calcaire.

Les **granulats naturels concassés (GNC)** proviennent des carrières Lafarge de Sandrancourt (78) pour le sable et de Givet (08) pour les granulats plus grossiers. Les matériaux livrés sont :

- sable semi-concassé lavé 0/4 mm obtenu à partir des roches alluvionnaires ;
- gravillons et graviers calcaires concassés 4/10 mm et 6,3/20 mm issus de roches massives.

Ils ont été livrés en big bag de 500 kg pour les granulats grossiers et 1000 kg pour les sables. Leur conservation en laboratoire s'est faite dans un hall à l'abri de toute intempérie et hors gel. Les granulats concassés sont les matériaux de référence utilisés dans le cadre du projet national Recybéton.

Sept types de granulats recyclés ont été étudiés :

- Quatre granulats recyclés provenant de plates-formes de recyclage industrielles : GR1 à GR4. La composition de leur béton parent est inconnue.
- Deux granulats recyclés provenant de bétons fabriqués au laboratoire et de compositions connues : GR5 et GR6
- un granulats recyclés, provenant de mortier frais de composition connue fabriqué au laboratoire et broyé, réalisé pour certains essais spécifiques : GR7

Les granulats recyclés GR 1 ont été récupérés sur la plateforme Lingenheld (67) et stockés en laboratoire depuis 2008 (0/20 mm). La plage granulaire étudiée varie de 0 à 13,5 mm.

Les granulats recyclés GR 2 et GR 3 proviennent de la même plateforme de concassage de la Société Alsacienne de Recyclage des Matériaux (S.A.R.M - 67). Ils ont été prélevés à des périodes différentes (2012 pour les granulats recyclés GR 2 et 2011 pour les granulats recyclés GR 3) et livrés en granulométrie 0/20 mm.

Les granulats recyclés GR 4 sont des matériaux fournis dans le cadre du projet national RECYBETON. Ils sont issus d'une production spécifique de plateforme des Docks de Limeil-Brévannes « DLB » de Gonesse (95). Deux livraisons ont eu lieu respectivement de 1 tonne +1 tonne de 0/4mm, 500 kg de 4/10mm et 1tonne +1 tonne de 10/20 mm. Livrés en big bag au laboratoire, ils ont été stockés dans le hall à l'abri des intempéries puis échantillonnés en lots de 50 kg après homogénéisation. L'échantillonnage des granulats recyclés GR 4 a été effectué en adaptant la norme EN 932-1 (Afnor, Norme NF EN 932-1, 1996).

Les granulats recyclés GR 5 et GR6 ont été obtenus à partir de bétons de granulats naturels fabriqués préalablement au laboratoire dont les compositions sont reportées Tableau 18. Les granulats GR5 ont été concassés au marteau puis conservés dans des fûts de 60 litres. Les granulats GR6 ont été conservés en l'état (cylindres 11x22 cm). Un concassage au marteau puis un broyage au moyen d'un broyeur à boulet (Retsch) a été effectué juste avant chaque utilisation.

Tableau 18 : Composition du béton des granulats GR 5 et GR6 (Sandrine Braymand et al., 2012b) ;(Braymand et al., 2013)

Composition béton parent [kg/ m ³]	Sable naturel roulé 0/4mm	Gravillon naturel roulé 4/8 mm	Gravier naturel roulé 8/20 mm	Eau totale	Quantité de ciment CEM I-52,5
GR5	685	111	1065	194	350
GR6	700	100	1000	200	350

Les granulats recyclés GR 7, obtenus après broyage d'un mortier de composition connue (cf Tableau 19) et âgé de 30 jours, ont été concassés au marteau puis au broyeur à boulet juste avant leur utilisation ou conservés dans des sachets étanches.

Tableau 19: Composition du mortier ayant servi à l'obtention des granulats GR 7

Composition mortier parent [kg/ m ³]	Sable naturel roulé 0/4mm	Eau efficace	Quantité de ciment CEM I 52,5	Adjuvant Mc-powerflow 3140
GR7	1350	264	450	2,25

Le Tableau 20 récapitule la provenance et le stockage des granulats de l'étude.

Tableau 20 : Provenance des granulats

Désignation						
GR 1	GR 2	GR 3	GR 4	GR 5	GR6	GR7
Recyclage						
Plateforme 1	Plateforme 2	Plateforme 2	Plateforme 3	Laboratoire béton fabriqué en 2008	Laboratoire béton fabriqué en 2012	Laboratoire mortier fabriqué en 2014
Dates de prélèvement (stockage au laboratoire à l'abri)						
2008 2009	2012	2011	2012	Concassé en 2012	Concassé en 2014	Concassé en 2014

Désignation	
GNR	GNC
Nature	
Granulats naturels roulés	Granulats naturels concassés
Provenance	
Gravière Alsace	Carrière Ile de France (sable) Carrière Ardennes (gravillon et gravier)

Les coupures granulaires d'étude obtenues sur plateforme ou réalisées en laboratoire sont données Tableau 21.

Tableau 21 : Coupures granulaires étudiées

	GR 1	GR 2	GR 3	GR 4	GR 5	GR6	GR7	GNC	GNR
Eléments fins [µm]	0/100	0/100	0/100	0/100	0/100	0/100	0/63		
	0/315	0/315	0/315	0/315	0/315	0/315	0/100		
	0/500	0/500	0/500	0/500	0/500	0/500		0/500	0/500
Granulats [mm]			0,063/4	0,063/4	0,063/4	0,063/4			
	0/4	0/4	0/4	0/4	0/4	0/4		0/4	0/4
	4/8	4/8 4/10	4/8	4/10	4/8	4/10		4/10	4/8
	8/13,5	8/16 10/20 16/20	8/16 16/20	10/20	8/16	10/20		6,3/20	8/16

Remarque : Les matériaux GR 4 et GNC ont été livrés 2 fois. De ce fait, le chiffre 1 ou 2 est ajouté aux granulats, ces chiffres spécifient la livraison à laquelle correspond le granulat. Le granulat livré en première position a le numéro 1 tandis que le chiffre 2 a été attribué aux granulats livrés en deuxième.

1.2 Méthodes expérimentales

La plupart des essais réalisés nécessitent un matériau à l'état sec. La température de séchage à l'étuve des granulats recyclés a été limitée à 65°C pour ne pas détériorer les constituants de la pâte de ciment durcie (notamment l'ettringite et les CSH) et ainsi ne pas influencer les résultats des différentes analyses (Baroghel-Bouny et al., 2002).

1.2.1 Analyses dimensionnelles

1.2.1.1 Granularité

La distribution granulaire des matériaux d'études a été déterminée sur les différents lots, selon la norme NF EN 933-1 (Afnor, Norme NF EN 933-1, 1997), par tamisage par voie sèche sans lavage. Les granulats recyclés contenant du mortier ne sont pas lavés avant l'essai, tel que préconisé dans la norme. Comme les fines seront conservées lors de la réalisation des bétons et des mortiers, le lavage engendrerait leur perte. De plus, la présence de fines et d'éléments réactifs interdit une humidification préalable pouvant engendrer des réactions d'hydratation.

L'analyse granulométrique a pour but d'étudier la répartition dimensionnelle des grains. Tiré de cette analyse, le module de finesse est quant à lui un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans les granulats. L'analyse granulométrique s'applique aux granulats dont la taille varie de 63 µm à 25 mm tandis que le module de finesse est déterminé sur la fraction sableuse (taille des grains inférieure à 4 mm).

Le protocole de l'essai granulométrique consiste à verser un prélèvement de masse définie, au travers d'une série de tamis superposés. A l'issue du tamisage, les refus de chaque tamis sont pesés. Les valeurs obtenues permettent de déterminer les pourcentages de tamisat relatifs et de tracer la courbe du pourcentage de tamisats cumulés en fonction de la maille des différents tamis.

Plusieurs exploitations et critiques de l'analyse granulométrique seront proposées dans la suite du travail. Celles-ci concernent notamment la prise en compte des masses volumiques qui peuvent varier selon les classes granulaires ainsi qu'une comparaison entre les diamètres réels des grains mesurés au pied à coulisse et les tailles des mailles de tamis.

A l'issue de l'analyse granulométrique, **le calcul des modules de finesse** (Mf) a été fait selon les normes NF XP P 18 540 (Afnor, Norme NF XP P 18-540, 1997) et NF EN 12 620 (Afnor, Norme NF EN 12620, 2003) (Tableau 22). Le calcul selon la norme NF XP P 18 540 a été effectué bien que cette norme ne soit plus en vigueur car la valeur obtenue est utilisée dans les méthodes de formulation des bétons.

Tableau 22: calcul des modules de finesse

Norme de référence	module de finesse
NF EN 12 620 Sur sable	1/100{sommes des Refus cumulés (%) de 0,125mm à 4 mm}
XP P 18 540 Sur sable	1/100{sommes des Refus cumulés (%) de 0,16mm à 5 mm}

Une exploitation complémentaire à l'analyse granulométrique est proposée par **le calcul des coefficients d'uniformité et de courbure**. Ces coefficients évaluent l'étalement, continuité et la graduation de la granulométrie.

Le coefficient d'uniformité (Cu) caractérise la répartition ou la distribution des granulats. Il est défini selon $C_u = d_{60}/d_{10}$, d_{10} ou d_{60} étant les dimensions de tamis correspondants à 10 ou 60 % de passants.

- si $C_u < 2$, la granulométrie est uniforme ou serrée,
- si $C_u > 2$, la granulométrie est étalée (ou variée).

Le coefficient de courbure (Cc) est défini selon $C_c = \frac{(d_{30})^2}{(d_{10} \cdot d_{60})}$, d_{10} ; d_{30} ou d_{60} étant les dimensions de tamis correspondants à 10 ; 30 ou 60 % de passants

Cc correspond à une granulométrie bien graduée si le coefficient de courbure est compris entre 1 et 3.

1.2.1.2 Analyses granulométriques des éléments fins

L'analyse granulométrique par tamisage a été complétée par une étude de la distribution granulaire des éléments fins par granulométrie laser. Les diamètres des particules sont ainsi obtenus par diffraction (théorie de Fraunhofer) (de Boer et al., 1987). Selon la théorie de Fraunhofer (de Boer et al., 1987), la taille des particules influent sur l'intensité du rayonnement diffracté et sur l'angle de diffraction. Une particule plus grosse dévient plus de lumière avec un angle de déviation plus faible. Les diamètres des particules sont ainsi mesurés. Une limite à cette théorie est observée pour les particules inférieures à 50 μm , pour lesquelles la théorie de Mie doit alors être appliquée.

Cette analyse est réalisée sur les éléments de fraction inférieure à 500 µm en milieu liquide, puis inférieure à 100 µm en milieu sec (Tableau 23). Ces analyses successives sur les fractions granulaires étudiées permettent d'obtenir les proportions et distributions des éléments fins présents dans les granulats.

Tableau 23 Récapitulatif des essais effectués - granulométrie laser

Granulats	Classe granulaire	Nombre d'essais	Méthode
GR 1 ; GR 2 ; GR 3 ; GR 4-1 ; GR 5 ; GNC-1 ; GNR	0/500 µm	3	Granulométrie laser par voie humide (TAMAIR)
GR 1 ; GR 2 ; GR 3 ; GR 4-2 ; GR 5 ; GR 6 ; GR 7	0/100 µm	2	Granulométrie laser par voie sèche (Sympatec)
GR 7	0/63 µm		

1.2.1.3 Surface spécifique – perméabilité Blaine

Cet essai (Blaine) a été réalisé selon la méthode définie dans la norme NF EN 196-6 (Afnor, Norme NF EN 196 6, 1990). Il consiste à mesurer le temps mis par une quantité fixée d'air pour traverser un échantillon de ciment ou d'éléments fins dont l'empilement présente une porosité globale supposée égale à 0,5. La surface spécifique des grains est fonction de ce temps. Pour adapter cet essai à l'étude des fines de granulats recyclés, les particules de granulats ont préalablement été tamisées et seules les fractions inférieures à 100 µm ont été analysées. Les lots suivants ont été testés : GR 1 ; GR 2 ; GR 3 ; GR 4-1 ; GR 5.

1.2.1.4 Géométrie et morphologie

Une série de mesures a été effectuée afin de décrire la figure géométrique approchant au mieux celle du granulat étudié. Elle a été réalisée sur matériaux secs des classes granulométriques comprises entre 4 et 20 mm.

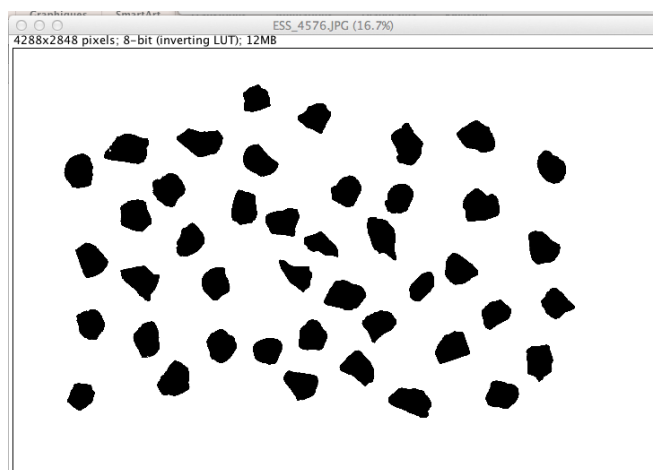
La forme des granulats a dans un premier temps été évaluée à l'aide de mesures au pied à coulisse des longueurs, largeurs et épaisseurs (diamètres de Féret minimum, medium et maximum). Le diamètre de Féret est une mesure de la dimension maximale dans une direction donnée.

Ces mesures ont été réalisées sur un prélèvement de 15 granulats par fraction étudiée. Elles sont effectuées après tamisage des gravillons et graviers. Le temps de vibration pour le tamisage a été sectionné à 3 minutes de sorte à garantir le passage d'un maximum de granulat à travers les mailles du tamis sans que ces derniers ne soient détériorés (décollement du mortier accolé). Les granulats GR4-1, GNC-2 et GNR ont été analysés suivant cette procédure (Tableau 24).

L'indice de forme ou allongement (ou rapport d'aspect) rapport du diamètre maximal de Féret au diamètre minimal a ensuite été déterminé. Une valeur proche de 1 qualifie un granulat de forme régulière, proche d'une sphère. Ensuite, les valeurs dimensionnelles obtenues sont comparées aux tailles des mailles inférieures et supérieures des tamis pour chaque classe étudiée.

Dans un deuxième temps, des analyses morphologiques en 2 dimensions par traitement d'image numériques ont été réalisées à partir de clichés photographiques de lots de granulats (quantité par lot ≥ 30 granulats). Les photos ont été réalisées à l'aide d'un appareil photographique équipé d'un objectif macro. Les granulats sont disposés sur un fond blanc de sorte à augmenter le contraste et éloignés les uns des autres afin qu'ils ne soient pas en contact. Les caractéristiques de l'appareil photo, de l'objectif et du logiciel d'analyse d'image (Image J) sont donnés en annexe 3. Cet objectif macro garantit une image à l'échelle 1 lorsque la mise au point est effectuée. Cependant, par mesure de précaution, un réglet (référence de mesure) est photographié à chaque cliché.

Le post traitement des images à l'aide du logiciel Image J (Rasband, 2014) conduit à l'obtention des critères morphologiques suivants : Diamètre de Féret maximal, Diamètre de Féret minimal, Allongement, Circularité, Convexité, Tortuosité, Longueur géodésique. Une analyse statistique (moyenne, médiane, écart type,...) a ensuite été réalisée à partir de ces résultats.



Les fractions granulaires étudiées sont identiques à celles mesurées à l'aide du pied à coulisse et données Tableau 24.

Dans le but de valider la représentativité de cette méthode de mesure bidimensionnelle, une série de 10 clichés d'un même prélèvement (8-10 mm) a été effectuée avec un mélange (par secouage) des granulats entre chaque prise de vue. Sur cette série, les mêmes post traitements sont effectués.

Tableau 24: Classe granulaires étudiées par analyse d'image

	GNR	GNC-2	GR 4-1
Gravillons	4/5 - 5/6,3 - 6,3/8 - 8/10	4/5 - 5/6,3 - 6,3/8 - 8/10 - 10/12,5	4/5 - 5/6,3 - 6,3/8 - 8/10 - 10/12,5
Graviers	4/5 - 5/6,3 - 6,3/8 - 8/10 - 10/12,5 - 12,5/16 - 16/20	5/6,3 - 6,3/8 - 8/10 - 10/12,5 - 12,5/16 et 16/20	5/6,3 - 6,3/8 - 8/10 - 10/12,5 - 12,5/16 et 16/20

1.2.2 Analyses physiques

1.2.2.1 Masse volumique apparente

Les essais de détermination de la masse volumique apparente des matériaux secs ont été réalisés selon la démarche décrite dans la norme NF X31-503 (Afnor, Norme NF X 31-503, 1992).

Cet essai a été respectivement réalisé sur 3 prélèvements pour les sables, les gravillons et les graviers des lots GNR, GNC-1, GR 2 et GR 4-1.

1.2.2.2 Absorption, saturation et masses volumiques spécifiques

La détermination de la quantité d'eau absorbable par un granulat est une caractéristique essentielle qui conditionne directement la mesure des masses volumiques absolues et réelles. C'est pourquoi un protocole fiable de détermination du coefficient d'absorption doit être proposé.

Coefficient d'absorption d'eau selon la NF EN 1097-6

La mesure du coefficient d'absorption des granulats naturels a été réalisée en se basant sur le protocole décrit dans la norme NF EN 1097-6 (Afnor, Norme NF EN 1097-6, 2001). Préalablement à l'essai les échantillons sont séchés en étuve à $65^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ jusqu'à stabilisation de leur masse, mesurée comme étant la masse sèche.

Après saturation en eau, les échantillons sont traités afin de permettre la mesure de leur masse à l'état saturé – surface sèche.

Le coefficient d'absorption W en pourcentage est déterminé selon :

$$W = \frac{(M_1 - M_4)}{M_4} \times 100$$

Équation 2: Coefficient d'absorption d'eau

- Masse du granulat saturé à surface sèche (M_1) [g] ;
- Masse du granulat séché (M_4) [g].

La difficulté de cet essai est premièrement de garantir l'atteinte de la saturation puis deuxièmement d'obtenir par la suite un état saturé surface sèche.

Plusieurs adaptations ont été apportées au protocole normalisé pour tout ou partie des lots analysés. Ces adaptations ont conduit à trois protocoles qui diffèrent par leur méthode d'immersion et/ou de séchage des granulats.

Un tableau récapitulatif des conditions de réalisation pour chacun des lots analysés est donné en annexe 4.

Adaptation de la méthode de saturation

Le principe décrit dans la norme est le suivant : un échantillon de granulat est immergé pendant 24 heures dans un récipient de volume défini afin d'atteindre un état supposé saturé en eau, puis séché en surface. L'échantillon est ensuite amené à un état totalement sec puis pesé de nouveau (Afnor, Norme NF EN 1097-6, 2001).

Trois adaptations ont été proposées.

Avant immersion le granulat est séché puis pesé. Une valeur de référence du granulat sec est ainsi obtenue et permettra par la suite un contrôle de la quantité de perte de matériau lors de la manipulation par comparaison avec celle obtenue en fin de protocole.

La durée d'immersion a été prolongée de 10 heures voire plus afin de garantir l'atteinte de la saturation. Le temps de saturation nécessaire a été déterminé par suivi de la cinétique d'absorption (protocole décrit par la suite).

L'immersion a été réalisée en 2 temps pour certains essais, lorsqu'un suivi de la cinétique d'absorption était effectué : saturation par immersion dans un panier suspendu selon la méthode du suivi de la cinétique décrit par la suite puis transfert dans un récipient de volume défini pour détermination des valeurs caractéristiques.

Adaptation du protocole de séchage saturé surface sèche

Le protocole de séchage de surface décrit dans la norme afin d'atteindre l'état saturé surface sèche a été modifié, pour les sables comme pour les éléments plus grossiers, de façon à détériorer le moins possible le granulat recyclé (perte des éléments fins et arrachement du mortier accolé).

Pour les sables

La norme indique d'exposer les granulats à un faible courant d'air chaud pour évaporer l'humidité en surface et obtenir cet état.

Pour s'assurer que le séchage de surface est atteint, les granulats sont disposés dans un moule tronconique avec un léger tassement ; le moule est soulevé délicatement. Si le cône de granulats ne s'effondre pas, il faut poursuivre le séchage et recommencer l'essai jusqu'à ce que le cône s'effondre une fois le moule retiré (Figure 24).

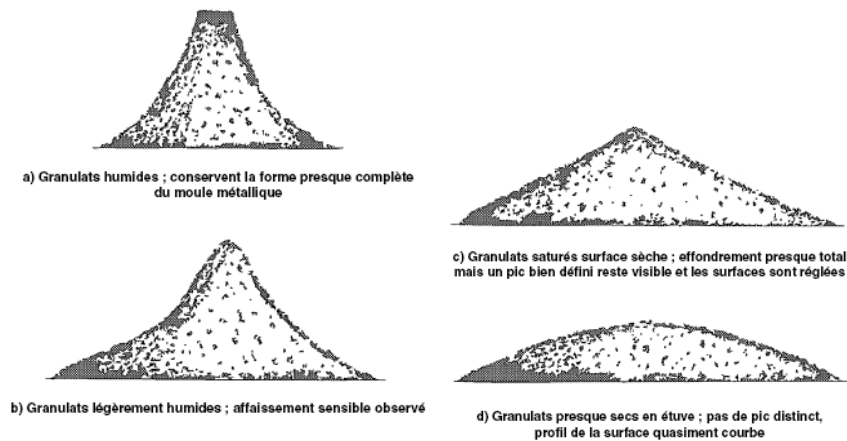


Figure 24 Détermination visuelle de l'état saturé surface sèche

Concernant les granulats recyclés, la difficulté d'obtention d'un état saturé surface sèche réside dans la conservation des éléments fins. En effet, des éléments peuvent être entraînés par le courant d'air chaud.

Il a donc été nécessaire de proposer une solution alternative au courant d'air chaud. L'utilisation de lampes à infra rouge d'une puissance de 450 Watts a été choisie.



Figure 25 Dispositif de séchage utilisé pour les sables

Pour les gravillons et graviers

Dans le cas des gravillons et graviers, l'état saturé surface sèche est obtenu selon la norme par frottement doux des granulats sur un chiffon sec. Cette opération manuelle est susceptible d'entraîner un détachement partiel du mortier accolé et ainsi de modifier la mesure. Des adaptations ont été ainsi recherchées. Dans un premier temps, le chiffon sec a été tendu sur un cadre pour limiter le frottement manuel. Bien que permettant une amélioration notable, ce protocole n'est néanmoins pas optimal. Des particules de mortier restaient accrochées au tissu.

Un dispositif de "tube absorbant" a alors été développé. Ce dispositif est constitué d'une goulotte inclinée et recouverte de fibres absorbantes à travers lesquelles les granulats se déplacent. (Figure 26).

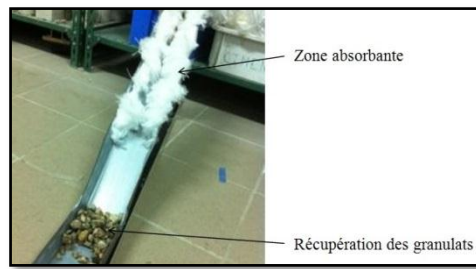


Figure 26 : méthode du tube absorbant

Suivi de la cinétique d'absorption

Les essais ont été réalisés avec un dispositif de pesée hydrostatique dans un panier en treillis tel que décrit dans l'article 7 de la norme NF EN 1097-6 (Afnor, Norme NF EN 1097-6, 2001) et représenté Figure 27. Le relevé des mesures est fait à l'aide d'une balance de capacité 5100 g et de précision 0,1 g permettant un enregistrement à intervalles de temps réguliers des valeurs.



Figure 27 Pesée hydrostatique

Les échantillons préalablement séchés sont placés dans un récipient perforé (panier à treillis ou seau perforé) relié au plateau de la balance et immergé dans l'eau. Les échantillons sont agités après une demi-heure d'immersion pour faciliter l'évacuation des bulles d'air. Des récipients différents ont été utilisés selon les classes granulaires sable, gravillon ou graviers. (voir Figure 28). Pour le choix de ces récipients, il était nécessaire de trouver un compromis entre vitesse de remplissage et non perte des éléments fins. Ainsi pour les essais réalisés sur sable, le seau ne comporte que peu d'ouvertures et le temps de remplissage du seau ne permet pas d'exploiter les premières mesures, le système n'étant pas équilibré.



Figure 28. Récipients pour les pesées hydrostatiques

Quelques essais préliminaires ont été réalisés par relevé manuel des valeurs de pesée hydrostatique sur une balance de $1200 \text{ g} \pm 0,01 \text{ g}$ avant utilisation du système d'enregistrement.

La stabilisation de la valeur affichée est considérée comme significative dès l'atteinte d'un état saturé des granulats et le temps de saturation est ainsi déterminé. Ce point sera discuté lors de l'analyse des résultats.

Le coefficient d'absorption au cours de l'essai déterminé par pesée hydrostatique est calculé selon :

$$W_i = \frac{M_{Li} - (M_{abs} - M_{Lsat})}{M_s}$$

Équation 3: Coefficient d'absorption d'eau déterminé par pesée hydrostatique

- Coefficient d'absorption au temps i (W_i) [%] ;
- Valeur pesée lue sur la balance (M_{Li}) [g] ;
- Valeur finale lue sur la balance à saturation (M_{Lsat})
- Masse d'eau absorbable ($M_{abs} = W_{sat} - M_s$)
- Coefficient d'absorption déterminé en fin d'essai a posteriori (W_{sat}) [%] ;
- Masse du granulat sec (M_s) [g] ;

En effet la valeur de pesée lue à instant initial n'est pas exploitable pour les raisons évoquées précédemment : $M_{Lini} = M_{abs} - M_{Lsat}$

Les essais ont été réalisés sur sables, gravillons et graviers des granulats GR2, GR4, GNC et GNR. Les conditions de réalisation sont rappelées annexe 4.

Masses volumiques absolues et réelles

Les masses volumiques absolues et réelles (Figure 29) sont déterminées selon la norme NF EN 1097-6 (Afnor, Norme NF EN 1097-6, 2001) avec prise en compte des adaptations définies précédemment.

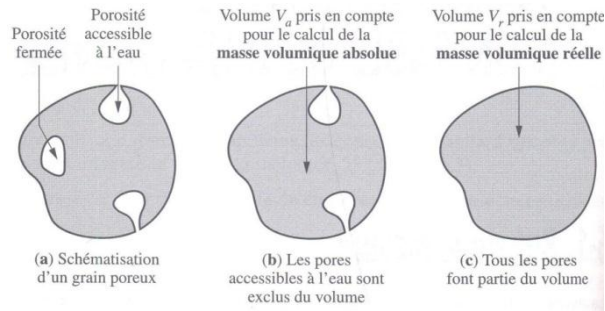


Figure 29 : Prise en compte du volume d'un grain dans la détermination de la masse volumique réelle et absolue selon Dupain et al.,(Dupain and Saint-Arroman, 2009)

Elles sont calculées selon :

$$\rho_a = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

Équation 4: Masse volumique absolue

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

Équation 5: Masse volumique réelle saturée à surface sèche

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

Équation 6: Masse volumique réelle après séchage à l'étuve

- Masse dans l'air des granulats saturés et superficiellement secs (M_1) [g] ;
- Masse du pycnomètre contenant l'échantillon de granulats saturés (M_2) [g] ;
- Masse du pycnomètre rempli d'eau uniquement (M_3) [g] ;
- Masse dans l'air de la prise d'essai séchée à l'étuve (M_4) [g] ;



Figure 30 : Pycnomètre pour détermination des masses volumiques

Rappel : Un tableau récapitulatif des conditions de réalisation pour chacun des lots analysés est donné en annexe 4.

1.2.2.3 Masses volumiques absolue des éléments fins

Un essai de détermination de la masse volumique absolue des éléments fins a été réalisé au pycnomètre d'une capacité de 500 ml. Le prélèvement séché, de masse minimale 50 g, a été introduit dans le pycnomètre contenant un volume (V_1) d'un liquide approprié ne pouvant ni dissoudre ni réagir avec le prélèvement (éthanol). Après avoir chassé les bulles d'air, le

mélange a été laissé au repos avant d'effectuer une nouvelle lecture du volume noté V_2 . La masse volumique absolue, exprimée en g/cm^3 , est le quotient de la masse introduite et de la différence de volume (V_2-V_1).



Cet essai décrit dans la norme NF EN 1097-7 (Afnor, Norme NF EN 1097-7, 2008) pour les ciments a été réalisé sur 3 prélèvements pour les fractions $0/100 \mu\text{m}$, $0/315 \mu\text{m}$ et $0/500 \mu\text{m}$ des lots GNC-1, GR 1, GR 2, GR 3, GR 4-1 et GR 5.

1.2.2.4 Teneur en eau

Cet essai est réalisé sur chacune des classes granulométriques de tous les lots étudiés (Afnor, Norme NF EN 1097-5, 2008). Un prélèvement de masse M_1 est mis à l'étuve à une température de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ pour les granulats naturels et $65 \pm 5^\circ\text{C}$ pour les granulats recyclés. Le temps de séchage à l'étuve correspond à l'obtention d'une différence de masse constante ($\pm 0,1 \%$) entre deux pesées consécutives. La teneur en eau (W) est calculée sur 3 tests par lots.

1.2.2.5 Désorption thermique

Cet essai vise à suivre la cinétique de désorption des granulats soumis à une température de 60°C . Les granulats saturés en eau et après égouttage pendant 3 minutes sont soumis à une température de 60°C . Un suivi de l'évolution de leur masse est effectué à l'aide d'une balance avec acquisition de données jusqu'à stabilisation.

La désorption en fonction du temps est ensuite déterminée chaque instant est obtenue par :

$$dw_i = \frac{(W_i - W_{ini-sat})}{W_{ini-sat}} * 100$$

Équation 7 : Calcul de la désorption instantanée

W_i = Teneur en eau à l'instant i

$W_{ini-sat}$ = Teneur en eau à saturation à l'instant initial

3 tests ont été effectués sur chaque fraction des granulats GR 2 ; GR 4-1, GR 4-2, GR 6, GNC-1 et GNR.

1.2.3 Analyse des caractéristiques mécaniques

Les propriétés mécaniques de résistance à la fragmentation et à l'usure ont été déterminées par la réalisation d'essais Micro Deval et Los Angeles selon les normes NF EN 1097-1 (Afnor,

Norme NF EN 1097-1, 2011) et NF EN 1097-2 (Afnor, Norme NF EN 1097-2, 2010) sur les fractions 10/14 mm des granulats.

Ces essais respectifs consistent à introduire une quantité définie de matériaux préalablement séchés dans le tambour de l'essai Los Angeles et dans la jarre de l'essai Micro Deval. Après rotation des systèmes les granulats sont récupérés et tamisés à 1,6 mm. Les coefficients micro Deval et Los Angeles sont obtenus selon :

- Micro Deval (M_{DE})

$$M_{DE} = \frac{\text{masse passant}}{\text{masse initiale}} \times 100$$

Équation 8 : Coefficient Micro deval (Afnor, Norme NF EN 1097-1, 2011)

- Los Angeles (LA)

$$LA = \frac{\text{masse passant}}{\text{masse initiale}} \times 100$$

Équation 9 : Coefficient Los Angeles (Afnor, Norme NF EN 1097-2, 2010)

La prise d'essai est de 500 g pour l'essai micro Deval et 5000 g pour l'essai Los Angeles.

Les lots GR 2, GR 4-2, GNC-1 et GNR ont été testés. 3 tests par lots ont été effectués pour les essais Los Angeles et 2 tests pour les essais Micro Deval.

1.2.4 Propreté, réactivité et constitution

1.2.4.1 Propreté et potentiel polluant

Classification des gravillons

Les recommandations de la norme NF EN 206-1 (Afnor, Norme NF EN 206-1, 2014) relatives à l'utilisation des gravillons recyclés fixent le pourcentage maximal de remplacement des gravillons dans un béton de granulats recyclés en fonction de la classe d'exposition et de leur catégorie déterminée à partir des essais de classification définis dans la norme NF EN 933-11 (Afnor, Norme NF EN 933-11, 2009).

Les granulats GR 1 à GR 4 ont été analysés et classés selon cette norme.

Propreté des sables

La propreté des granulats et plus particulièrement des sables (ou éléments fins) peut être évaluée de plusieurs façons :

- Par la teneur en fines, déterminée lors de l'analyse granulométrique. Cependant cette mesure ne permet pas de déterminer la nature des fines (silico calcaires, argileuses ou autre) ;

- Par l'essai d'équivalent de sable qui permet de quantifier la propreté d'un sable au regard de la proportion d'éléments flottants, il est réalisé selon la norme NF EN 933-8 (Afnor, Norme NF EN 933-8, 1999);
- Par l'essai au bleu de méthylène qui permet d'évaluer le potentiel de réaction gonflante des particules fines argileuses, il est réalisé selon la norme NF EN 933-9 (Afnor, Norme NF EN 933-9, 2009).

Au sens des normes en vigueur, l'analyse de la propreté des sables consiste à déterminer la proportion d'éléments fins susceptibles de créer des désordres dans le béton, en l'occurrence les particules argileuses. La pertinence de ces essais pour qualifier la propreté des sables sera discutée lors de la présentation des résultats.

Essai d'équivalent de sable : Cet essai a été réalisé selon la norme NF EN 933-8 (Afnor, Norme NF EN 933-8, 1999) sur des échantillons de la fraction 0/2 mm. L'échantillon est préparé selon la norme NF EN 933-1 (Afnor, Norme NF EN 933-1, 1997). Il consiste à séparer les particules de la fraction 0/2 mm contenues dans le matériau des éléments sableux plus grossiers. Ensuite, on lave l'échantillon selon un processus normalisé NF EN 933-8 (Afnor, Norme NF EN 933-8, 1999), et on laisse reposer le tout. Après 20 minutes, on effectue les mesures des éléments suivants :

- hauteur h_1 : sable propre + éléments fins
- hauteur h_2 : sable propre seulement

On en déduit l'équivalent de sable (ES) qui par convention, est:

$$ES = 100 * \frac{h_2}{h_1}$$

Équation 10 : Equivalent de sable

3 tests ont été réalisés sur chacun des lots suivants : GNR, GNC-1, GR 1, GR 2, GR 3 et GR 4-1.

Essai au bleu de méthylène : Réalisé sur les fractions 0/2 mm, le test au bleu de méthylène est effectué selon la norme NF EN 933-9 (Afnor, Norme NF EN 933-9, 2009). Des échantillons de fraction 0/2 mm ont été préparés selon la norme EN 933-1 (Afnor, Norme NF EN 933-1, 1997). Ce test est effectué dans le but de déterminer la présence des argiles de type gonflantes telles que la montmorillonite. Des doses de 5 ml de solution de bleu de méthylène sont ajoutées successivement dans une suspension de prélèvement (200g) dans de l'eau (500ml) et, à chaque ajout de dose, un test d'adsorption de bleu par le prélèvement est fait en effectuant un test à tâche sur du papier filtre pour déceler la présence de colorant libre. Lorsque le colorant diffuse, la valeur du bleu de méthylène est calculée et exprime la quantité de colorant adsorbée par kg de la fraction granulaire testée.

3 tests ont été réalisés sur chacun des lots suivants : GNR, GNC-1, GR 1, GR 2, GR 3 et GR4-1.

1.2.4.2 Réactivité à l'eau

La majeure partie des essais décrits dans ce paragraphe a été réalisée dans le cadre d'un travail de master de M. Cristian Constantin Mihalcea.

La détection d'une réactivité à l'eau des matériaux d'étude (granulats et des éléments fins) a été réalisée à partir de deux essais. Ces deux essais sont habituellement effectués sur pâte de ciment ou mortier pour caractériser les ciments.

- Un essai de prise sur les fractions 0/500 μm réalisé selon le protocole décrit dans la norme NF EN 196-3 (Afnor, Norme NF EN 196-3, 1995) :

Pour cet essai les fines ont été mélangées à l'eau avec un rapport massique eau/fines compris entre 0,3 et 0,4 permettant d'obtenir une consistance normale. Des mélanges « fines recyclées + ciment » (rapport fines/ciment = 0,66) ont été testés afin d'évaluer l'influence de cette réactivité à l'eau potentielle des éléments recyclés sur la cinétique d'hydratation du ciment.

- Un essai de détermination de la chaleur d'hydratation réalisé selon le protocole décrit dans la norme NF EN 196-9 (Afnor, NF EN 196-9, 2010) , méthode semi-adiabatique :

Pour cet essai les sables et gravillons où les gravillons seuls ont été mélangés à de l'eau de façon à remplir la boîte à mortier du calorimètre de Langavant.

L'ensemble des lots a été testé, y compris le GR7 issu du broyage d'un mortier jeune pour lequel un potentiel réactif plus élevé est supposé. Un lot appelé GR7-4 a été fabriqué, il est constitué du granulats GR4 auquel une fraction granulaire a été substituée par du GR7 (supposé réactif car constitué de mortier jeune).

Un tableau récapitulatif des lots testés pour les essais de prise et de chaleur d'hydratation est donné Tableau 25 et Tableau 26.

Tableau 25 : Récapitulatif des lots testés pour les essais de prise

Lot		Fraction	Quantité par fraction [g]	Eau [g]
GR 1 ; GR 2 ; GR 4-1 ; GR 3 ; GR 5		0/500 μm	438	140
GR 1 ; GR 2 ; GR 4-2 ; GR 3 ; GR 5 ; GR 7-0		0/500 μm	300	120
GR 5 ; GR 6 ; GR 7		0/100 μm	130	52
GR7-4100	GR 4-2	100/500 μm	252	120
	GR 7	0/100 μm	48	

Tableau 26 : Récapitulatif des lots testés pour les essais au Langavant

Lot		Fraction	Quantité par fraction [g]	Eau [g]	Ciment [g]
GR 1 ; GR 2 ; GR 3 ; GR 4-1 et GR 4-2 ; GR 5 ; GR 7-0		Sable	525	140	0
		gravillons	525		
GR7-4 ₅₀₀	GR 4-2	500 μm /4 mm	393	120	0
		4/10 mm	525		
	GR 7	0/500 μm	132		

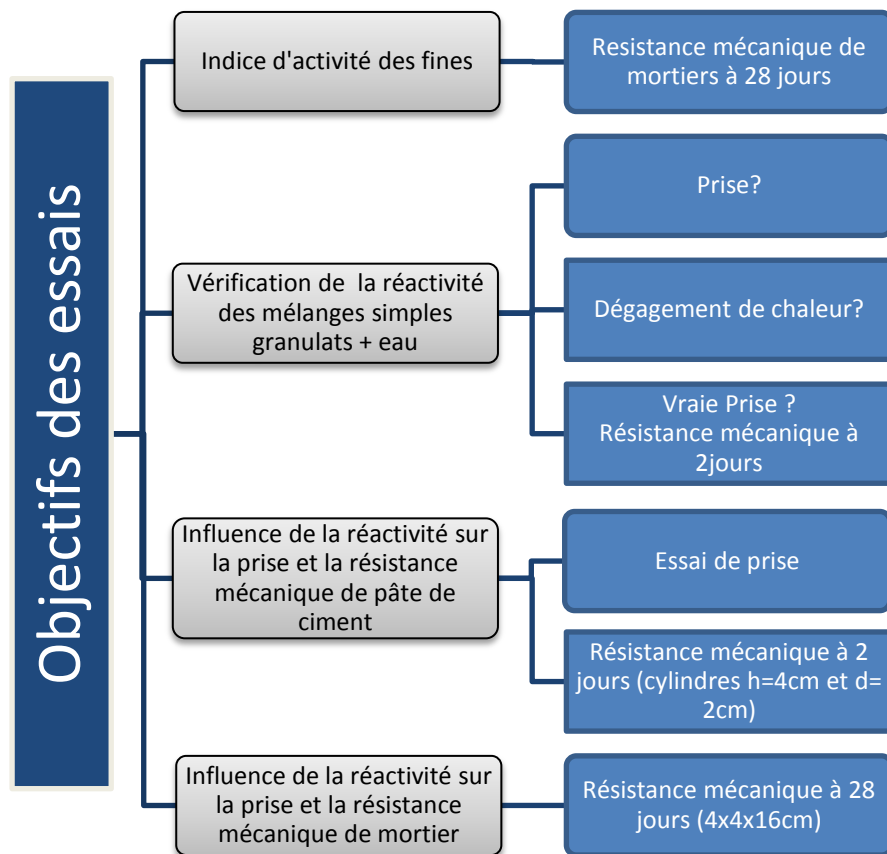
L'évaluation de cette réactivité a été faite par la réalisation, pour les échantillons ayant présenté une prise, d'un essai de résistance mécanique en compression à 10 jours sur un mélange – fines+eau –. (*fines 0/500 μm ; rapport eau/phase solide = 0,4*). Les éprouvettes sont cylindriques et ont pour dimensions $h = 4\text{cm}$; $d = 2\text{cm}$.

L'influence de cette réactivité des éléments fins ou plus grossiers sur les propriétés des pâtes de ciment ou mortier a été étudiée.

- **L'influence sur la cinétique de prise et de durcissement d'une pâte de ciment** a été étudiée par la réalisation de pâte pour laquelle le ciment a été substitué par les fines « réactives à l'eau » dans un rapport 40%F et 60%C. Des essais de prise et résistances mécaniques sont ensuite été réalisés à 2 jours sur ces mélanges. (*fines 0/500 μm ; rapport eau/phase solide = 0,4*). Les éprouvettes sont cylindriques et ont pour dimensions $h = 4\text{cm}$; $d = 2\text{cm}$.
- **L'influence sur la réactivité exothermique d'un mortier** a été étudiée par la comparaison de la chaleur d'hydratation de mortiers témoins (0/2mm) réalisés avec du sable naturel (GNC) avec celle de mortiers réalisés avec des granulats recyclés non réactifs et réactifs (GR4 et GR6).
- **L'influence sur la résistance mécanique d'un mortier aussi appelée détermination de l'indice d'activité i_{28}** a été étudiée. Des mortiers 0/2mm sont fabriqués pour lesquels des taux de substitutions du ciment (par des fines 0/100 μm) défini en fonction du type d'additions (calcaires ou siliceuses) selon les normes NF P 18-508 (Afnor, NF P 18-508, 1995) et NF P 18-509 (Afnor, NF P 18-509, 1998) sont effectués. Ces essais ont été réalisés avec les fines de GR1, GR5 et GR7.

L'indice d'activité « i » est défini comme étant le rapport des résistances en compression à 28 jours entre un mortier où l'addition en substitution du ciment (en masse) et un mortier normalisé de référence sans addition. Le taux de substitution du ciment est de 50% pour les laitiers de haut fourneau et de 25% pour les additions calcaires et siliceuses. On supposera que les fines recyclées sont assimilables à des additions calcaires ou siliceuses et le taux de 25% de substitution est appliqué.

La démarche expérimentale de l'étude de cette réactivité est synthétisée ici :



1.2.4.3 Constitution : Détermination de la quantité de mortier

Deux méthodes ont été testées et/ou développées pour estimer la teneur en mortier des granulats recyclés :

- chimique à l'acide chlorhydrique
- adaptée d'un essai Micro Deval

Ces deux méthodes sont basées sur la séparation du mortier et des granulats du béton parent. La teneur en mortier est ensuite calculée par méthode indirecte. Un calcul de perte de masse directe n'est pas possible, le granulat parent étant lui-même utilisé par l'essai, la perte de matière ne peut donc pas être attribuée uniquement à l'enlèvement du mortier.

Ainsi il est fait une détermination des masses volumiques :

- des granulats recyclés avant traitement
- des granulats recyclés après traitement supposés exempts de mortier (« granulats parents »)
- du mortier résiduel.

La proportion de la quantité de mortier se calcule par détermination des rapports massiques et volumiques de mortier/granulat recyclé. La masse volumique du matériau accolé résiduel (mortier) est estimée suite à la fabrication de matériaux référents. La fiabilité de la méthode est évaluée par comparaison des masses volumiques des granulats parents lorsqu'elle est connue

et des granulats recyclés après traitement (cas des GR5 et GR6). Des indices de corrélation et de taux d'efficacité sont ainsi calculés.

Séparation chimique du mortier à l'acide

Elle consiste à séparer le mortier des granulats recyclés par dégradation de la matrice cimentaire avec une solution d'acide chlorhydrique. Les résultats d'essais réalisés (Guillemain and Ramahandry, 2014) avec le granulat GR4-1 (4/10 mm) lors d'une étude préliminaire de validation de la méthode seront présentés par la suite bien que cette méthode n'ait pas été retenue pour la détermination de la teneur en mortier par manque de fiabilité.

Méthodologie de l'essai mécanique au Micro Deval

Cette méthode est basée sur l'essai de Micro Deval (EN 1097-1 (Afnor, Norme NF EN 1097-1, 2011)) à sec et sous eau et vise à user le mortier accolé. Différents temps d'usure ont été appliqués sur les lots 4/10 mm et 10/14 des lots GR 2, GR 6 et GR 4-1.

A l'issue de ces essais, des mesures successives de masses volumiques et de coefficient d'absorption sont effectuées selon les protocoles décrits précédemment. Les étapes successives sont les suivantes :

- Les granulats sont passés sous eau au tamis de 63 μm .
- Après séchage, les granulats sont tamisés à 1,6 mm avant une nouvelle mesure.
- Le matériau est à nouveau séché et tamisé à 4 mm avant une dernière mesure.

Un suivi de l'évolution des masses volumiques (à chaque étape) de 10 à 120 minutes de traitement permet d'optimiser l'obtention d'un granulat exempt de mortier accolé.

1.3 Conclusion

Les granulats recyclés ont la particularité d'être composés pour partie de mortier. Afin d'être considérés comme granulats pour bétons, leurs caractérisations sont faites. Des méthodes de caractérisations généralement appliquées sur les granulats naturels sont utilisées, néanmoins certaines sont modifiées pour être adaptées aux granulats recyclés. Les méthodes utilisées pour chacun des lots de granulats ont été récapitulées en Annexe 5 ainsi que celles qui ont été adaptées.

2 Résultats

2.1 Analyses dimensionnelles

2.1.1 Etudes granulométriques

Les granulats GR1-GR2-GR3 livrés ont une classe granulaire 0/20mm. Le granulat GR5 a été fabriqué en laboratoire sur une classe 0/20 mm

Les classes granulaires livrées du GNR sont 0/4-4/8-8/16. Celles du GNC sont 0/4-4/10-6.5/20. Celles du GR4 sont 0/4-4/10-10/20.

La dispersion des résultats pour les analyses granulométriques par tamisage, vérifiée pour chacun des lots, est faible. En exemple, cette dispersion pour les lots GNC et GR4 (lots utilisés pour la fabrication des bétons par la suite) est représentée ci-dessous Figure 31

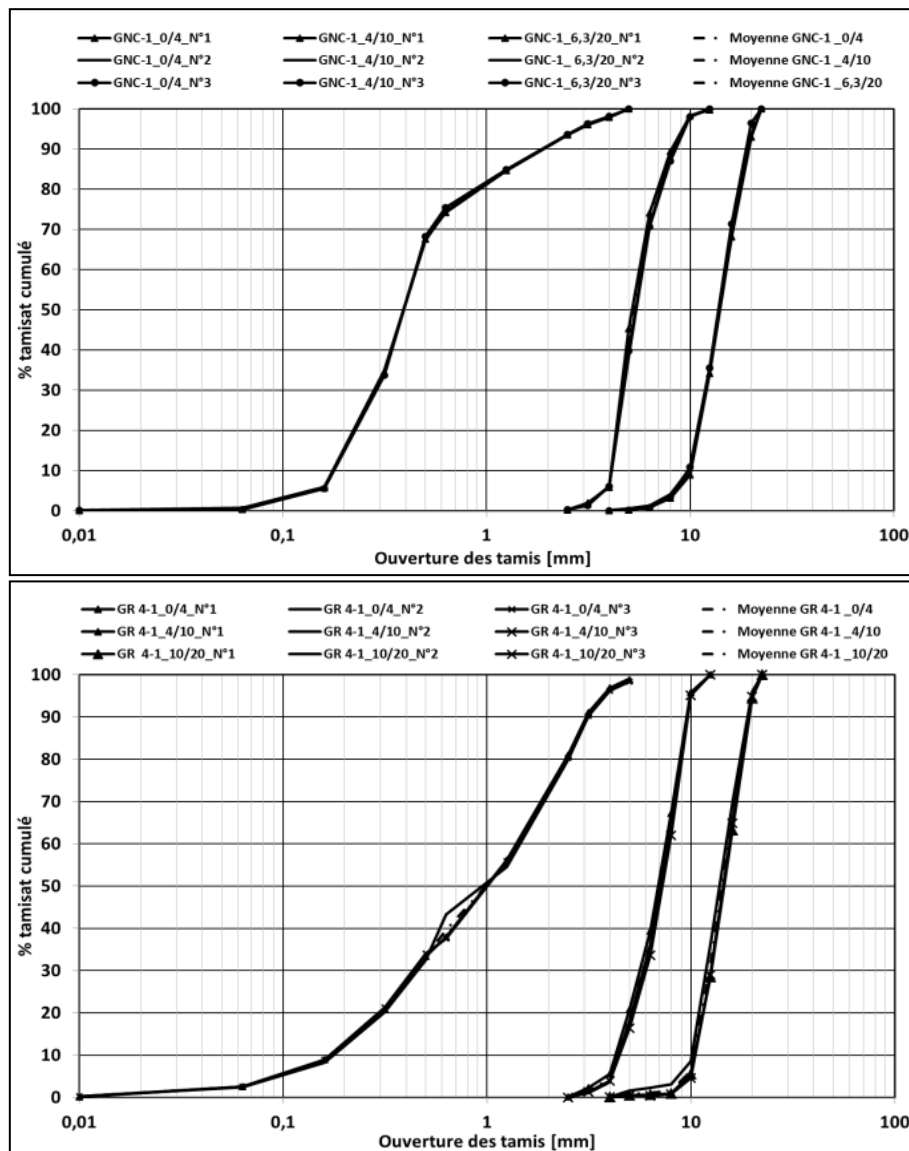


Figure 31 Dispersion des analyses granulométriques pour les lots GNC et GR4 sur les classes livrées

Plusieurs coupes ont été réalisées sur ces matériaux pour correspondre aux classes granulaires des autres matériaux livrés : 0/4-4/8-8/16. Ainsi, des coupures sur les courbes granulométriques des GR4 et GNC ont été effectuées à 8 et 16 mm. Les courbes granulométriques représentées sont des courbes moyennes réalisées à partir de 3 essais. (Figure 32)

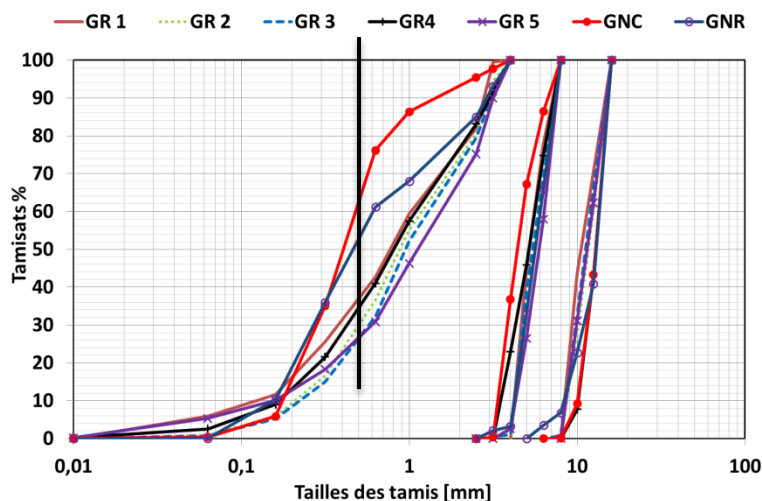


Figure 32 courbe granulométriques classes 0/4-4/8-8/16 mm – coupures à 8 et 16 mm

Les courbes granulométriques des granulats naturels et recyclés ne présentent pas de différence notable pour les gravillons et graviers. Une différence est observée au niveau de la fraction sableuse où les sables recyclés sont plus grossiers que les sables naturels (Figure 32).

De cette courbe granulométrique obtenue par tamisage (0/4 mm), les valeurs des passants à 2mm, 1mm, 500 µm, et 63 µm ont été extraites.

Tableau 27: Teneurs en éléments fins des sables

	0/0,063 mm (%)	0/0,500 mm (%)	0/1 mm (%)	0/2 mm (%)
GR 1	7,5	37,2	52	75
GR 2	0,85 ± 0,08	30,48 ± 3,38	49,17 ± 6,01	72,33 ± 6,11
GR 3	0,80 ± 0,27	27,37 ± 2,87	45,67 ± 3,51	70,33 ± 2,89
GR 4-1	2,48 ± 0,11	33,33 ± 0,74	47,58 ± 1,18	67,96 ± 0,68
GR 5	5,04	26,36	40	64,5
Moyenne	3,33 ± 2,89	30,95 ± 4,44	47,5 ± 4,83	71,3 ± 4,06
GNC -1	0,39 ± 0,28	67,74 ± 0,51	79,66 ± 0,43	89,11 ± 0,15
GNR	0,5	51,5	66,5	79

La fiabilité de détermination de la quantité et de la distribution des éléments fins inférieurs à 63 µm, à partir de l'analyse par tamisage, pouvant être sujette à discussion pour les granulats recyclés (réactivité à l'humidité des éléments fins,....) ; une analyse complémentaire a été réalisée par laser sur fraction 0/500 µm et 0/100 µm.

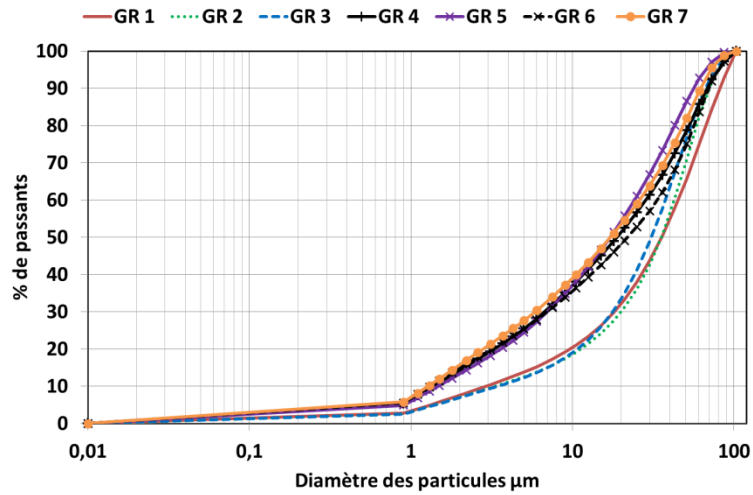


Figure 33 Granulométrie laser, Fraction 0/100µm

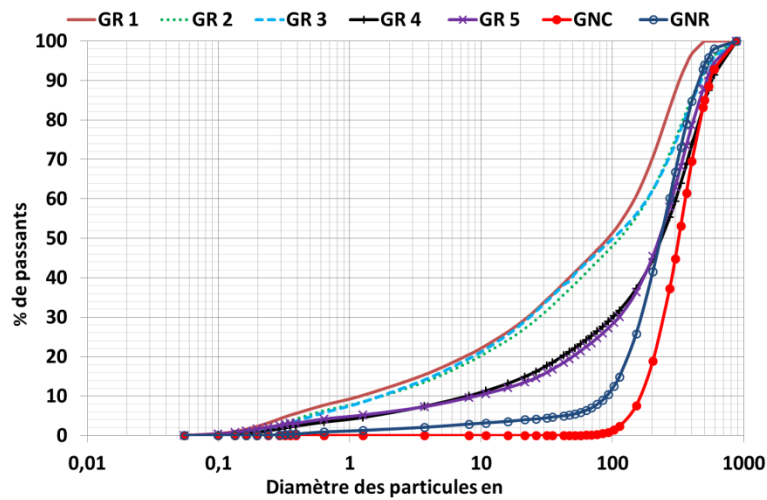


Figure 34 Granulométrie laser, Fraction 0/500µm

Les valeurs à 500 µm issues de l'analyse par tamisage ont été utilisées pour le recalage des courbes granulométriques expérimentales au laser 0-500 µm.

Tableau 28 passants à 500 µm (%) des sables 0/4 mm

GR 1	GR 2	GR 3	GR 4	GR 5	GNC	GNR
37,20	30,48	27,37	33,33	26,36	67,74	51,50

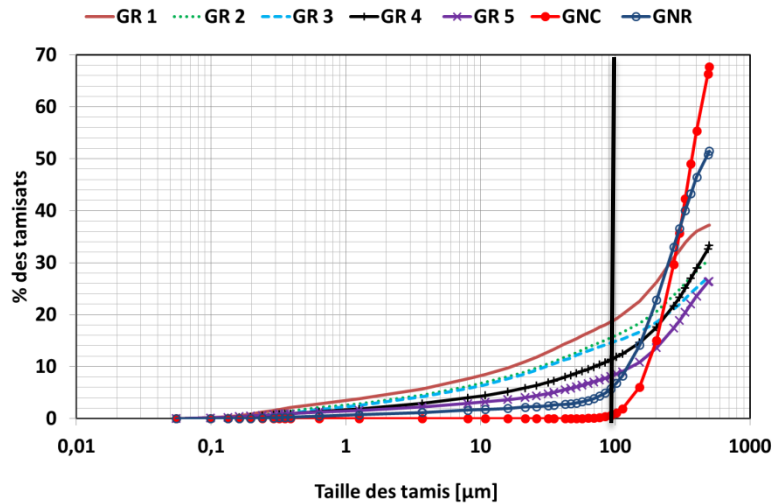


Figure 35 Granulométrie 0-500 µm des sables 0/4 mm

De même, de cette nouvelle courbe granulométrique obtenue par analyse laser (Figure 35), les valeurs des passants à 100 µm ont été extraites, puis appliquées sur les courbes granulométriques expérimentales au laser 0-100 µm.

Tableau 29 passants à 100 µm (%) des sables 0/4 mm

GR 1	GR 2	GR 3	GR 4	GR 5	GNC	GNR
19,27	16,04	14,93	11,88	8,57	1,12	6,85

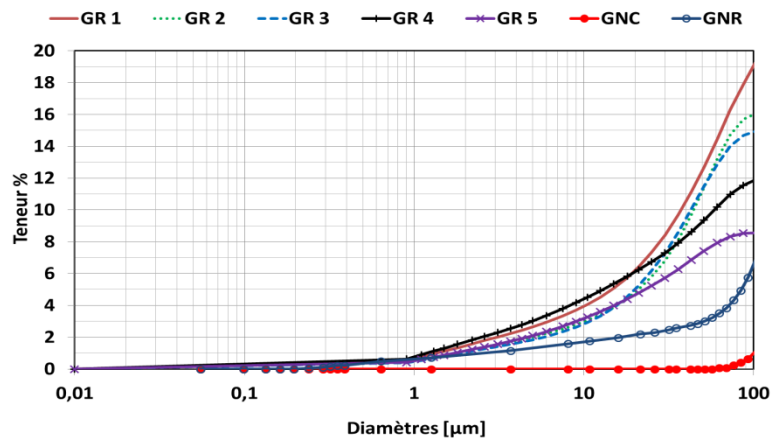


Figure 36 Granulométrie 0-100 µm

Ainsi la quantité d'éléments fins inférieurs à 63µm est obtenue. (Tableau 30)

Tableau 30 passants à 63 µm (%) des sables 0/4 mm

	GR 1	GR 2	GR 3	GR 4	GR 5	GNC	GNR
Analyses successives (laser ->100µm)	14,46	13,22	12,89	10,19	7,95	-	-
Analyses (laser -> 500µm)	14,77	15,24	14,56	10,32	8,01	0,08	3,51
Analyse tamisage	7,5	0,85	0,80	2,48	5,04	0,39 Non Significatif	0,5

L'analyse successive des courbes granulométriques obtenues par tamisage sur 0/4mm puis par diffraction laser sur 0/500 μ m et 0/100 μ m renseigne sur les teneurs en éléments fins des granulats (Tableau 30). Ainsi, les proportions d'éléments fins (< 63 μ m) contenus dans la fraction de sable 0/4 mm sont en moyenne 4 fois supérieures pour les granulats recyclés par rapport aux granulats naturels roulés. Les granulats naturels concassés ne contiennent presque plus d'éléments inférieurs à 63 μ m.

Il faut également noter que les proportions en éléments fins (< 63 μ m) obtenues à partir des essais aux granulomètres laser ne concordent pas totalement avec celles obtenues par tamisage. Les valeurs obtenues par analyse laser sont supérieures à celles obtenues par tamisage. Les résultats obtenus sur les 2 granulomètres laser sur des prélèvements différents sont eux concordants.

Les limites de l'analyse granulométrique pas tamisage sont ainsi atteintes pour l'utilisation des tamis inférieurs à 300 μ m, surtout avec l'utilisation de granulats potentiellement réactifs à l'eau (formation d'amalgames), une dispersion des grains est nécessaire.

L'étude comparative des variations sur plusieurs lots de matériaux recyclés montre que, au regard de l'analyse par tamisage, le lot fabriqué et broyé en laboratoire ne présente pas de différence notable comparée aux lots issus des plateformes (Figure 32) ; mais sur les 5 lots étudiés, la teneur en éléments fins (<63 μ m) dans la fraction de sable 0/4 mm présente une dispersion importante (Figure 36 et Tableau 30), cette dispersion est moindre lorsque l'analyse laser est utilisée (plus fiable).

Le module de finesse (Mf) tel que défini dans les normes permet de juger globalement de la finesse d'un sable. Un module de finesse élevé indique un sable grossier tandis qu'un module faible caractérise un sable fin. Les valeurs seuils sont définies dans les normes XP 18 540 et EN 12 620.

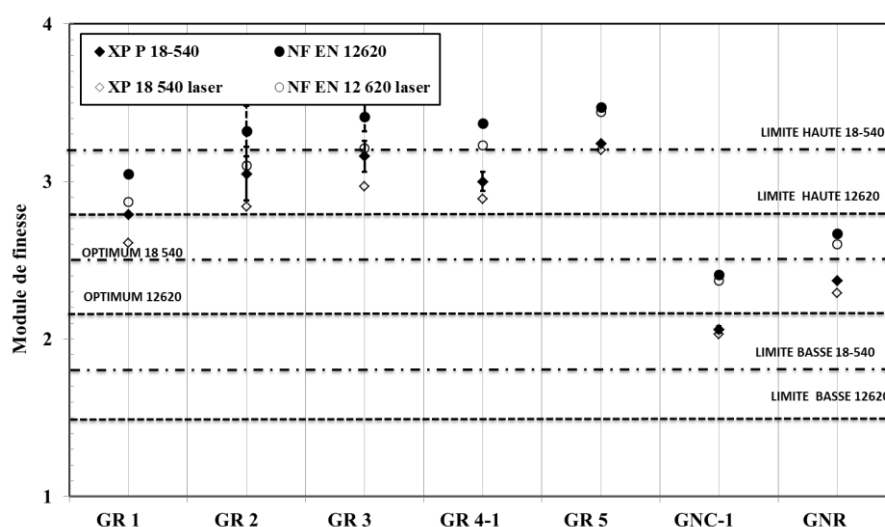


Figure 37 : Module de finesse selon les normes XP P 18 540 et NF EN 12 620

La norme XP P 18 540, tenant compte des caractéristiques des gisements, fixe les limites du module de finesse respectivement inférieures et supérieures à 1,8 et 3,2 mais l'optimum qui donnerait le meilleur compromis résistance-maniabilité-homogénéité du mélange se situe à $2,5 \pm 0,35$ environ. Les limites de la norme NF EN 12620 sont données **Tableau 31**, elles conduisent à la classification des sables.

Tableau 31 : Classement des sables selon le module de finesse NF EN 12620 (Afnor, Norme NF EN 12620, 2003)

Module de finesse selon la norme Française EN 12620		
CF : sable à gros grains	MF : sable à moyen grains	FF : sable à grains fins
4,0 à 2,4	2,8 à 1,5	2,1 à 0,6

Selon la norme XP P 18-540, les résultats de module de finesse des granulats recyclés (Figure 37) sont supérieurs à 2,5 pour le sable recyclé, ce qui indique que le sable renferme plus de matériaux grossiers que de matériaux fins. Tandis que les valeurs trouvées pour les sables naturels sont plus proches de l'optimum, le granulat concassé étant plus fin que le roulé.

Pour tous les granulats, les valeurs trouvées sont comprises entre 1,8 et 3,2, le sable peut être considéré comme sable à béton.

Selon la norme NF EN 12 620, les résultats de module de finesse des granulats recyclés (Figure 37) sont supérieurs à 2,8, ce qui indique que ce sable renferme plus de matériaux grossiers que de matériaux moyens voire fins. Les sables naturels présentent des valeurs comprises entre 1,5 et 2,8, ce qui indique que ces sables sont classés moyen.

Une analyse plus fine de ce module de finesse calculé à partir de l'analyse granulométrique successive (tamisage + laser) modère ces écarts entre granulats recyclés et granulats naturels (Figure 37). Ainsi, les valeurs obtenues pour les granulats naturels sont peu modifiées puisque contenant peu d'éléments fins non détectables par l'analyse par tamisage. Au contraire, les modules de finesse des granulats recyclés sont diminués par cette nouvelle méthode de calcul et même s'ils restent plus grossiers que les sables naturels, ils le sont dans une moindre mesure.

Cette classification des sables peut également être obtenue à partir du **pourcentage de passant au tamis 500 μm** . (Tableau 32)

Tableau 32 : Classement des sables selon le passant au tamis de 500 μm NF EN 12620 (Afnor, Norme NF EN 12620, 2003).

Passant à 500 μm		
CF : sable à gros grains	MF : sable à moyen grains	FF : sable à grains fins
5 à 45	30 à 70	55 à 100

Les conclusions sont les mêmes selon les résultats donnés Tableau 28 : les sables recyclés sont considérés comme grossiers et les sables naturels moyens à fins.

Au regard des deux modules de finesse calculés, le sable recyclé est un peu trop grossier (limite haute) ce qui confirme les résultats précédents de l'analyse granulométrique par tamisage et nécessiterait un concassage supplémentaire pour augmenter la quantité d'éléments fins.

Cependant pour conserver la maniabilité, il faut éviter, selon l'étude bibliographique, d'atteindre les 10 % de teneur pour la fraction 0/0,63 mm, valeur dépassée selon les résultats précédents.

Les résultats de détermination des coefficients d'uniformité et de courbure sont présentés Figure 38 pour les classes 0/4 mm, 4/8 mm, 8/16 mm.

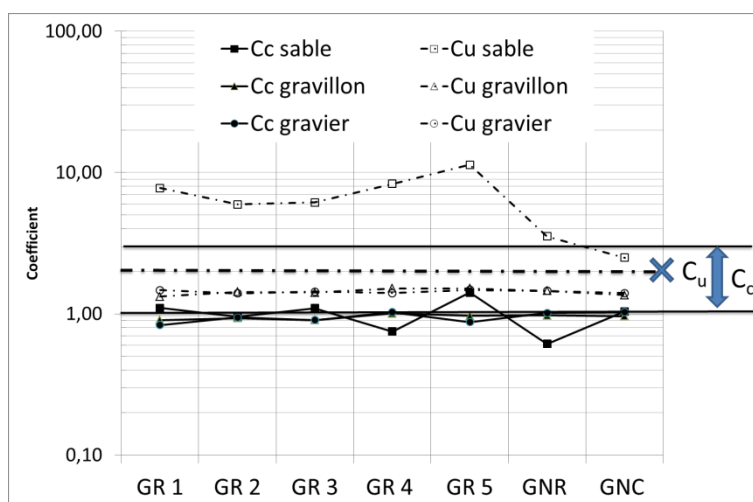


Figure 38 Coefficients de courbure et d'uniformité

Les données pour chaque essai et les valeurs de calculs (d_{10} , d_{30} , d_{60}) sont données en annexe 6.

Le sable naturel roulé présente une granulométrie « mal graduée » (au regard des applications géotechniques), puisque son coefficient de courbure C_c est inférieur à 1. Le sable recyclé GR4 présente également un coefficient de courbure légèrement inférieur à 1.

En ce qui concerne les autres granulats pour toutes les classes granulaires, le coefficient de courbure est soit supérieur à 1 (mais inférieur à 3), soit très légèrement inférieur. Les courbes peuvent donc être considérées comme bien graduées.

Les coefficients d'uniformité des gravillons et graviers sont tous inférieurs à 2, ce qui indique des granulométries serrées. Les coefficients d'uniformité des sables sont tous supérieurs à 2. Ils présentent donc une granulométrie étalée. Cependant le coefficient d'uniformité du sable naturel concassé est proche de 2 et celui du naturel roulé proche de 3,5, leur granulométrie est donc peu étalée comparée à celle des recyclés. Ces résultats sont à rapprocher des courbes granulométriques (présence d'une « bosse »).

Ces 2 critères habituellement utilisés en géotechnique donc sur matériaux préférentiellement concassés pourraient être intégrés aux méthodes de formulation des bétons lors de la constitution du squelette granulaire optimal (calcul sur le squelette 0/20mm) car c'est un critère qui différencie (au moins C_u) les sables recyclés des sables naturels.

De plus un nouveau calcul de ces coefficients en prenant en compte les valeurs d_{10} issues de l'analyse granulométrique successive (par tamisage + par laser) conduit aux valeurs C_c et C_u

ci-dessous (Figure 39) pour les sables. Ces valeurs deviennent discriminantes pour les sables recyclés car différenciées de celles des granulats naturels.

Remarque : les valeurs obtenues étant très différentes selon la prise en compte ou non de ces fines, les résultats sont présentés en échelle log.

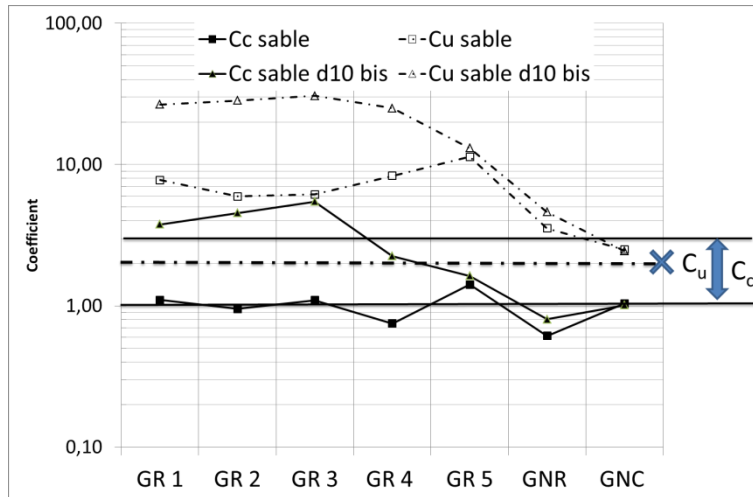


Figure 39 Coefficients de courbure et d'uniformité modifiés par d10 laser

En conclusion, les sables recyclés sont plus « grossiers » sur la plage 0-4 mm mais contiennent plus d'éléments fins inférieurs à 63 μm (et même 100 μm). Une analyse granulométrique spécifique aux éléments fins (laser ou sédimentométrie (Braymand et al., 2015a)) est indispensable en complément de l'analyse par tamisage afin d'obtenir des valeurs fiables de cette teneur et des déterminations plus exactes des modules de finesse. De plus, des critères complémentaires tels que le critère d'uniformité (avec prise en compte de l'analyse granulométrique des éléments fins) apportent une information supplémentaire qui peut être utile pour la constitution du squelette granulaire d'un béton car ce critère met en exergue la présence des éléments fins

2.1.2 Analyses géométriques et morphologiques

2.1.2.1 Surface spécifique des éléments fins

La détermination des surfaces spécifiques des éléments fins représentées Figure 40 conduit à ne valider l'adaptation du protocole Blaine, généralement utilisé sur ciment, que pour les fractions inférieures à 100 μm . Au-delà de cette taille, la porosité supposée de 0,5 ne peut être garantie et la méthode n'est pas discriminante pour les fines issues des différents granulats et l'hypothèse de particules sphériques n'est alors plus vérifiée.

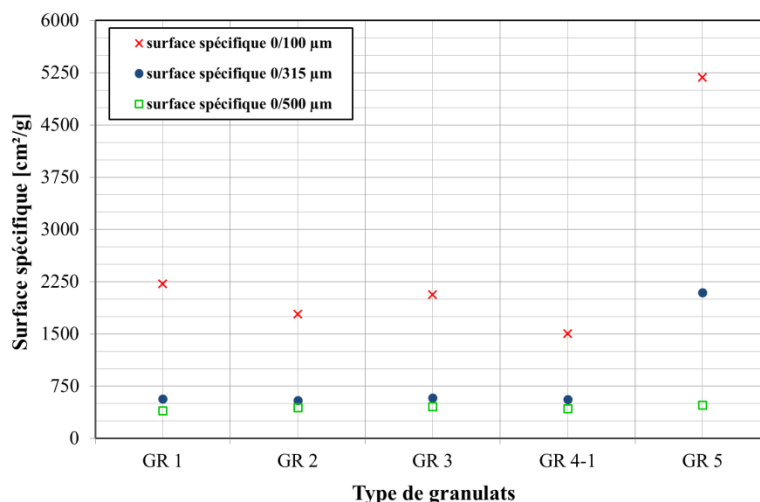


Figure 40 Surfaces spécifiques Blaine des éléments fins

L'analyse des surfaces spécifiques des éléments inférieurs à 100 µm est cohérente avec les résultats d'analyse granulométrique laser pour lesquels le GR5 est plus fin. La finesse du GR5 (fabriqué et broyé au laboratoire) est proche et même supérieure à celle d'un ciment.

2.1.2.2 Analyse géométriques et morphologies des éléments grossiers

Les résultats d'analyse géométrique et morphologique des granulats sont présentés figures Figure 46, Figure 47, Figure 50, Figure 51, Figure 53 et Figure 56.

Les valeurs statistiques des critères morphologiques calculées à partir des résultats obtenus sur 15 échantillons sont : la moyenne (avec l'écart type), la médiane, le maximum et le minimum. Les exploitations faites pour toutes les classes granulaires (entre 4 et 20mm) pour chaque lot sont données en annexe 7 sous forme de courbe de Gauss.

Ci-dessous en exemple, les 3 courbes de Gauss obtenues pour l'analyse du critère « aire » des grains des gravillons (Figure 41 à Figure 43) qui conduisent aux résultats synthétisés en Figure 44.

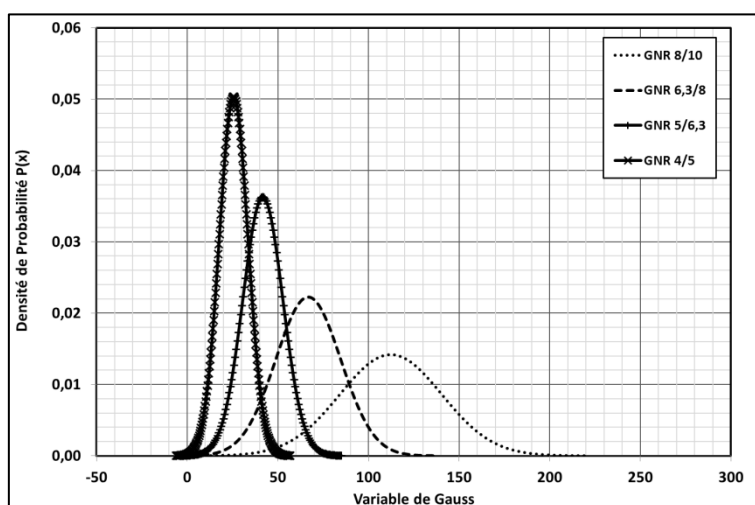


Figure 41 Etude statistique aire gravillon GNR

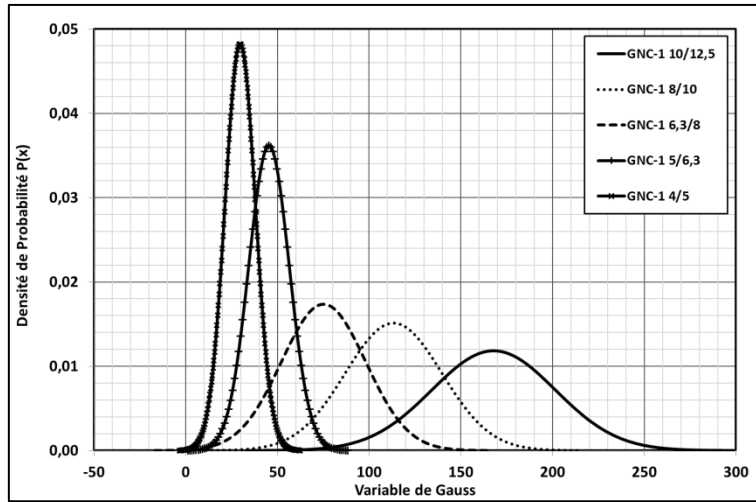


Figure 42 Etude statistique aire gravillon GNC

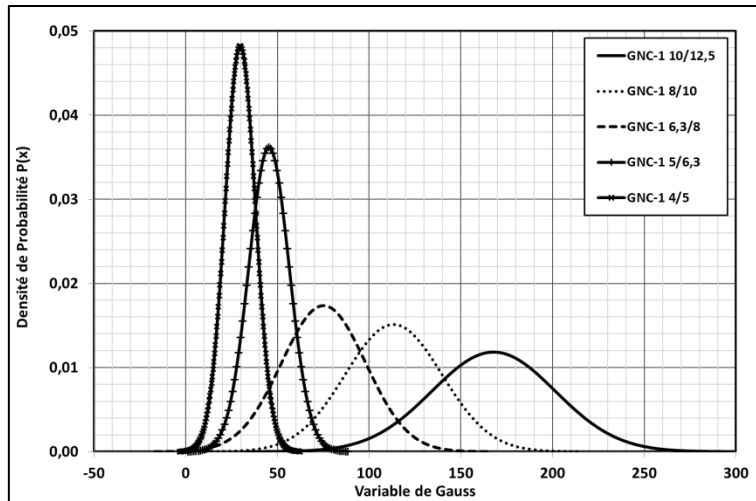


Figure 43 Etude statistique aire gravillon GR4

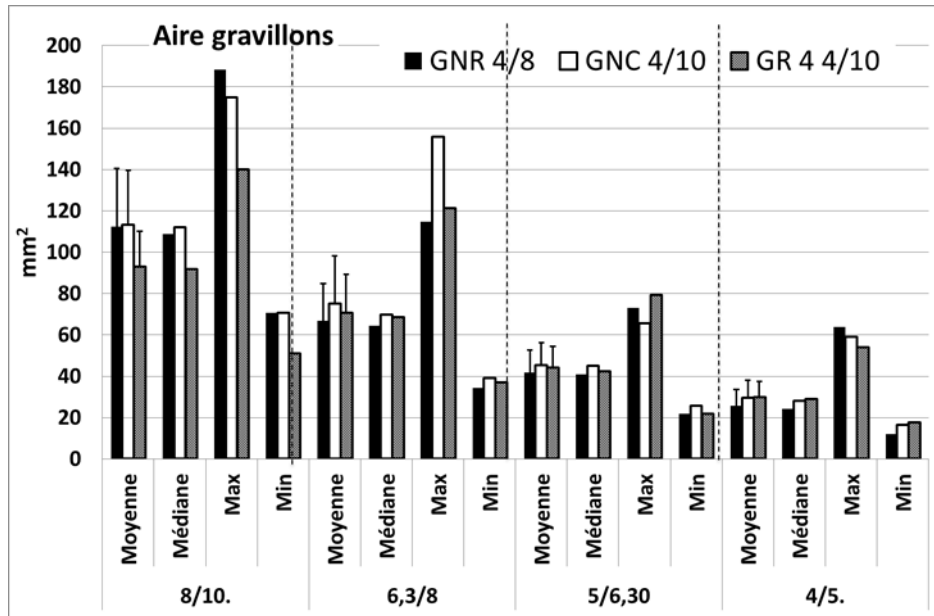


Figure 44 Etude statistique aire gravillons GNR, GNC, GR4

Longueur, Largeur, épaisseur et allongements.

Les mesures de longueurs, largeurs et épaisseurs faites au pied à coulisse et celles de diamètres de Féret maximum et minimum obtenues par analyse d'images sont du même ordre. (Figure 46 et Figure 47)

En effet les valeurs de longueur correspondent aux valeurs de Féret maximum et celles de largeur à celles de Féret minimum (par exemple pour les gravillons de la classe 4/5mm, on obtient respectivement 5,2 mm, 5,5 mm et 5,5mm de largeur; pour les GNR, GNC et GR4 par la méthode au pied à coulisse et 4,8 mm, 5,2 mm et 5,4 mm de diamètre de Féret minimum par la méthode d'analyse d'images).

Les valeurs d'épaisseur ne sont pas en correspondance avec les diamètres de Féret, ce qui est attendu car lors de la prise de vue, le granulat est dans sa position la plus stable soit sur sa plus grande surface (longueur X largeur).

Les valeurs moyennes et médianes sont très proches, la distribution statistique des valeurs est donc symétrique ce qui confirme la continuité des courbes granulométriques et valide la prise d'essais, 15 grains (les essais sont représentatifs).

Les moyennes de mesures de longueur (ou diamètre de Féret maximal) sont toujours très supérieures à la classe granulaire analysée (par exemple 17,65 mm pour le gravier GR4 de la classe 8/10 mm).

Les moyennes de mesures de largeur (ou diamètre de Féret minimal) sont légèrement supérieures ou en limite haute de la classe granulaire analysée (par exemple 13,70 mm pour le gravier GR4 de la classe 8/10 mm).

Les moyennes de mesures d'épaisseur sont légèrement inférieures ou en limite basse de la classe granulaire analysée (par exemple 9,60 mm pour le gravier GR4 de la classe 8/10 mm).

Ces remarques sont faites pour les trois types de granulats : GNR (naturel roulé), GNC (naturel concassé) et GR 4 (recyclé). Ces observations s'expliquent par le procédé en lui-même de la méthode par tamisage et vibration qui conduit à faire passer les granulats par leur plus petite des dimensions : l'épaisseur

Une plus grande dispersion des résultats est observée pour le granulat naturel roulé, et moins grande pour le recyclé, ce qui se traduit par des écart-types supérieurs, des valeurs maximales plus élevées et/ou des valeurs minimales plus basses pour le GNR.

Par exemple pour les gravillons analysés sur la classe 6,3/8mm :

Classe gravillon (mm)		Longueur [mm]			Largeur [mm]			Epaisseur [mm]		
		<i>GNR</i>	<i>GNC</i>	<i>GR 4</i>	<i>GNR</i>	<i>GNC</i>	<i>GR 4</i>	<i>GNR</i>	<i>GNC</i>	<i>GR 4</i>
6,3/8	Moyenne	12,31	12,54	11,44	8,28	9,2	8,13	4,6	6,15	6,34
	Ecart type	4,24	2,22	1,58	1,34	1,23	0,85	1,24	1,39	1,05
	Ecart relatif (%)	34	18	14	16	13	10	27	23	17

Figure 45 : Granulat d'étude – Variabilité dimensionnelle

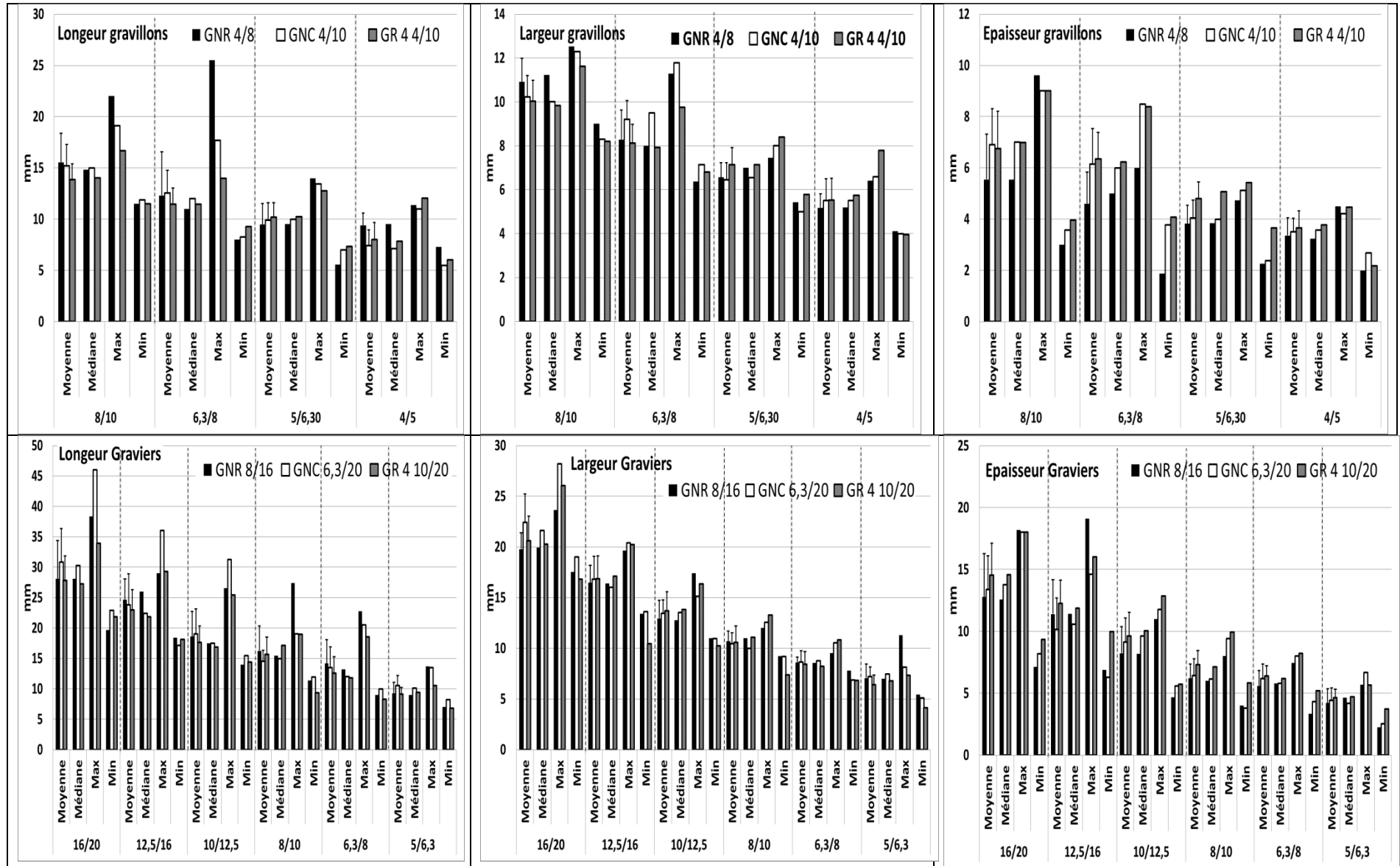


Figure 46 Longeurs, largeurs et épaisseurs par mesure au pied à coulisse

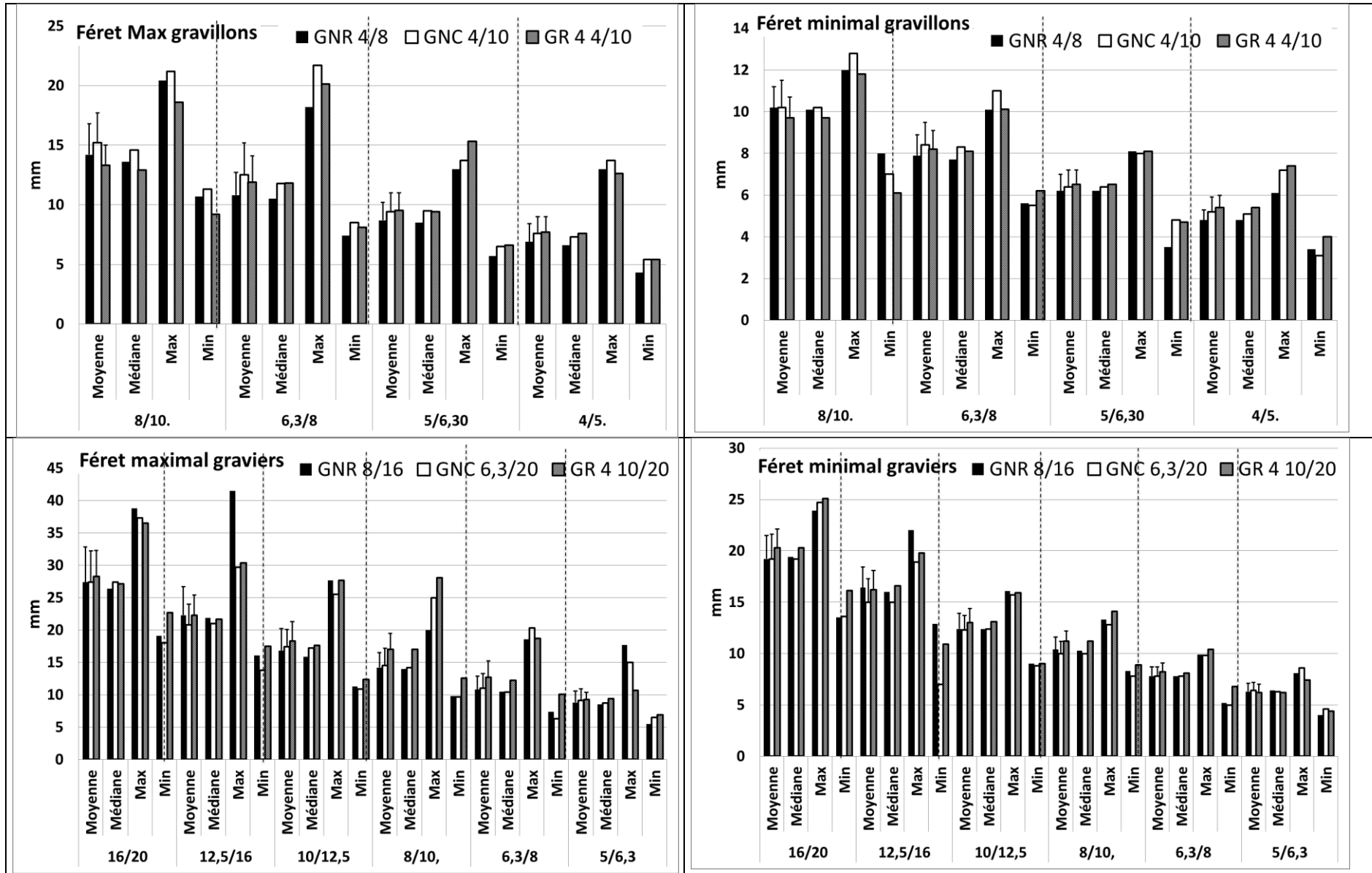


Figure 47 Diamètres de Féret maximal et minimal par analyse d'image

A partir de ces mesures dimensionnelles, des rapports d'allongements sont déterminés :

- Le rapport **Longueur/largeur L/l** (mesures pied à coulisse) qui correspond à la valeur d'**allongement** déterminée par analyse d'images (rapport du diamètre de Féret maximal sur le diamètre minimal)
- Le rapport **Longueur/épaisseur L/e**
- La **tortuosité**

Pour des particules de forme complexe, constituées de plusieurs ramifications, la mesure classique du diamètre équivalent ne reflète pas vraiment la taille de la particule. Il est possible dans ce cas de calculer le **diamètre géodésique** de la particule, qui se détermine par une mesure intérieure de longueur prenant en compte les ramifications.

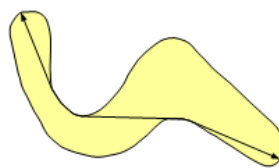


Figure 48 : Tortuosité d'un grain

De ce diamètre géodésique se déduit le **critère de tortuosité**. Il caractérise la tendance d'une surface à avoir une forme tortueuse, sinueuse. Ce critère correspond au rapport du diamètre géodésique et le diamètre de Féret maximum.

$$Tortuosité = \frac{\text{Diamètre géodésique}}{\text{Feret max}}$$

Le critère sera donc égal à 1 dans le cas d'une forme non tortueuse et augmentera en fonction de la sinuosité.

La correspondance L/l (pied à coulisse) et allongement (analyse d'images) est retrouvée pour l'ensemble des granulats.

Les écarts entre les valeurs d'allongements pour les différents granulats ne sont pas significatifs car situés dans la plage d'incertitude.

Les valeurs moyennes d'allongement sont situées entre 1,4 et 1,5 avec des écart-types compris entre 0,2 et 0,3 (soit 12 à 20%). Contrairement aux mesures de longueur ou largeur, il n'y a pas de granulat qui présente une plus grande dispersion quelle que soit la classe. Le GNC présente quelques valeurs maximales assez élevées.

Ci-dessous, en exemple le gravillon 6,3/8 mm.

Classe (mm)		Allongement			L/I		
		GNR	GNC	GR4	GNR	GNC	GR4
6,3/8	Moyenne	1,36	1,39	1,40	1,51	1,43	1,38
	Ecart type	0,25	0,27	0,23	0,22	0,35	0,22
	Relatif (%)	18	19	16	15	24	16

Figure 49 : Granulats d'étude – caractéristiques géométriques

Le critère allongement n'est pas un critère discriminant, ni spécifique des granulats recyclés sur les classes granulaires comprises entre 4 et 20 mm.

Les mêmes conclusions ressortent de l'analyse du critère tortuosité mais dans une plus grande mesure : mis à part quelques valeurs très élevées (un granulat peut présenter une valeur très élevée ou très faible de tortuosité), ce critère n'est absolument pas discriminant pour les granulats recyclés, les valeurs moyennes sont très proches.

Par ailleurs, des valeurs de tortuosité inférieures à 1 sont peu significatives et indiquent une mesure faussée du diamètre géodésique (non représentative). On peut considérer ici que cette mesure en 2 dimensions (par projection : image 2D) n'est pas représentative de la tortuosité réelle de nos granulats et que ce critère pour être déterminé devrait l'être à partir d'images stéréo pour une reconstitution tridimensionnelle.

Les rapports Longueur/Épaisseur sont situés entre 1,8 et 3 en valeur moyenne. Ce rapport est globalement plus élevé (entre 2 et 3) pour les gravillons par rapports aux graviers (entre 1,8 et 2,5). Ce rapport n'est pas non plus discriminant pour le granulat recyclé, cependant, des valeurs maximales pouvant atteindre 7 pour le granulat naturel roulé sont obtenues.

Ainsi les mesures dimensionnelles longueur, largeur, épaisseur et rapports associés ne sont pas des critères pour lesquels le granulat recyclé présente des spécificités.

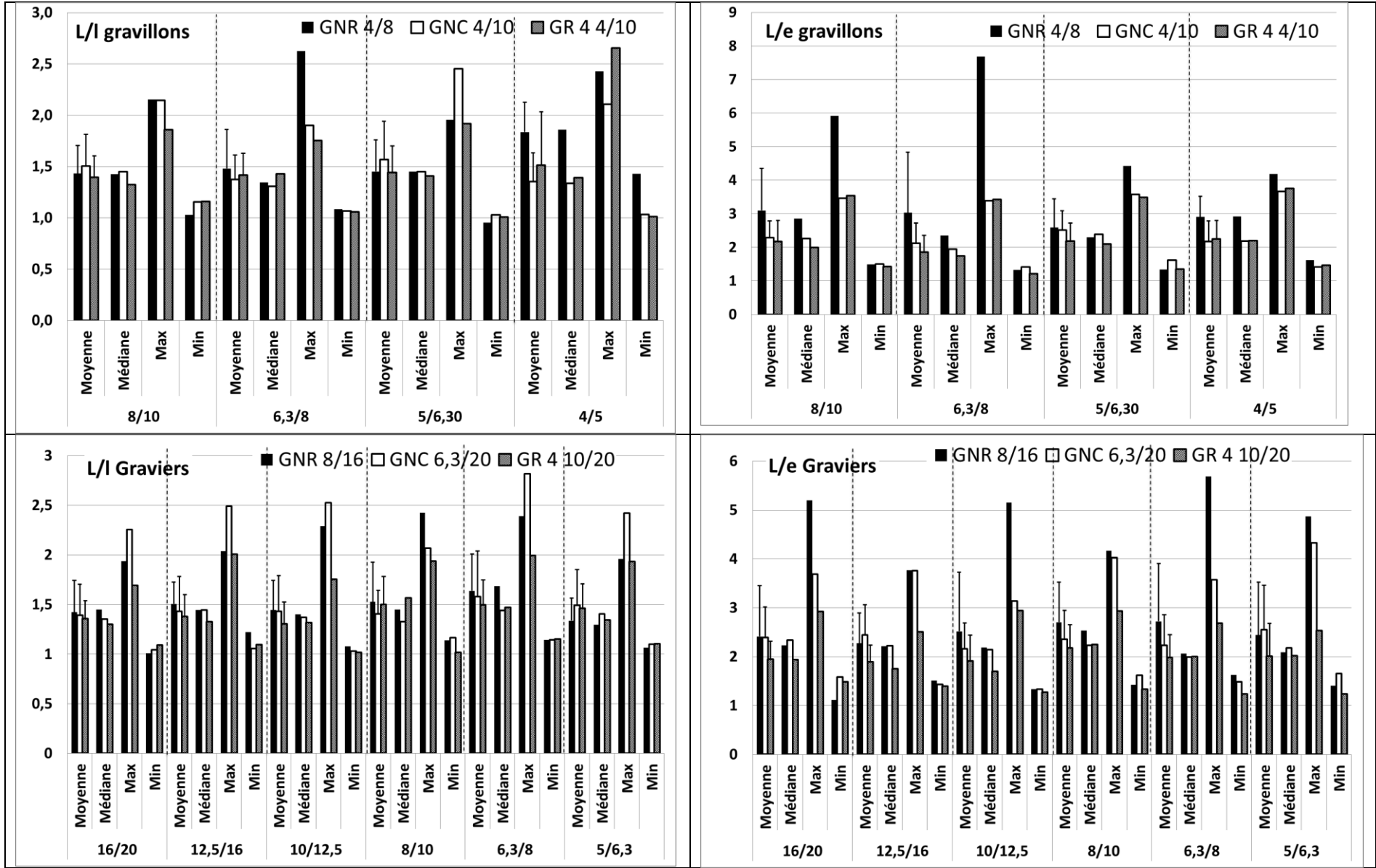


Figure 50 Rapports Longueur/largeur par mesure au pied à coulisse

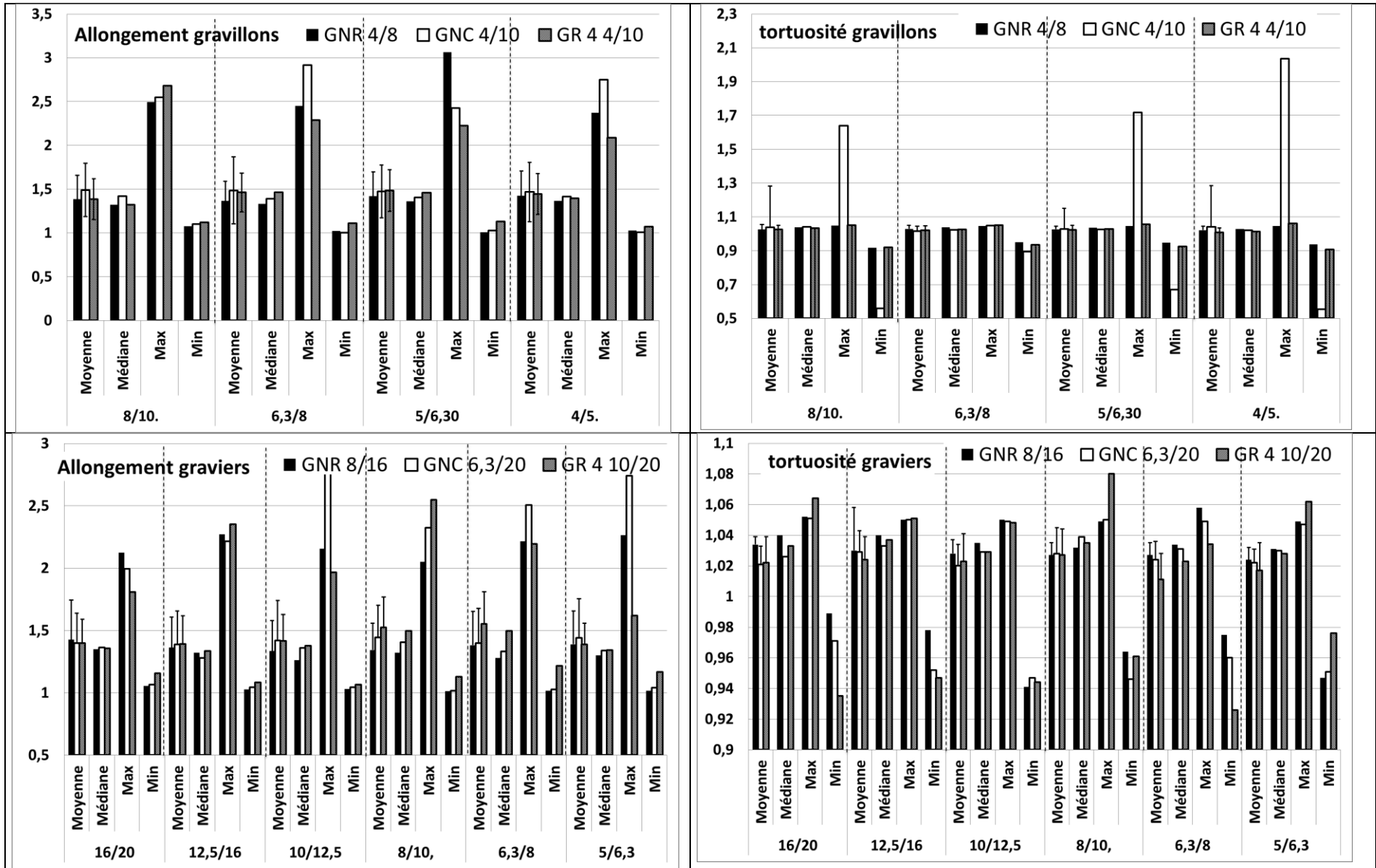


Figure 51 Critères allongement et tortuosité par analyse d'images

Périmètre, Aire, Circularité et convexité

Les valeurs obtenues pour le périmètre des granulats (Figure 53) sont proches d'un granulat à l'autre (GNR, GNC, GR4) et ceci quelle que soit la classe granulaire. Cependant les granulats recyclés ont tendance à présenter un périmètre légèrement supérieur à celui des granulats naturels notamment roulés (de 5 à 20%). Il est difficile de confirmer cette tendance sur cette seule mesure (pourtant reproductible) car les différences entre granulats sont de valeurs proches de celles de l'écart type. Cette tendance sera à rapprocher de l'analyse du critère de circularité et surtout de convexité, pour une estimation des surfaces spécifiques des grains. Les écart-types des mesures du périmètre sont de l'ordre de 15% pour tout type de granulat (GNR, GNC, GR4).

En rapprochant ces résultats des précédents (mesure des longueur, largeur et épaisseur), nous retrouvons un écart entre la valeur théorique du périmètre calculée à partir du diamètre moyen entre 2 tamis et la valeur réelle bien supérieure.

Ci-dessous, en exemple les graviers sur la classe granulaire 16/20 mm.

Classe mm	Périmètre théorique	Grandeur	Périmètre		
			GNR 8/16	GNC-1 6,3/20	GR 4-1 10/20
16/20	d _{max} = 20 : 62,8 mm	Moyenne	78,2	78,8	83,7
		Ecart type	11,5	11,5	9,2
	d _{moy} = 18 : 56,5 mm	Médiane	74,9	80	82,3
		Max	103	104	101,8
		Min	60	52,6	70,4
	D _{inf} = 16 : 50,2 mm				

Figure 52 : Granulats d'étude - périmètre

Les résultats en ce qui concerne les mesures de l'aire (Figure 53) sont à rapprocher de ceux obtenus pour le rapport d'allongement : il n'y a que peu de distinction entre granulats puisque peu de distinctions s'observent sur le rapport d'allongement. Il est également difficile de calculer une valeur théorique de cette aire qui dépend du critère de circularité, des diamètres de Féret et du critère de convexité.

Cette mesure de l'aire n'est pas retenue comme discriminante ni interprétable pour le granulat recyclé.

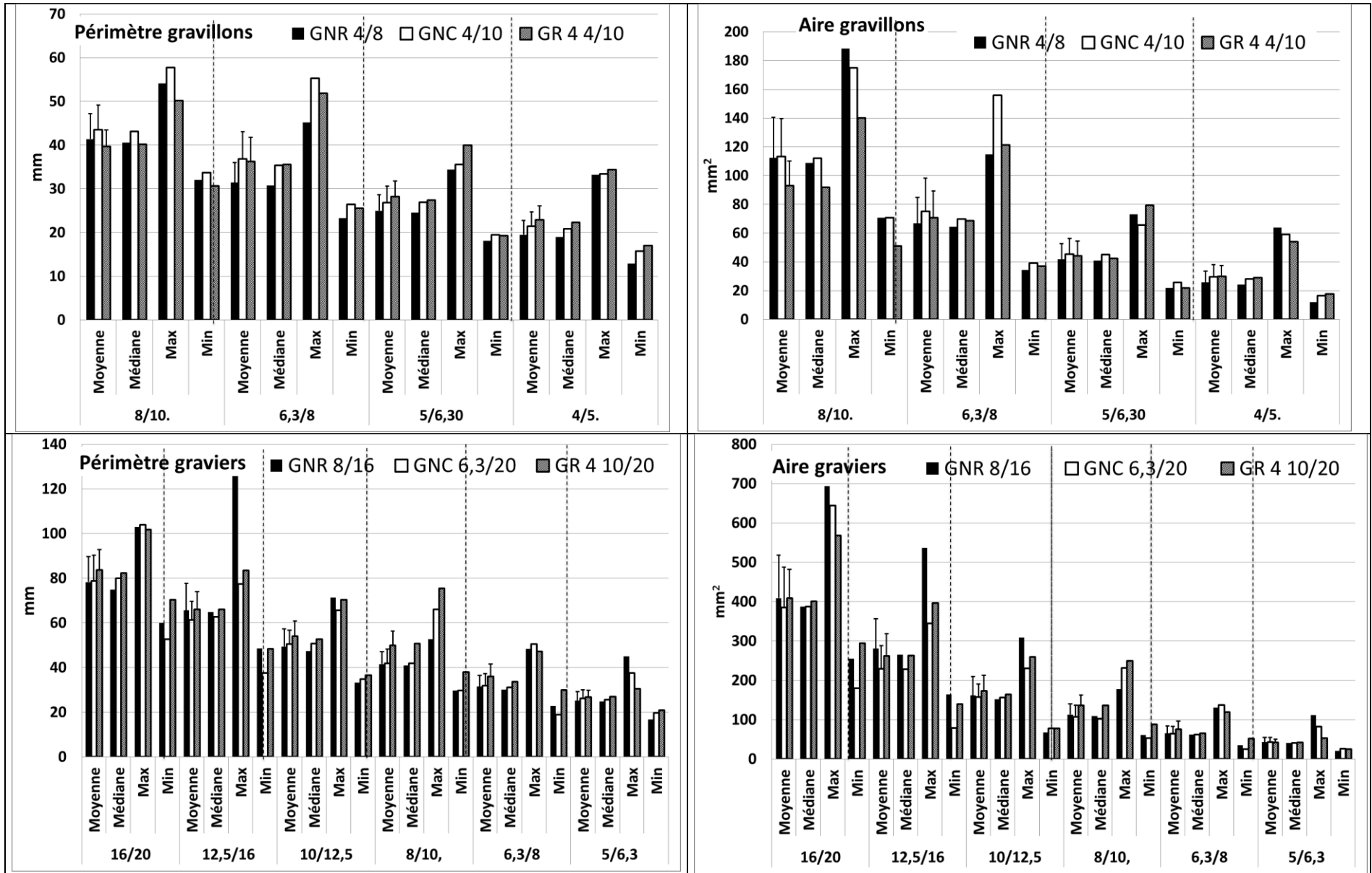


Figure 53 Aire et périmètre par analyse d'images

Les critères de circularité et convexité (Figure 56) présentent des différences notoires entre les types de granulats et ceci indépendamment de la valeur de l'écart type.

En revanche, pour chaque type de granulat, peu de différence est observée entre les classes granulaires.

Définition du critère de circularité

Le périmètre et l'aire sont deux paramètres représentatifs de la taille des particules. Afin de s'affranchir de l'effet de la taille, on utilise parfois le rapport de ces deux paramètres, afin de définir un facteur de circularité. Plusieurs définitions sont possibles pour ce critère. Le critère suivant a été retenu : rapport de l'aire réelle du granulat à l'aire du cercle imaginaire correspondant au périmètre réel du granulat.

On en déduit donc l'expression de la circularité, rapport des deux aires :

$$\text{Circularité} = \frac{4\pi * \text{Aire}}{\text{Périmètre}^2}$$

Le paramètre tendra vers 0 pour une particule très peu circulaire, et atteindra la valeur de 1 dans le cas d'un cercle parfait.

La valeur moyenne du critère de circularité pour les granulats naturels roulés (GNR) toute classe granulaire intermédiaire confondue est de 0,82 pour les gravillons et 0,83 pour les graviers. Celle pour les granulats naturels concassés (GNC) est de 0,77 pour les gravillons et 0,76 pour les graviers et pour les granulats recyclés (GR4) de 0,73 pour les gravillons et 0,71 pour les graviers.

Définition du critère de convexité

La convexité est une mesure de la rugosité extérieure d'une particule. Elle permet de discriminer les particules globalement convexes de celles ayant une forme plus complexe. On commence par calculer l'enveloppe convexe de la particule, qui correspond au plus petit domaine convexe contenant entièrement la particule d'origine. L'aire convexe se définit également comme la surface définie par un fil tendu autour du granulat. La convexité est ensuite définie comme le rapport de l'aire de la particule sur l'aire de l'enveloppe convexe.

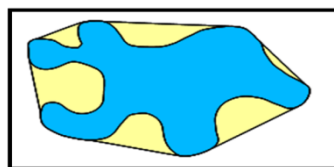


Figure 54 : convexité d'un granulat

Les particules convexes ou quasi-convexes auront une compacité proche de 1, tandis que des particules aux formes complexes verront leur compacité décroître.

Il caractérise la tendance d'un grain à avoir des « creux » sur son enveloppe extérieure. Pour cela ce critère se calcule par le rapport de l'aire convexe (contenant les creux) et de l'aire réelle. Afin de définir la proportion de creux vis à vis de l'aire totale du grain.

$$\text{Convexité} = \frac{\text{Aire}}{\text{Aire convexe}}$$

Pour le critère de convexité, ces valeurs sont respectivement de 0,98 pour le GNR, de 0,97 pour le GNC et de 0,95 pour le GR4 pour les gravillons et les graviers.

Ces tendances sont représentées Figure 55.

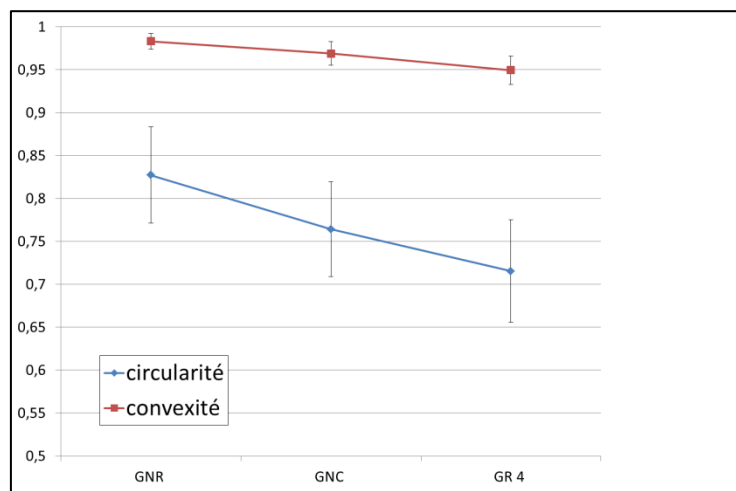


Figure 55 Critères de circularité et convexité selon type de granulat.

Ainsi les mesures géométriques périmètre, mais surtout les critères morphologiques circularité et convexité sont des critères pour lesquels le granulat recyclé présente des spécificités, il est moins circulaire et moins convexe que les granulats naturels.

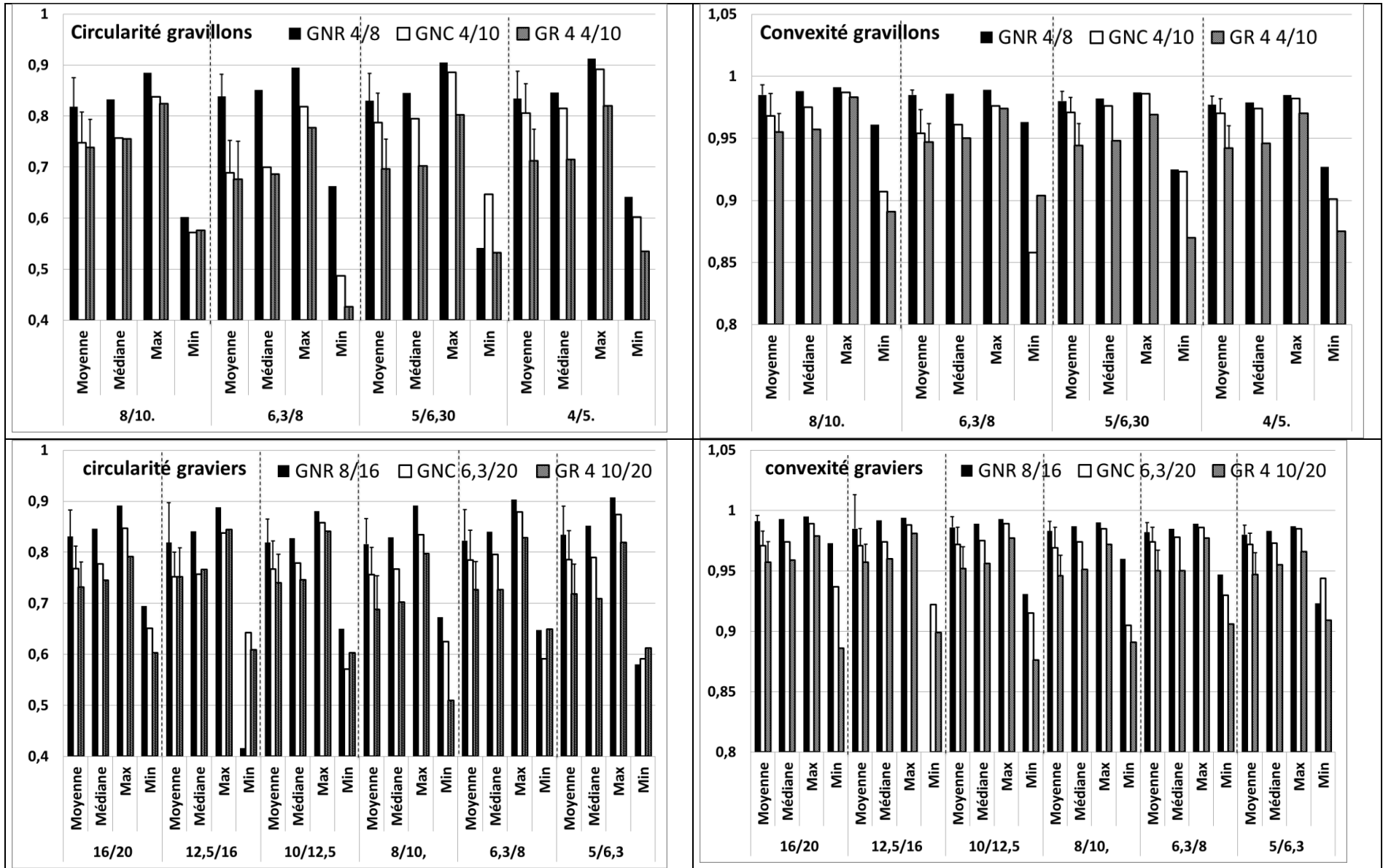


Figure 56 Circularité et convexité par analyse d'images

La reproductibilité du procédé a été testée à partir d'une série de 10 analyses (réalisées à partir de 15 clichés) effectuées chacune après secouage du panier d'un même échantillon pour réorganiser la disposition des granulats (ici la classe 8/10mm pour chacun des 3 granulats : GNR, GNC, GR4).

Les résultats conduisent à valider les mesures effectuées puisque, quel que soit le critère analysé et le type de granulat testé, les valeurs moyennes obtenues sur les 10 analyses (réalisées à partir des 15 clichés) présentent des écarts types inférieurs à 1,5%. Les analyses statistiques présentées précédemment sont donc confirmées.

Par exemple pour le GR4 :

Grandeur	Féret max	Féret min	Allongement	Aire	Perim	Circularité	Convexité	Tortuosité
Unité	cm	cm		cm ²	cm			
Moyenne	1,37	0,98	1,41	0,99	3,98	0,78	0,97	1,02
écart type	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,00	0,02
relatif (%)	0,64	0,89	0,66	1,19	0,65	1,23	0,14	1,69

2.2 Analyses physiques

2.2.1 Masse volumique apparente

Les masses volumiques apparentes des différentes fractions granulaires (sable, gravillons, graviers) des GR2, GR4, GNC et GNR sont présentées en Figure 57 et détaillées dans le Tableau 33.

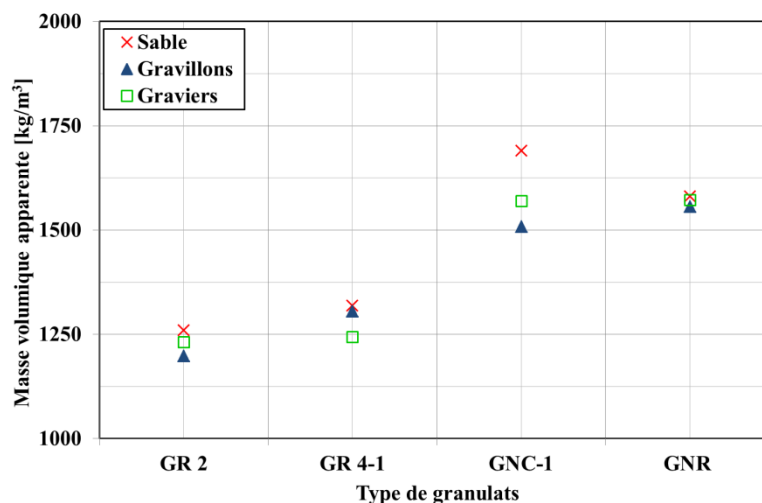


Figure 57 : Masses volumiques apparentes - Sables, Gravillons, Graviers

Du fait de leur porosité et de leur géométrie (roulés, concassés), les granulats recyclés présentent des masses volumiques apparentes plus faibles que celles des granulats naturels, qu'ils soient roulés ou concassés.

Tableau 33: Table des masses volumiques apparentes

	GR2	GR4	GNC	GNR
$\rho_{\text{Sable}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	1260 \pm 3,33	1319 \pm 1,92	1691 \pm 8,39	1581 \pm 3,85
$\rho_{\text{Gravillons}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	1199 \pm 1,92	1306 \pm 6,94	1508 \pm 1,92	1557 \pm 12,02
$\rho_{\text{Gravier}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	1232 \pm 1,92	1244 \pm 8,39	1570 \pm 3,33	1572 \pm 6,94

Les corrélations de ces résultats avec ceux obtenus lors de l'étude des propriétés morphologiques des granulats seront présentées en fin de chapitre.

2.2.2 Absorption, saturation et masses volumiques des sables, gravillons et graviers

2.2.2.1 Absorption et cinétique d'absorption

Les coefficients d'absorption des granulats recyclés sont présentés dans le Tableau 34 et par la Figure 58 en fonction des différentes classes granulométriques. Les mesures ont été faites à l'issue d'une durée d'immersion qui garantit la saturation telle que décrit au paragraphe « Adaptation de la méthode de saturation » dans la partie « Méthodes expérimentales ». Ces temps d'immersion ont été de 24 à 48 heures selon les granulats et classes granulaires et sont précisés en Annexe 4.

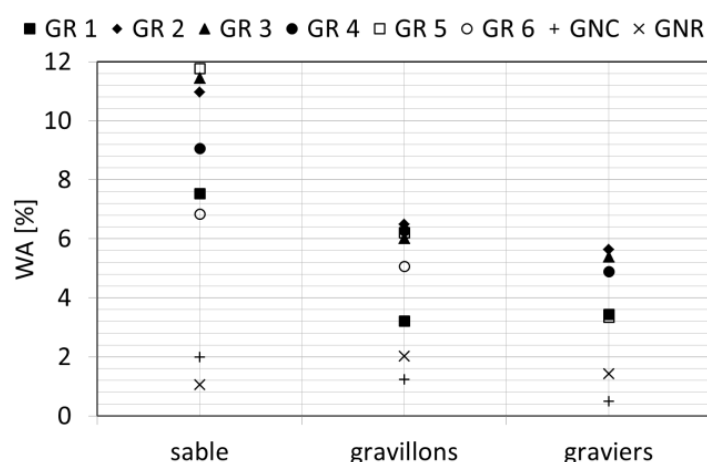


Figure 58 Coefficients d'absorption

Tableau 34 Coefficients d'absorption %

Classe granulaire	Sable	Gravillons	Graviers
GR 1-6	10,16 \pm 1,80	5,89 \pm 1,34	4,69 \pm 1,02
GNC	2 \pm 0,03	1,23 \pm 0,30	0,50 \pm 0,04
GNR	1,06 \pm 0,28	2,03 \pm 0,02	1,43 \pm 0,06

Le suivi des cinétiques d'absorption a été réalisé sur tous les granulats sur les sables, gravillons et graviers. Trois essais au minimum ont été réalisés à chaque fois et la courbe moyenne déterminée.

Les résultats de l'étude des cinétiques d'imbibition sont présentés Figure 59. L'agitation des échantillons après une demi-heure d'essai est à l'origine d'une discontinuité de mesure visible sur chacune des courbes. Seuls les essais sur gravillons et graviers sont présentés ici. Les résultats sur sables conduisent aux mêmes conclusions mais, du fait du récipient d'immersion utilisé, sont plus difficilement exploitables aux premières minutes.

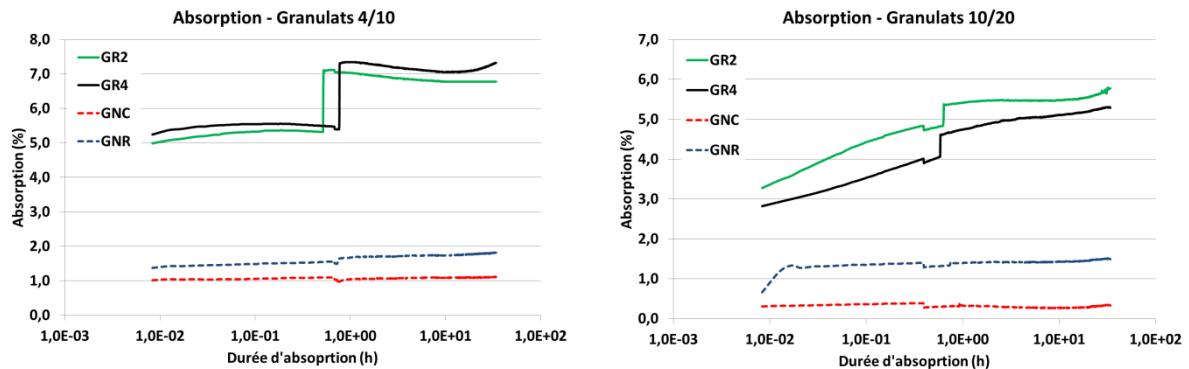


Figure 59 Suivi de l'absorption des granulats naturels et recyclés

Quelle que soit la granulométrie considérée, les granulats naturels et recyclés montrent des comportements différents. L'absorption des granulats recyclés est nettement plus élevée que celle des granulats naturels et fonction de la classe granulaire: respectivement de 10% pour les sables à 5 % pour les graviers et de l'ordre de 2% au maximum pour les granulats naturels. Ainsi les sables recyclés présentent une absorption bien plus élevée que les gravillons ou graviers. On constate également une variation sensible de l'absorption en fonction des lots de granulats recyclés analysés indépendamment de leur origine (plateforme ou laboratoire) étudiée.

Pour l'ensemble de ces lots, 80 % de l'absorption s'effectue dans les 10 premières minutes. On peut noter que la progression de l'absorption des granulats naturels est constante et n'est que peu impactée par l'agitation. En revanche, on constate que, pour les granulats recyclés l'agitation entraîne une augmentation significative de la quantité d'eau absorbée. L'influence de l'agitation des granulats recyclés sur leur absorption montre une rétention importante d'air qui est évacuée lors du mélange, ce résultat est à rapprocher de l'analyse morphologique et notamment des critères de circularité et convexité.

On constate également qu'après cette agitation, les granulats recyclés présentent une phase de résorption avant une nouvelle phase d'absorption.

De plus après plus de 50 heures d'immersion, l'absorption semble continuer à augmenter, dans une mesure, certes très faible, mais dont l'analyse devrait être approfondie afin d'identifier les phénomènes mis en jeu. Il est en effet possible que des recristallisations locales expliquent ces phases de résorption et réabsorption successives.

2.2.2.2 Masses volumiques

A l'issue de l'immersion des échantillons, les masses volumiques sont déterminées. Il est possible de comparer trois grandeurs : masse volumique réelle, masse volumique réelle saturée surface sèche, masse volumique absolue. Le coefficient d'absorption corrèle ces valeurs entre elles. Les résultats sont présentés de la Figure 60 à la Figure 62.

La dispersion observée pour certains granulats est liée au protocole d'immersion et/ou de séchage utilisé. La totalité des résultats obtenus selon le protocole utilisé est donnée en annexe 8.

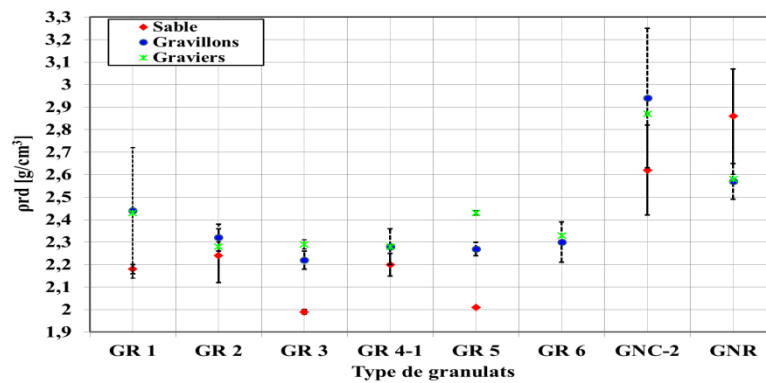


Figure 60 Masse volumique réelle après séchage

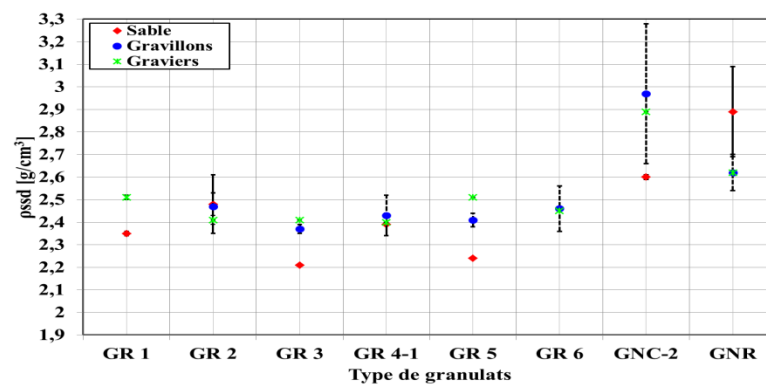


Figure 61 Masses volumiques réelles saturées surface sèches

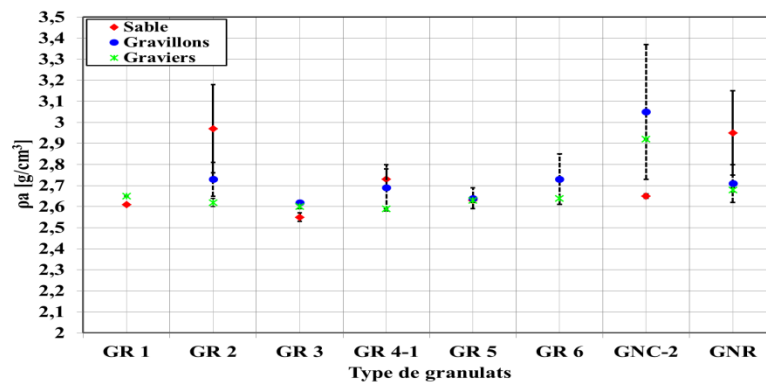


Figure 62 Masses volumiques absolues

Les résultats obtenus sont directement corrélés à ceux obtenus pour le coefficient d'absorption : plus le coefficient d'absorption est élevé, plus la masse volumique réelle est faible. Ainsi les granulats recyclés présentent des masses volumiques réelles (grandeur utilisée dans la formulation des bétons) plus faibles (de l'ordre de 2,1 g/cm³ pour les sables et 2,3 g/cm³ pour les graviers) que celles des granulats naturels (compris entre 2,6 g/cm³ et 2,8 g/cm³ pour les granulats naturels roulés et concassés, sables et graviers.)

De même les écarts entre les masses volumiques des granulats naturels et recyclés sont moindres, puisque le calcul de la masse volumique absolue exclut le volume des vides accessibles à l'eau (entre 2,6 g/cm³ et 2,7 g/cm³ pour les recyclés et entre 2,7 g/cm³ et 3 g/cm³ pour les naturels).

2.2.3 Masses volumiques absolues des éléments fins

Les résultats de masses volumiques sur éléments fins des fractions 0/100 µm, 0/315 µm et 0/500 µm sont reportés Figure 44.

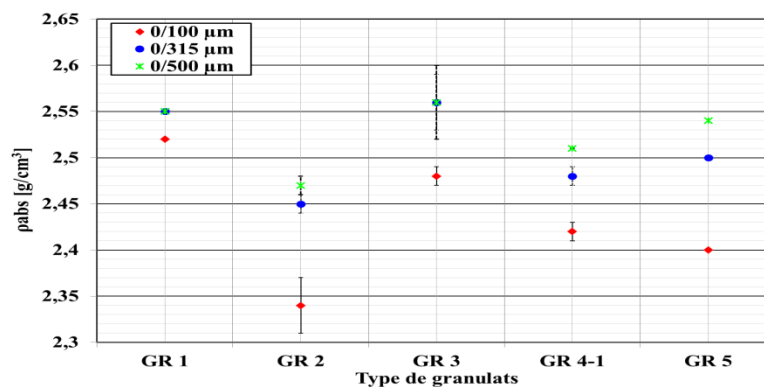


Figure 63 : Masse volumique absolue des fractions 0/100 ; 0/315 et 0/500 µm

A ce stade, les résultats indiquent que les éléments les plus fins présentent des masses volumiques légèrement plus faibles. Hormis le GR2, qui présente des masses volumiques plus basses que les autres, les valeurs sont proches quelle que soit l'origine du granulat recyclé : issues de plateforme ou de laboratoire.

A cette finesse de mouture, l'effet de la porosité sur les mesures de masse volumique est peu sensible puisque les valeurs obtenues sont proches de celles de granulat naturel non poreux (2,5 à 2,6 g/cm³).

2.2.4 Etudes de désorption

Les essais de désorption ont été divisés en deux phases. La première d'entre elles consiste à étudier le potentiel de désorption des granulats alors que la seconde, simplement initiée lors de ce travail, vise à se rapprocher des conditions réelles de malaxage.

2.2.4.1 Potentiel de désorption

Le potentiel de désorption des différents granulats d'études a été étudié par la méthode de désorption thermique. Les résultats de ces essais, normalisés par rapport à leur taux d'absorption sont présentés en Figure 64 pour les gravillons et Figure 65 pour les graviers.

Ces résultats montrent que la désorption thermique de l'ensemble des granulats recyclés suit trois phases différentes :

- premier temps ❶ → évaporation de l'eau adsorbée en surface, cinétique lente
- deuxième temps ❷ → désorption de l'eau présent dans la porosité libre directement liée au milieu extérieur et dont seuil d'accès de grande dimension, vitesse plus élevée et constante (comportement linéaire de la désorption)
- troisième temps ❸ → désorption des porosités de seuil d'accès faible, Ralentissement de la désorption, jusqu'à séchage complet du matériau

Ces résultats sont cohérents avec la structure poreuse plurimodale des matériaux cimentaires telle que décrit dans la littérature ((Bur, n.d.) ;(Bur et al., 2009))

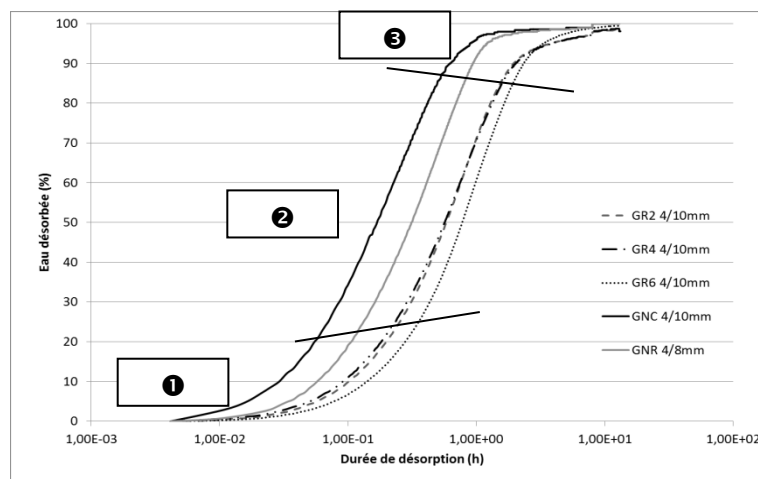


Figure 64 Suivi de la désorption des gravillons

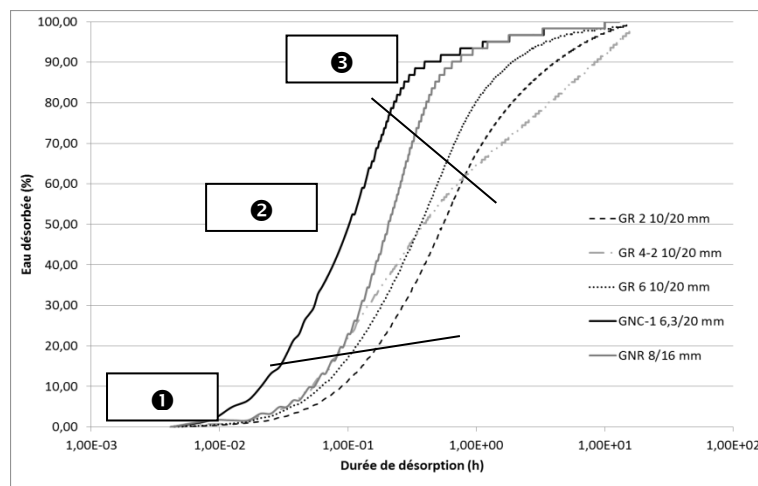


Figure 65 Suivi de la désorption des graviers

Quel que soit le type de granulat et la classe étudiée, ces 3 phases sont observées. Concernant la première phase, un décalage peut être observé entre les granulats car dépendant de l'état initial et de la quantité d'eau égouttée. Pour les gravillons, la phase 2 est proche quel que soit le type de granulat puisque la pente de la courbe est identique, la cinétique de désorption est donc indépendante de la quantité d'eau absorbée initialement. Au contraire pour les graviers, cette cinétique varie selon le granulat. Les pentes observées étant différentes entre les granulats naturels et recyclés et d'un granulat recyclé à l'autre. On peut cependant discuter de la fiabilité de l'allure très différente de l'essai sur le GR4 même si la représentation est celle d'une valeur moyenne sur 3 essais (courbes à vérifier).

La troisième phase, quant à elle est variable d'un granulat à l'autre et est beaucoup plus longue pour les graviers. L'analyse précise de cette phase de désorption et la compréhension des différences gravillons - graviers nécessiteraient une étude approfondie de la porosité des échantillons (texturation, seuils d'accès, tortuosité, connectivité, etc.) et des propriétés de transferts qui en découlent.

2.2.4.2 Simulation des conditions de malaxage réelle – première approche

La mise en œuvre des granulats recyclés dans la fabrication des bétons implique la pré-saturation de ces granulats avant le malaxage. Un contact direct s'établit alors entre les granulats pré-saturés et les autres constituants pulvérulents (ciment, etc.). La nature anhydre du ciment implique nécessairement une forte affinité avec l'eau. L'ensemble de ces conditions sera à l'origine d'un effet de succion lié au ciment et à l'origine d'une désorption partielle des granulats pré-saturés. Pour simuler cet effet, les granulats pré-saturés ont été déposés entre 2 feuilles de papier buvard et un suivi de leur masse a été effectué en fonction du temps de contact.

Le protocole d'essai n'est pas à ce jour optimisé, cependant les résultats sur papier buvard confirment les deux premières phases. La troisième phase n'est pas atteinte puisque la désorption est incomplète. Une étude plus approfondie de la désorption sous différents environnements devra être menée dans de futures études.

2.3 Analyse des caractéristiques mécaniques

Les essais Micro-Deval et Los-Angeles ont été réalisés sur les granulats naturels concassés (GNC) comme roulés (GNR) ainsi que sur le granulat recyclé GR4.

Les résultats des essais Los Angeles et Micro-Deval des différents lots de granulats sont présentés Figure 66 et Tableau 35.

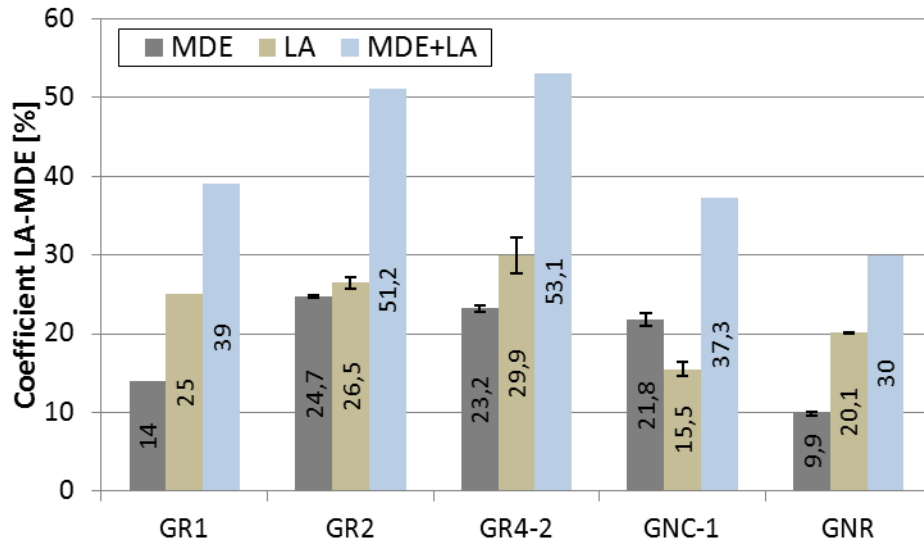


Figure 66 et : Coefficients Los Angeles et Micro-Deval

Tableau 35 : Coefficients Los Angeles et Micro-Deval

	GR1	GR2	GR4	GNC	GNR
Micro-Deval (%)	14	24,7 ±0,14	23,2 ±0,4	21,8 ±0,744	9,9 ±0,25
Los Angeles (%)	25	26,5 ±0,74	29,9 ±2,26	15,5 ±0,85	20,1 ±0,14

La norme NF EN 18-545 (Afnor, NF P 18-545, 2011) classe les granulats en fonction de leur résistance à la fragmentation et leur affecte les codifications LA_A à LA_D selon les catégories décrites dans le Tableau 36. Plus la valeur du coefficient Los Angeles est élevée, plus la résistance à la fragmentation du granulat considéré est faible. Les essais avec le granulat GR1 ont été réalisés par un laboratoire extérieur sans garanti de condition expérimentales identiques. Ces résultats ne sont donc pas considérés dans l'analyse

Tableau 36 : Coefficient LOS Angeles normalisés, d'après NF P 18-545 (Afnor, NF P 18-545, 2011)

Codification	Catégorie	Coefficient LA
LA _A	LA ₃₀	< 30
LA _B et LA _C	LA ₄₀	< 40
LA _D	LA ₅₀	< 50

La norme stipule que les granulats dédiés à la fabrication des bétons courants doivent, sauf cas particulier, présenter un coefficient Los Angeles inférieur à 40. Les granulats recyclés étudiés sont donc, sur ce plan, conformes à la législation en vigueur pour la fabrication d'ouvrages en béton courant.

Les résultats obtenus correspondent aux résultats attendus : les granulats naturels concassés présentent la résistance à la fragmentation la plus importante (LA_{GNC}=15,5) alors que celle des granulats recyclés (du lot GR4), se rapproche de celle des granulats naturels roulés, respectivement LA_{GNR}=20,1 et LA_{GR4}=29,9.

La norme précise également que les granulats présentant un coefficient Los Angeles inférieur à 25 sont considérés comme non gélif. Cette conclusion est issue de l'expérience sur granulats naturels roulés et concassés et il n'est donc pas possible de conclure sur la gélitivité des granulats recyclés à partir de cette seule valeur de coefficient Los Angeles.

Les coefficients Micro-Deval sont définis par la norme NF EN 12620 selon les catégories présentées dans le Tableau 37.

Tableau 37 : Coefficient Micro-Deval d'après NF EN 12620 (Afnor, Norme NF EN 12620, 2003)

Coefficient Micro-Deval	Catégorie Micro- Deval
≤ 10	M _{DE} 10
≤ 15	M _{DE} 15
≤ 20	M _{DE} 20
≤ 25	M _{DE} 25
≤ 35	M _{DE} 35

Bien que la norme n'impose aucune spécification concernant la résistance à l'attrition des granulats, il est généralement recommandé (Meftah et al., 2013) ; (Meftah and Arabi, 2011) d'utiliser des granulats dont le coefficient Micro-Deval est inférieur à 35 afin de limiter une modification excessive du squelette granulaire lors des phases de malaxage et de mise en œuvre du béton. On peut néanmoins remarquer que la résistance à l'usure des granulats est à la fois liée à leur forme ainsi qu'à la liaison entre le granulat parent et le mortier accolé. En considérant les différents lots étudiés, l'angularité constitue le facteur prépondérant. En effet, les granulats roulés présentent la meilleure résistance à l'usure (M_{DE}GNR=9,9). Les granulats GNC et GR4 sont deux granulats concassés dont la forme explique les valeurs MDE plus élevées (respectivement 21,8 et 23.2). Les différences entre les granulats naturels concassés et les granulats recyclés et la dispersion pour les granulats recyclés peuvent s'expliquer par l'aspect multiphasique (granulats parents, mortier) de ces derniers et l'adhérence de ces phases entre elles.

A titre d'information, il est possible de considérer, pour certains granulats, une valeur représentant conjointement les résistances à l'attrition et aux chocs en faisant la somme des coefficients Los-Angeles et Micro-Deval. Bien que peu significative au sens des références normatives relatives aux bétons, cette valeur met en exergue les faibles propriétés des granulats recyclés comparativement aux granulats naturels.

De plus, bien que les seuils soient respectés, la perte de matière autour des granulats recyclés peut faire évoluer le squelette granulaire. Les résultats ci-dessous (Figure 67) montrent une évolution du squelette granulaire liée au malaxage uniquement pour les granulats recyclés (GR4). Le granulat naturel (GNC) n'est pas influencé par ce malaxage.

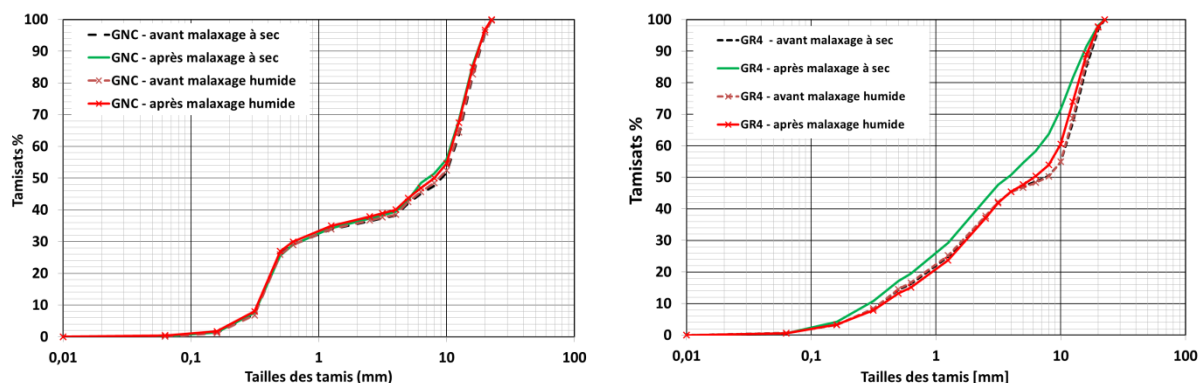


Figure 67 : Evolution du squelette granulaire après malaxage des GNC et GR4

Cette évolution du squelette granulaire des granulats recyclés sera à prendre en compte dans le choix de la méthode de formulation des bétons.

2.4 Propreté, réactivité et constitution

2.4.1 Propreté et potentiel polluant

Classification des gravillons recyclés

La classification des granulats recyclés conformément à la norme NF EN 933-11 (Afnor, Norme NF EN 933-11, 2009) est basée sur les proportions de leurs différents éléments constitutifs. Ces proportions pour les granulats d'études (fractions 4/8 mm) sont présentées dans le Tableau 38.

Tableau 38 : Proportion des différents constituants des granulats recyclés

		GR 1	GR 2	GR 3	GR 4	GR 5
Volume de particules flottantes	FL (cm ³ /kg)	0,5	1,6	1,0	0,5	0,0
Béton, produits à base de béton, mortier et éléments de maçonnerie	Rc (%)	89,1	93,8	88,8	88,2	87,2
Granulats non lié, de la pierre naturelle et des granulats traités aux liants hydrauliques	Ru (%)	7,0	4,8	5,9	7,3	12,7
Rcu = Rc + Ru : Constituants principaux	Rcu (%)	96,1	98,7	94,7	95,5	99,9
Eléments de maçonnerie en argile (briques et les tuiles), de maçonnerie en silicate de calcium et de béton cellulaire non-flottant	Rb (%)	0,0	0,3	0,7	1,0	0,0
Matériaux bitumineux	Ra (%)	3,3	0,5	0,6	2,7	0,0
Verre	Rg (%)	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0
Autres éléments (métaux, argile, sol, bois, gypse, plâtre, plastique, caoutchouc)	X (%)	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0

Comme attendu, le granulat GR5, réalisé en laboratoire avec des processus de fabrication et des conditions de stockage maîtrisés, est exempt de tout élément n'entrant pas initialement dans la composition du béton. A l'inverse, les granulats issus de plateformes de recyclage

contiennent de faibles taux de matériaux non issus du béton parents mais utilisés dans la réalisation des ouvrages déconstruit, mal séparés. Ces taux conduisent à la classification des granulats tel que montré dans le Tableau 39.

Tableau 39 : Catégories des constituants principaux et secondaires des granulats recyclés

GR 1	GR 2	GR 3	GR 4	GR 5
FL ₂₋	FL ₂₋	FL ₂₋	FL ₂₋	FL _{0, 2-}
RC ₈₀	RC ₉₀	RC ₈₀	RC ₈₀	RC ₈₀
RCu ₉₅	RCu ₉₅	RCu ₉₀	RCu ₉₅	RCu ₉₅
Rb ₁₀₋	Rb ₁₀₋	Rb ₁₀₋	Rb ₁₀₋	Rb ₁₀₋
Ra ₅₋	Ra ₁₋	Ra ₁₋	Ra ₅₋	Ra ₁₋
XRg _{0,5-}	XRg _{0,5-}	XRg _{0,5-}	XRg _{0,5-}	XRg _{0,5-}

Selon la norme EN 206-1/CN 2012 (Afnor, Norme NF EN 206-1/CN, 2012), toutes les catégories des constituants secondaires des granulats :

- du lot GR5 sont de classe CR_B (Classification Recyclés B) → granulats de type 1
- des granulats d'études issus de plateformes sont quant à eux classés CR_B ou CR_C. → granulats de type 2

Ces granulats recyclés sont donc, selon la norme, utilisables pour la formulation des bétons au regard de leurs faibles taux d'impuretés.

Equivalent de sable et valeur au bleu

Les résultats des essais d'équivalents sable et de mesure au bleu de méthylène sont présentés dans le Tableau 40.

Tableau 40 : Propreté des sables - Ecs et MB

	GR1	GR2	GR3	GR4	GNC	GNR
Ecs (%)	79,19 ± 0,01	79,38 ± 0,30	78,07 ± 4,48	79,44 ± 4,61	98,14 ± 0,83	89 ± 0,83
MB (g/kg)	0,7	0,27	0,25	1,25	0,5	0,25

Les valeurs des équivalents de sable (Tableau 40) des granulats recyclés sont supérieures à 65 %. Au regard de la norme NF XP P18 545 (Afnor, NF P 18-545, 2011) (Tableau 41), ces valeurs permettent de considérer les sables recyclés comme propres et ainsi utilisables pour la fabrication des bétons. Cependant, cet essai n'apporte aucune information quant à la nature des fines contenues dans le granulat et leur potentielle réactivité de ces fines. Cette réactivité est ainsi un facteur à évaluer, notamment à l'aide de l'essai au bleu.

Tableau 41 : Propreté des sables - spécification normative d'après (Afnor, Norme NF EN 933-8, 1999)

Spécification vis-à-vis des bétons	
Ecs < 60%	Sable argileux : à rejeter (retrait – gonflement)
60% ≤ Ecs < 70%	Légèrement argileux : admissible
70% ≤ Ecs < 80%	Faiblement argileux : à privilégier

80% ≤ Ecs Très propre : admissible (plasticité → ajuster la teneur en eau)

Les essais au bleu de méthylène montrent que tous les sables utilisés sont considérés comme propres au regard de la norme avec des valeurs inférieures à 1,5 et sont donc utilisables pour les bétons.

Ces deux essais permettent de considérer le matériau comme propre au regard des exigences de la norme, mais ces caractérisations ne nous semblent pas suffisantes pour analyser la propreté d'un sable recyclé, la présence d'éléments tels que des sulfates, des éléments organiques ou d'autres substances n'étant pas évaluée par ces méthodes.

2.4.2 Réactivité à l'eau

La détection d'une réactivité à l'eau

Certaines fines recyclées (éléments dont la taille est inférieure à 500 µm) présentent une réactivité à l'eau. Ainsi 3 des lots étudiés et le lot reconstitué GR4-7 présentent un durcissement lié à une fin de prise avant 24h (Tableau 42).

Tableau 42 Mesure de la prise sur fraction 0-500 µm

	GR 1	GR 2	GR 3	GR 4	GR 5	GR6	GR7	GR4-7
Fin de prise (heure)	Pas de prise	Pas de prise	Pas de prise	Pas de prise	18	8	9	10

Les mêmes essais ont été menés sur des fractions 0-100 µm et conduisent à des temps de prise raccourcis d'environ 2 heures.

NB : GR7-4₅₀₀ est obtenu en substituant 100% de sable fin 0/500µm de GR4-2 avec sable fin de GR7-0, le rapport $F_{500\mu m}/S_{0/4mm}=0,25$.

De plus, l'étude de chacun de ces deux lots à l'aide d'un calorimètre de Langavant a montré un dégagement de chaleur pour la fraction granulaire 0/10 mm contenant des fines ainsi que pour la fraction 4/10 mm (Figure 38). La réactivité de ces lots est donc non seulement due aux éléments fins mais également aux éléments plus grossiers.

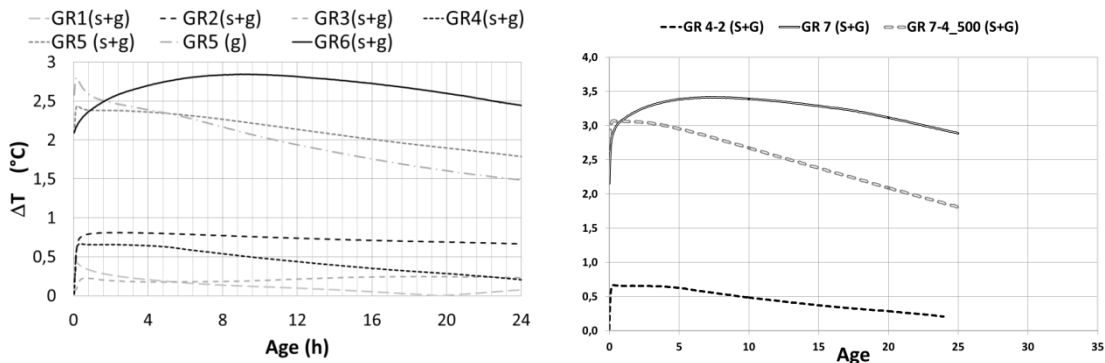


Figure 68 Suivi du dégagement de chaleur des granulats en présence d'eau

On constate que seuls les lots GR5, GR6, et GR7 provenant du concassage de bétons fabriqués au laboratoire et conservés uniquement dans des locaux à l'abri des intempéries, présentent une réactivité à l'eau même après 6 ans. L'ajout de fines réactives GR7 au lot GR4 conduit à obtenir un granulat réactif (GR7-4).

Remarque : Sur ces mélanges granulats + eau, la chaleur d'hydratation n'a pas été calculée, mais un essai a été fait pour détecter un dégagement de chaleur.

L'évaluation de cette réactivité

Pour les granulats qui ont fait prise, des essais mécaniques ont été réalisés. Les résultats indiquent que sur les 3 lots présentant une réactivité à l'eau, seuls 2 des lots développent un durcissement qui conduit à une valeur de résistance en compression à 10 jours de 0,8 à 1 MPa. Il s'agit des lots GR6 et GR7.

L'influence de cette réactivité

– L'influence sur la cinétique de prise et de durcissement d'une pâte de ciment

En substituant le ciment par 40% de fines GR6, le temps de prise est retardé de 2h.

L'influence de la réactivité des fines sur les pâtes de ciment a été étudiée. Des essais mécaniques réalisés sur des éprouvettes de pâtes de ciment et de pâtes de ciment + fines sont présentés Figure 69. La perte de résistance observée peut aller de 10 à près de 70%. De manière surprenante, le granulat qui entraîne la plus forte chute de résistance est pourtant celui qui présente la plus forte réactivité (dégagement de chaleur).

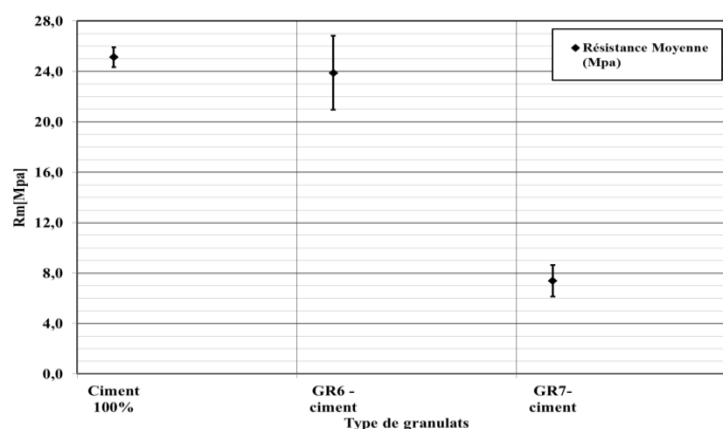


Figure 69 : Résistances mécaniques à 48 heures des pâtes de ciment

– L'influence sur la réactivité exothermique d'un mortier

La comparaison des chaleurs d'hydratation entre trois mortiers réalisés avec des granulats d'origine différente (GNC, GR4 et GR6) indique que même si les granulats sont réactifs à l'eau tel que montré précédemment, la chaleur d'hydratation du ciment est prépondérante et que cette réactivité du granulat est du second ordre devant les réactions chimiques mises en jeu.

- **L'influence sur la résistance mécanique d'un mortier : détermination de l'indice d'activité i_{28}**

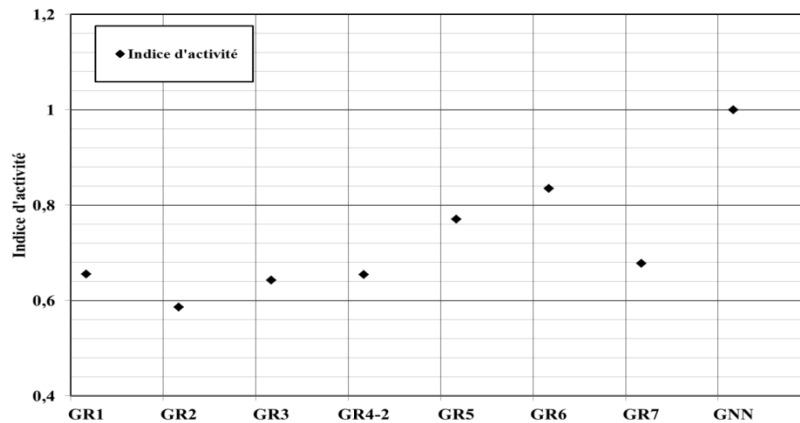


Figure 70 : Indices d'activité « i_{28} »

Le lot appelé « dopant » (GR7), réalisé en laboratoire sous forme de barrettes 4x4x16 et broyé après 4 mois qui présente la réactivité à l'eau la plus importante (prise et chaleur d'hydratation) n'est pas celui dont l'indice d'activité i_{28} est le plus important. Il est de 0,67 (32% de perte en résistance) et est inférieur à 0,71 (valeur minimale considérée comme addition siliceuse ou calcaire). Ces résultats rejoignent les précédents résultats présentés Figure 69. Par contre les fines 0/100 μ m des granulats GR5 et GR6 présentent des indices d'activité supérieurs à 0,71, donc susceptibles d'être considérés comme additions siliceuses ou calcaires. Les valeurs trouvées sont respectivement de $i_{28}=0,771$ et de 0,837. Pour confirmer la classification calcaire ou siliceuse de ces fines (ou leur assimilation à cette classification), des analyses minéralogiques (DRX, ATG/ATD) seraient nécessaires.

Les autres granulats recyclés qui ne présentaient pas de réactivité à l'eau ont des indices d'activité trop bas pour être considérés comme addition. Ils entraînent une baisse en résistance à la compression de 34 % à 41% par rapport au mortier de référence (de 16 % à 32% pour les fines réactives).

Bilan de la réactivité à l'eau

En ce qui concerne les granulats recyclés issus des plateformes, leur stockage pendant une période indéterminée à l'extérieur a conduit à l'hydratation des éléments anhydres résiduels. Ceci est confirmé par des essais de prise sur éléments fins menés 1 an plus tôt dans les mêmes conditions expérimentales sur les fractions 0-500 μ m. Le granulat GR3 avait alors présenté une fin de prise à 24h et le GR5 à 12h. Cette évolution dans la réactivité des fines recyclées confirme que la réactivité résiduelle des matériaux évoluent au cours de temps et qu'une conservation longue avant utilisation pourrait garantir une non réactivité des granulats, les phases anhydres éventuellement présentes au moment du concassage ayant eu le temps de s'hydrater, surtout si les matériaux sont conservés à l'extérieur.

Afin d'être représentatif des conditions réelles, il convient donc d'être vigilant à la provenance et au mode de conservation des granulats.

Ainsi, les granulats recyclés présentent une réactivité à l'eau réelle qui peut conduire à un durcissement effectif des éléments hydratés. Cependant, cette réactivité tant des éléments fins que plus grossiers n'a qu'un effet d'ordre secondaire sur la réactivité d'un mortier ou d'un béton. Ainsi, tant que le granulat recyclé quelle que soit sa classe granulaire est considéré comme constituant granulat, cette réactivité n'a pas lieu d'être prise en compte. Par contre lorsqu'il est envisagé de considérer les fines comme addition au béton, soit en liant équivalent, soit en addition, il convient alors d'étudier cette réactivité potentielle à l'eau et son interaction avec l'indice d'activité obtenu. De plus, dans ce dernier cas, le dosage en eau et le dosage éventuel en adjuvant devra prendre en compte cette teneur en fines.

2.4.3 Constitution : détermination de la quantité de mortier

Les résultats des essais de détermination de la quantité de mortier accolé par attaque à l'acide chlorhydrique de la fraction 4/10 du GR4 sont présentés dans le Tableau 43.

Tableau 43 : Quantité de mortier accolé - essai à l'acide chlorhydrique

Ouverture des tamis [mm]	GR4 4/10 initial [g]	GR4 -1 4/10 après traitement [g]	Δ masse [g]	Proportion [%]
4,00	205,35	151,03	54,32	26,45
5,00	224,24	139,80	84,44	37,66
6,30	245,52	151,30	94,22	38,38
8,00	212,32	135,65	76,67	36,11

Ces résultats illustrent la dissolution de la matrice cimentaire présente autour des granulats parents. Ces essais s'avèrent problématiques pour deux raisons ;

- D'une part quant à la filtration des différentes phases après traitement : cette méthode, bien que permettant une bonne séparation du mortier et des granulats parents, est à l'origine d'une importante perte de matériaux ne permettant pas une mesure précise de la quantité de mortier présent dans le matériau.
- D'autre part, cette technique, même si elle permet une dissolution franche de la phase cimentaire, ne garantit pas la préservation des granulats. En effet, la réaction chimique de l'acide chlorhydrique avec des granulats calcaires est à l'origine de la formation de chlorure de calcium et de dioxyde de carbone. Il n'est donc envisageable de n'utiliser cette technique qu'avec des bétons donc les granulats sont inertes chimiquement, c'est-à-dire siliceux.

Les résultats des essais de détermination de la quantité de mortier accolé à l'aide du protocole d'usure mécanique basé sur l'essai Micro Deval à sec ont ensuite conduit aux résultats détaillés ci-après.

Dans une première approche, le calcul est fait par différence de pesée avant et après usure au micro Deval pour les différents temps d'application et les différents refus pour plusieurs lots de granulats.

A ce niveau, la difficulté est d'une part de déterminer le tamis à considérer comme sélectif vis-à-vis du seul granulat parent (notamment pour les sables) et, d'autre part, de fixer le temps de tamisage de façon à enlever tout le mortier accolé sans détériorer le granulat d'origine. De plus, il n'est possible d'accéder qu'aux proportions massiques, l'accès aux proportions volumiques nécessitant la connaissance des masses volumiques du granulat parent et du mortier accolé.

Les résultats présentés Figure 71 conduisent à des taux de teneur en mortier dont l'estimation varie entre 5 et 15 % pour un même matériau (GR4) selon le temps d'application de l'usure.

En plus d'intégrer une part de granulat parent (usé par l'essai) dans l'estimation de la quantité de mortier, cette méthode ne garantit pas que tout le mortier ait été enlevé.

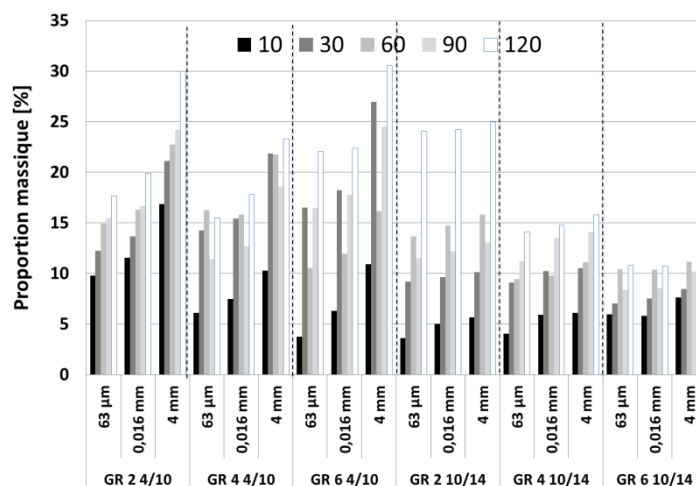


Figure 71 : proportion massique de mortier accolé obtenue par comparaison pesées

C'est pourquoi dans une deuxième approche, les résultats ont été post traités par comparaison des masses volumiques avant et après traitement. Ainsi, les proportions (massique et volumique) respectivement de matériau accolé et de granulat parent par rapport à la masse totale de l'échantillon sont obtenues. Ces rapports sont exprimés (voir Tableau 45) d'une part selon les différents temps de traitement mécanique et d'autre part en fonction du choix du matériau accolé (mortier, micro-mortier ou pâte de ciment)

On constate que, bien que donnant une première estimation de la quantité de mortier, les essais menés selon ce deuxième traitement ne permettent pas de déterminer précisément cette valeur.

- D'une part, comme précédemment, l'observation des échantillons traités confirme la difficulté d'obtenir la séparation complète (après détachement), et ce qu'elle que soit la durée du traitement. C'est pourquoi l'obtention de la séparation complète granulat parent/mortier est contrôlée par comparaison des masses volumiques du granulat traité et du granulat parent lorsque celle-ci est connue. Comme présenté Tableau 44 pour le granulat GR6, il ressort que cette séparation n'est pas complète

Pour le matériau 10/14 mm traité, le traitement a conduit à une différence de 7% entre les masses volumiques du granulat traité et du granulat recyclé avant traitement, mais il subsiste une différence de 5,3% avec celle du granulat parent

Pour le matériau 4/10 mm traité, le traitement a conduit à une différence de seulement 2% entre les masses volumiques du granulat traité et du granulat recyclé avant traitement, et il subsiste une différence de 9,7% avec celle du granulat parent et l'écart type est important, parfois le traitement a donc été inefficace sur cette classe.

Tableau 44 Efficacité du traitement Micro Deval

	Masse volumique G_{recycl}	Masse volumique G_{parent}	$(G_{\text{parent}} - G_{\text{traité}}) / G_{\text{parent}}$	$(G_{\text{recyclé}} - G_{\text{traité}}) / G_{\text{recycl}}$
GR6 4-10 mm	2 300 kg/m ³	2600 kg/m ³	9,74 ± 1,91	-2,03 ± 2,16
GR6 10-14 mm	Moyenne sable/gravillon/gravier		5,33 ± 1,51	-7,01 ± 1,71

- D'autre part, tous ces essais se heurtent au manque de connaissance de la constitution du matériau accolé et/ou des propriétés du granulat parent.

En effet, l'exploitation indirecte proposée est basée sur la différence de masse volumique entre le matériau accolé et les granulats parents et nécessite la connaissance de leurs propriétés, puisque nous faisons l'hypothèse que le granulat traité a été endommagé et qu'une mesure de sa masse après essai n'est pas représentative. En effet, si l'on poursuit les traitements jusqu'à stabilisation de la masse volumique des éléments restant, le volume retiré au matériau ne sera pas uniquement constitué de mortier mais également de particules de granulats arrachées par abrasion (cas de l'échantillon traité pendant 120 minutes). La masse volumique de ce matériau accolé ne peut être qu'estimée en faisant différentes hypothèses quant à sa composition (mortier, micro-mortier, pâte de ciment, etc.). Cette hypothèse engendre un biais qu'il n'est pas possible de quantifier. On constate, à l'aide du Tableau 45 que l'hypothèse choisie influence fortement les résultats des calculs proportions granulat et de mortier accolé.

L'ensemble des essais menés constitue une première approche de la détermination de la quantité de mortier contenue dans les granulats recyclés. Cependant, ces procédés sont incomplets et la précision limitée de ces analyses, qu'elles soient basées sur un principe chimique ou mécanique, ne permettent pas d'atteindre une efficacité satisfaisante.

D'autres solutions sont donc à envisager, notamment en combinant des protocoles mécaniques et thermiques.

Une autre approche consiste à estimer la quantité de mortier résiduel, uniquement à partir de la connaissance des caractéristiques des granulats parents et du béton parent (composition et masse volumique). Ainsi Dao (Dao, 2012) propose le modèle suivant :

$$Gnat_{GRB} = \frac{(\rho_{GRB} - \rho_{Bparent}) + (\rho_{Gparent} - \rho_{GRB}) \times Gnat_{Bparent}}{\rho_{Gparent} - \rho_{Bparent}}$$

Équation 11

Avec $Gnat_{GRB}$ = proportion volumique de granulat naturel dans le GRB ; ρ_{GRB} = masse volumique du GRB ; $\rho_{Bparent}$ = masse volumique du granulat parent ; $\rho_{Gparent}$ = masse volumique du granulat naturel parent ; $Gnat_{parent}$ = proportion volumique de granulat naturel parent tiré de la composition

Cette approche simplifiée considère que les proportions relatives de pâte et de granulat peuvent évoluer entre le béton parent et le granulat recyclé sans que la granulométrie du granulat d'origine ne soit modifiée.

Ainsi dans notre cas, (GR6)

$\rho_{GRB} = 2300 \text{ kg/m}^3$; $\rho_{Bparent} = 2400 \text{ kg/m}^3$; $\rho_{Gparent} = 2685 \text{ kg/m}^3$ (moyenne pondéré des masses volumiques sable, gravillon et gravier naturels) ; $Gnat_{parent} = 67\%$

On obtient $Gnat_{GRB} = 55\%$ de granulat naturel soit 45% de mortier ou pâte résiduelle en proportion volumique. Cette valeur est très supérieure à celle obtenue expérimentalement Tableau 45 qui est au maximum de 30%.

Cet écart s'explique par le rendement du traitement mécanique par usure qui ne permet pas d'ôter la totalité du mortier et par l'hypothèse simplificatrice de conservation du squelette granulaire du granulat naturel après le concassage. De plus, le matériau résiduel n'est pas constitué uniquement de pâte mais aussi d'une part de sable, ce qui a tendance à augmenter sa proportion.

Tableau 45 : Quantité de mortier accolé - Essai Micro-Deval granulats GR4- 10/14 mm

	Durée d'essai (min)	10			30			60			90			120		
		>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	
	Fraction analysée (mm)	0,063	1,6	4	0,063	1,6	4	0,063	1,6	4	0,063	1,6	4	0,063	1,6	4
	ordGP [g/cm3]	2,32	2,31	2,31	2,31	2,32	2,33	2,31	2,33	2,36	2,35	2,36	2,35	2,43	2,43	2,45
	WGP	4,71	5,84	5,45	5,08	5,46	5,1	5,35	5,19	5,06	3,65	4,81	4,8	4,08	4,06	3,83
	ordGR [g/cm3]	2,3			2,3			2,3			2,3			2,3		
	WGR	5,31			5,31			5,31			5,31			5,31		
Hypothèse Pâte de ciment	ordpc [g/cm3]	1,93			1,93			1,93			1,93			1,93		
	Wpc	12,81			12,81			12,81			12,81			12,81		
	VM/VGR (%)	5,13	2,63	2,63	2,63	5,13	7,50	2,63	7,50	13,95	11,90	13,95	11,90	26,00	26,00	28,85
	VGP/VGR (%)	94,87	97,37	97,37	97,37	94,87	92,50	97,37	92,50	86,05	88,10	86,05	88,10	74,00	74,00	71,15
	MM/MGR (%)	4,30	2,21	2,21	2,21	4,30	6,29	2,21	6,29	11,71	9,99	11,71	9,99	21,82	21,82	24,21
	MGP/MGR (%)	95,70	97,79	97,79	97,79	95,70	93,71	97,79	93,71	88,29	90,01	88,29	90,01	78,18	78,18	75,79
Hypothèse Micro-mortier	ordµm [g/cm3]	1,7			1,7			1,7			1,7			1,7		
	Wµm	19,36			19,36			19,36			19,36			19,36		
	VM/VGR (%)	3,23	1,64	1,64	1,64	3,23	4,76	1,64	4,76	9,09	7,69	9,09	7,69	17,81	17,81	20,00
	VGP/VGR (%)	96,77	98,36	98,36	98,36	96,77	95,24	98,36	95,24	90,91	92,31	90,91	92,31	82,19	82,19	80,00
	MM/MGR (%)	2,38	1,21	1,21	1,21	2,38	3,52	1,21	3,52	6,72	5,69	6,72	5,69	13,16	13,16	14,78
	MGP/MGR (%)	97,62	98,79	98,79	98,79	97,62	96,48	98,79	96,48	93,28	94,31	93,28	94,31	86,84	86,84	85,22
Hypothèse Mortier	ordm [g/cm3]	1,98			1,98			1,98			1,98			1,98		
	Wm	10,03			10,03			10,03			10,03			10,03		
	VM/VGR (%)	5,88	3,03	3,03	3,03	5,88	8,57	3,03	8,57	15,79	13,51	15,79	13,51	28,89	28,89	31,91
	VGP/VGR (%)	94,12	96,97	96,97	96,97	94,12	91,43	96,97	91,43	84,21	86,49	84,21	86,49	71,11	71,11	68,09
	MM/MGR (%)	5,06	2,61	2,61	2,61	5,06	7,38	2,61	7,38	13,59	11,63	13,59	11,63	24,87	24,87	27,47
	MGP/MGR (%)	94,94	97,39	97,39	97,39	94,94	92,62	97,39	92,62	86,41	88,37	86,41	88,37	75,13	75,13	72,53

3 Synthèse et analyse critique des résultats sur GRB

3.1 Validation et adaptation des protocoles d'essais

Un des premiers objectifs de cette étude sur les GRB était d'identifier, parmi les protocoles d'essais utilisés couramment pour caractériser les granulats, quels étaient ceux qui nécessitaient une adaptation soit au niveau de la réalisation de l'essai, soit au niveau de son exploitation. Dans cette continuité, un autre des objectifs était de proposer des protocoles d'essais complémentaires pour caractériser les propriétés spécifiques des GRB.

Le premier point à souligner concerne le séchage des granulats préalable à la plupart des essais, la température est limitée à 65°C pour les granulats recyclés afin d'éviter toute évolution et/ou détérioration minéralogique du matériau.

Il a aussi été montré que l'analyse granulométrique par tamisage seule est incomplète et qu'elle doit être réalisée à sec. Elle doit être complétée par une analyse granulométrique des éléments fins (inférieurs à 500 μm) par une technique adaptée (laser). La détermination de leur teneur est fortement erronée lors de l'analyse par tamisage. Le tamisage doit être fait à sec pour éviter toute agglomération de matière et l'interprétation de cette analyse devrait intégrer une différenciation des masses volumiques entre fraction granulaire et donc être présentée en volume. De plus le calcul approché d'une surface sphérique de grain, souvent fait à partir d'un diamètre moyen de tamis, est remise en cause, surtout pour les granulats recyclés pour lesquels les critères de circularité et de convexité indiquent que la géométrie de ce matériau est plus éloignée de la sphère que celles des granulats naturels.

Il est proposé de compléter l'exploitation de l'analyse granulométrique des sables non seulement par la détermination habituelle du module de finesse mais également par le calcul du coefficient d'uniformité, très différent pour les matériaux recyclés et donc critère discriminant.

Enfin certains critères morphologiques notamment la circularité ou la convexité constituent un apport utile lorsque, par exemple, une surface spécifique de grain équivalente est recherchée.

Le protocole de détermination du coefficient d'absorption doit être modifié afin d'une part de prolonger le temps d'immersion pour garantir l'état saturé et d'autre part de sécher en surface les granulats sans détériorer le matériau par arrachement du mortier accolé. De plus une étude de la cinétique d'absorption est utile à la détermination de ce temps de saturation et à la caractérisation des phases d'absorption et de résorption potentielle, sous réserve qu'une agitation intermédiaire du matériau immergé soit pratiquée afin de garantir l'accès de l'eau à tous les espaces inter granulaires. Elle pourrait être complétée par un suivi de la désorption par succion (simulation du contact ciment-granat saturé) mais ce protocole de mesure de la désorption n'est pas finalisé.

La détermination des résistances à l'usure et à la fragmentation n'est pas systématiquement faite sur les granulats avant la réalisation des bétons, notamment la résistance à l'usure. Pourtant cet essai permet d'évaluer une usure lors du malaxage et donc une évolution du squelette granulaire.

La réalisation d'un essai au bleu de méthylène ou d'un essai d'équivalent ne sable n'est pas pertinente pour évaluer la propreté d'un granulat recyclé, seule la présence de fines argileuses potentiellement gonflantes étant identifiée par ces mesures.

Une étude complémentaire de la réactivité à l'eau des granulats recyclés et notamment des fines est suggérée lorsqu'il est envisagé de considérer celles-ci comme addition. La détermination d'un indice d'activité est alors à réaliser, le taux de substitution au ciment devra être déterminé car à ce jour la notion « d'additions recyclés » n'existe pas. Il est aussi nécessaire dans ce cas de déterminer la masse volumique absolue des éléments fins par une méthode similaire à celle utilisée pour les ciments. Dans le cas où les éléments fins font partie intégrante du squelette granulaire, il n'est pas nécessaire d'évaluer cette réactivité à l'eau.

Enfin, la détermination de la quantité de mortier accolé est un essai qui semble nécessaire car cette teneur en mortier influe la plupart des propriétés des granulats recyclés. Cependant, la réalisation d'un essai qui garantisse que la totalité du matériau accolé et seulement ce matériau soit non seulement détaché mais séparé du granulat parent n'est pas triviale et le protocole doit encore être amélioré. Un contrôle de la qualité du granulat après traitement est indispensable.

Une synthèse des modifications de protocoles et/ou d'interprétation et des propositions de nouveaux essais est présentée Figure 72.

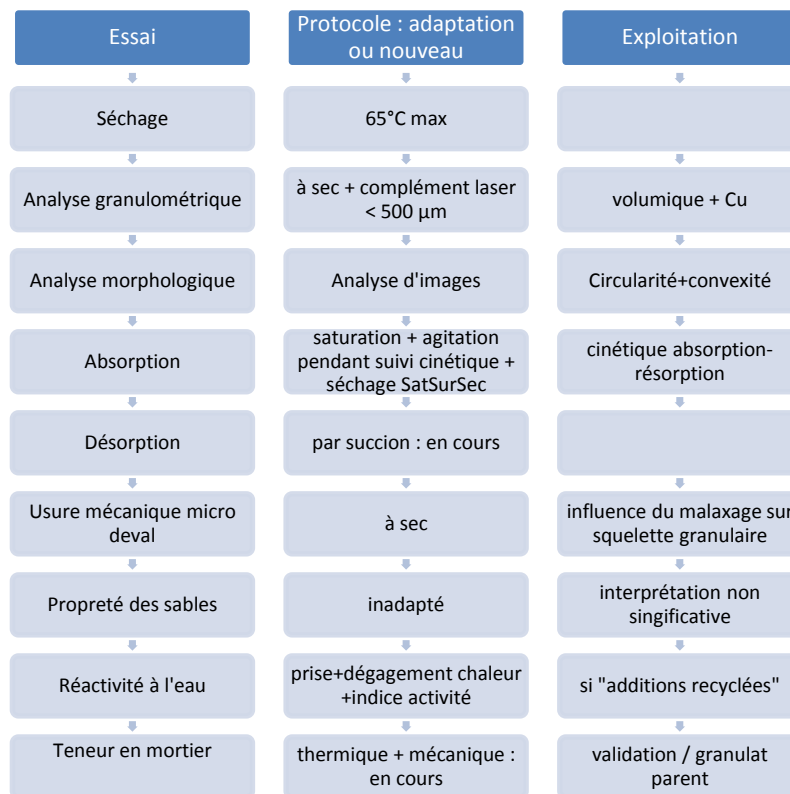


Figure 72 Validité des protocoles normalisés et usuels de caractérisation des granulats

3.2 Synthèse et analyse des propriétés spécifiques et interactions : influence sur les BGR

3.2.1 Analyse croisée entre propriétés et spécificités

3.2.1.1 Propriétés vs absorption/teneur en mortier résiduel

Contrairement aux granulats naturels, les granulats recyclés de béton présentent la particularité de contenir du mortier et de la pâte de ciment résiduels qui influencent plusieurs de leurs propriétés, notamment une absorption élevée et induisent la présence de fines en quantité élevée.

La modification, liée à la présence de mortier, des propriétés des granulats (hors fines) est en majorité due à la modification de la porosité du granulat. Cette dernière est directement reliée à l'absorption par (Dao, 2012):

$$p = \frac{\rho_{rd}}{\rho_e} \times W_A$$

Équation 12

Avec p : porosité = rapport entre le volume des vides et le volume total ; ρ_{rd} et ρ_e , respectivement masse volumique réelle du matériau sec et masse volumique de l'eau (kg/m^3) ; W_A = coefficient d'absorption = rapport entre la masse d'eau qui remplit les vides et la masse du matériau sec.

Cette relation considère que tous les pores sont accessibles à l'eau, ce qui peut être considéré vrai lorsque la durée de saturation est prolongée.

En considérant $\rho_e = 1000 \text{ kg/m}^3$, p est directement fonction de W_A et ρ_{rd} .

Comme cela a été présenté précédemment, la masse volumique réelle et le coefficient d'absorption sont corrélés puisque à un coefficient plus élevé correspond une masse volumique plus faible tel qu'illustré Figure 73, pour tout granulat (GNC, GNR, GR) de toute fraction granulaire (sable, gravillon, gravier).

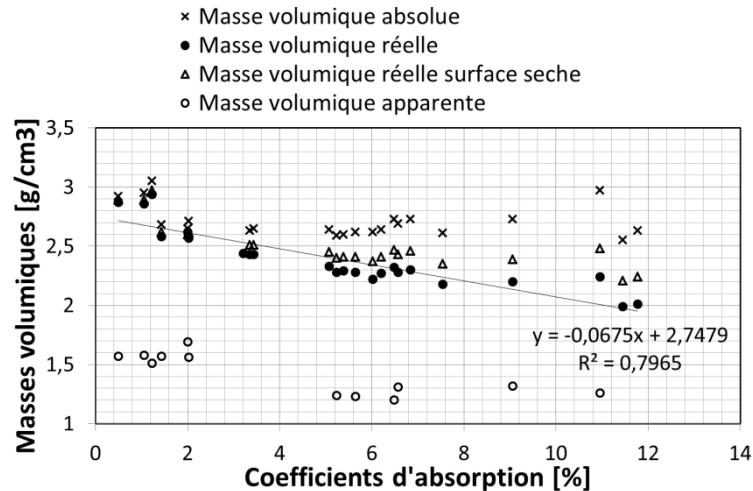


Figure 73 corrélations masses volumiques vs coefficient d'absorption

La corrélation linéaire est suffisamment significative pour que la fonction puisse être intégrée à l'Équation 12. Ainsi la porosité et l'absorption sont reliées par la fonction ci-dessous illustrée

$$p(\%) = -0,068 \cdot W_A^2 + 2,75W_A$$

Équation 13 relation porosité vs absorption

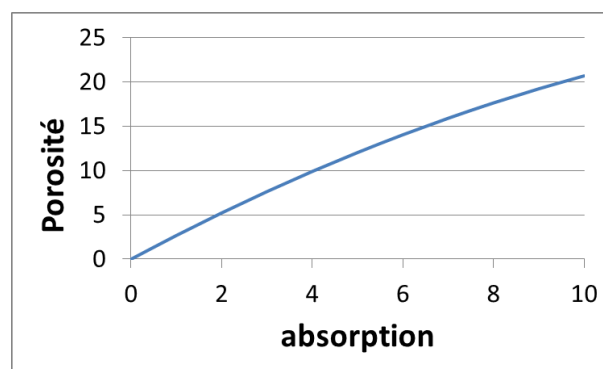


Figure 74 Relation porosité vs absorption selon Équation 13

Ainsi, dans les figures qui suivent, les relations entre les propriétés et le coefficient d'absorption sont présentées.

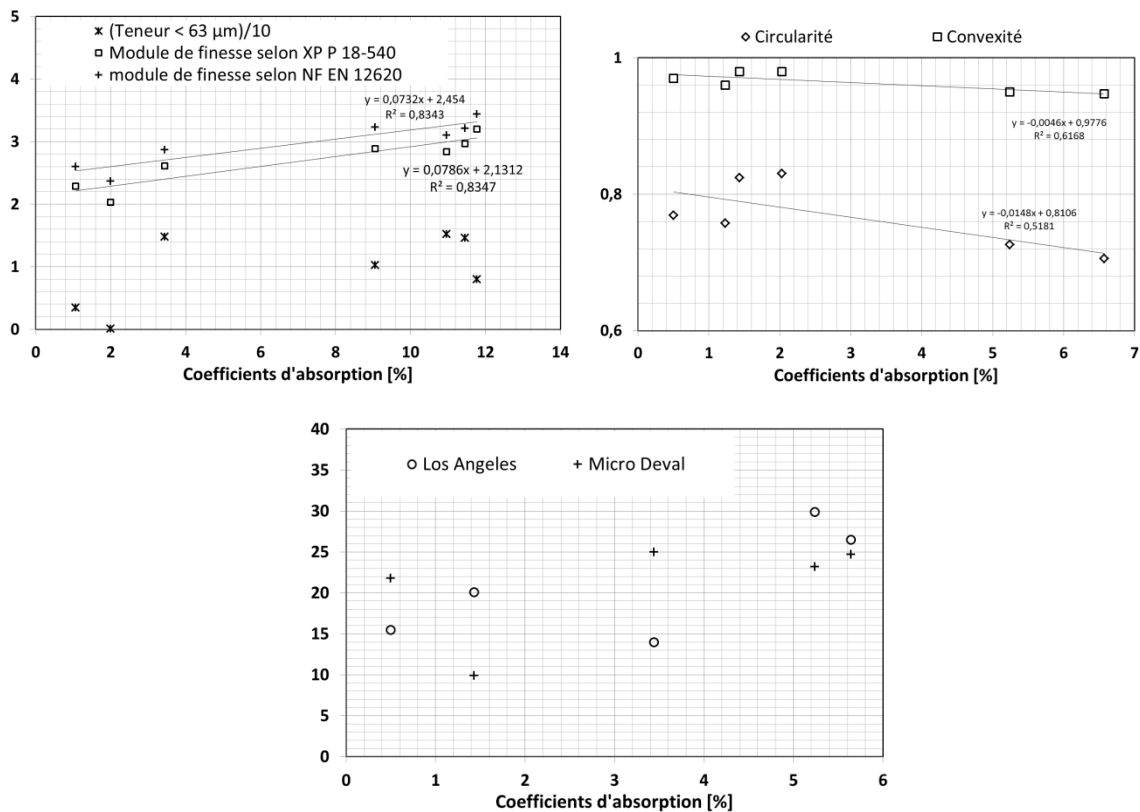


Figure 75 Relations entre propriétés et coefficient d'absorption

De bonnes corrélations sont observées entre les modules de finesse et le coefficient d'absorption : un coefficient d'absorption élevé correspond à un module de finesse plus élevé, soit à un sable globalement plus grossier, ce qui indique que les éléments plus grossiers du sable pourraient être composés de mortier résiduel. Par contre, il n'est pas observé de corrélation évidente entre la teneur en éléments fins et le coefficient d'absorption des sables.

Les critères de convexité et circularité présente une corrélation avec le coefficient d'absorption (baisse des critères lorsque le coefficient augmente) mais pour les valeurs faibles du coefficient d'absorption (granulats naturels), d'autres facteurs interviennent (entre GNR et GNC).

Les propriétés mécaniques ne sont pas directement liées au coefficient d'absorption.

Pour conclure sur la relation teneur en mortier résiduel/propriétés des GR, il faudrait disposer d'une méthode fiable de détermination de la teneur en mortier et la relier au coefficient d'absorption. Or nous avons montré dans cette étude qu'il était assez difficile d'obtenir une estimation d'une teneur en mortier fiable par des procédés mécaniques seuls ou chimique à l'acide chlorhydrique. D'autres auteurs ((Dao, 2012), (Zhao, 2014b)) ont proposé soit une estimation de cette quantité de mortier à partir de la connaissance du béton parent, soit une évaluation de la quantité de pâte par traitement à l'acide salicylique. La première solution est intéressante mais nécessite un recueil d'informations non disponibles

pour les granulats industriels tel le GR4. La méthode de détermination par attaque à l'acide donne des résultats satisfaisants selon l'auteur mais n'a été appliquée qu'au sable et ne préserve pas d'une dissolution partielle des granulats parents. Les résultats obtenus dans notre étude, même s'ils ne permettent pas de garantir que tout le mortier présent ait été ôté, indiquent que la quantité de mortier présent diffère selon la granulométrie du granulat recyclé et son lot d'origine. Ce thème est poursuivi au sein du laboratoire (en partenariat avec le laboratoire IJL de Nancy) dans le cadre du Projet National Recybéton.

La présence de mortier et de pâte de ciment dont la porosité à l'eau est plus élevée que celle des granulats naturels induit une quantité d'eau absorbée plus grande pour les granulats recyclés. En effet les cinétiques d'absorption des granulats recyclés se singularisent fortement de celles des granulats naturels, 80% de l'absorption se produit dans les 10 premières minutes, Tam et al. (Tam et al., 2012) ont obtenus des résultats similaires. L'importante influence de l'agitation des granulats recyclés sur leur absorption est due à leur morphologie particulière induisant une rétention importante d'air qui est évacuée lors de l'agitation et remplacée par l'eau.

3.2.1.2 *Morphologie et surface spécifique vs Analyse granulométrique*

Les particularités morphologiques de GR en comparaison des GN sont identifiées sur les trois critères : circularité, convexité et périmètre. Les critères de longueur et d'allongement ne sont pas spécifiques pour les GR. Il peut être rappelé ici que la classification granulaire établie à partir de l'analyse granulométrique par tamisage, n'est pas représentative de la taille réelle des granulats, et ceci quel que soit le type de granulat. Cette remarque est illustrée Figure 76 sur laquelle, d'une part une comparaison du diamètre moyen $(d_1+d_2)/2$ calculé à partir de la courbe granulométrique habituellement utilisé avec le diamètre moyen réel $(L+l+e)/3$ déterminé par mesure directe est représenté (une droite $y=x$ correspond à une corrélation parfaite entre les deux estimations du diamètre moyen). Il n'y a pas de différence marquée entre les granulats recyclés et naturels. D'autre part la corrélation entre le périmètre calculé à partir des diamètres D_1 et d_2 et le périmètre réel déterminé par analyse d'image est représenté Figure 76. Ici aussi, les écarts sont importants et indiquent que le calcul d'une telle grandeur à partir de l'analyse granulométrique induit un biais, mais dans le cas du périmètre, ce biais est plus important pour le granulat recyclé, le périmètre étant un critère discriminant pour le granulat recyclé.

Cet écart entre les estimations des périmètres influe directement les écarts entre estimations de surfaces spécifiques des grains tel qu'illustré Figure 77. Dans ce cas, le GR se distingue des GN et un écart moyen de 13% en surface, sur la plage granulaire étudiée (4/20mm), est observé entre le GNC et le GR4.

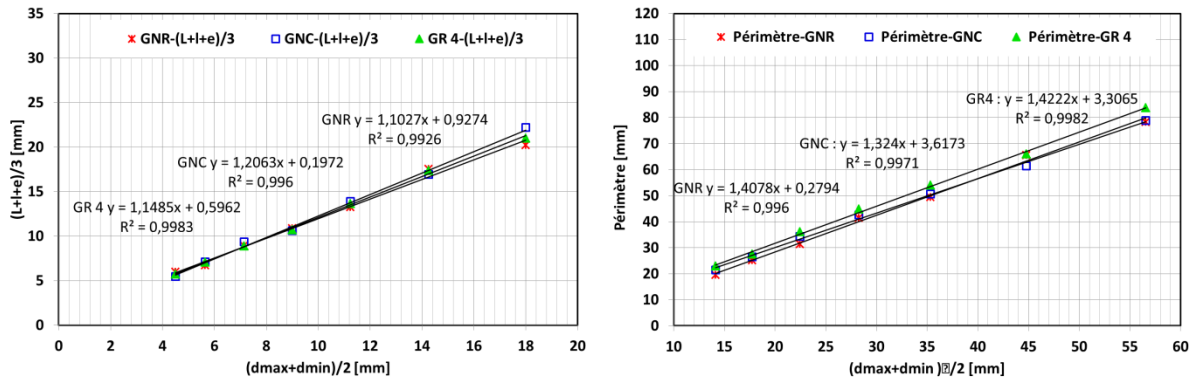


Figure 76 Corrélation entre estimations des diamètres moyens et des périmètres de particules

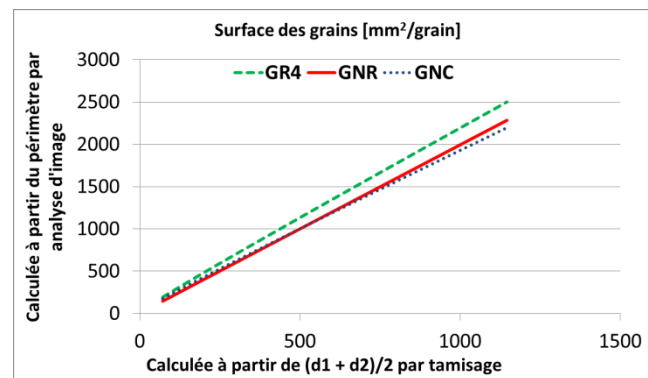


Figure 77 Ecart d'estimation des surfaces spécifiques

3.2.2 Validité des modèles analytiques de grandeurs physiques et mécaniques

Tel qu'évoqué précédemment les modèles analytiques d'estimation de la teneur en pâte proposé par Dao(Dao, 2012) ne sont applicables que lorsque les propriétés et la composition du béton parent sont connues très précisément et ils sont basés sur une hypothèse simplificatrice de modèle pâte + granulat. Nous avons montré que l'applicabilité de ce modèle pour les granulats recyclés dont nous disposons n'était pas directe.

Les autres modèles analytiques proposés (pour une estimation de masse volumique, absorption, LA et MD) nécessitent également la connaissance des propriétés des matériaux parents. Concernant le modèle analytique d'estimation de la masse volumique et du coefficient d'absorption, Dao(Dao, 2012) propose d'utiliser une valeur forfaitaire de perte de pâte qui justifie une différence de masse volumique entre le béton parent et les granulats recyclés observée. Cette perte de pâte forfaitaire a été déterminée en amont par la comparaison des propriétés entre matériaux parents et matériaux recyclés. Cependant, il n'est pas possible d'utiliser cette approche dans l'étude présentée ici car nous n'observons pas une augmentation de la masse volumique entre le béton parent (2400 kg/m³ pour le béton parent du GR6 de résistance mécanique 30,9 MPa) et les granulats recyclés (2300 kg/m³ pour le GR6) comme dans le cas de l'étude de Dao. Ceci s'explique d'une part, par le procédé de concassage et broyage utilisé qui s'est déroulé en intérieur et n'a pas généré de perte de poussière et d'autre part, par la fragilisation du mortier résiduel lors du concassage

qui provoque des fissures et augmente donc la porosité accessible à l'eau donc la diminution de la masse volumique réelle sur matériau sec. Le modèle proposé n'est donc pas applicable à notre étude.

3.2.3 Influence sur la prédiction des propriétés des BGR

Le comportement d'absorption des granulats recyclés, notamment la désorption post-agitation suivie d'une reprise de l'absorption, apparaît suffisamment différent de celui des granulats naturels pour remettre en cause, pour les granulats recyclés utilisés pour la fabrication de bétons, la notion d'eau efficace et d'eau d'absorption (définies dans la norme NF EN 206) à la base des méthodes classiques de formulation. En effet, on considère habituellement que dans une gâchée, l'eau absorbée par les granulats n'est plus disponible pour l'hydratation des phases cimentaires. De plus, lors de la mise en œuvre des bétons, l'ajout de ciment au contact des granulats est susceptible de créer une désorption locale et donc de modifier cette cinétique d'absorption. Ce phénomène de désorption-réabsorption sera étudié dans le chapitre 3, par étude de conditions de malaxage différentes, pour définir son influence lors de la mise en œuvre des bétons, c'est à dire sur l'ouvrabilité du matériau et son maintien de l'ouvrabilité, puis à plus long terme, comment cette désorption-réabsorption influence les résistances mécaniques : positivement par effet de « cure interne », ou négativement par augmentation de la porosité.

La présence d'éléments fins doit être identifiée par analyse laser complémentaire à l'analyse par tamisage. La grande quantité de ces éléments fins inférieurs à 100 μm ou 63 μm incite à se poser la question de leur conservation dans les bétons et dans le cas de leur conservation de la façon dont ils seront considérés, ce point sera abordé au chapitre 3. L'étude de leur réactivité a montré que celle-ci lorsqu'elle existait a un effet du second ordre sur les propriétés mécaniques et bétons. Elle ne sera donc pas prise en compte dans les paramètres d'étude du chapitre 3. Par contre la sous-estimation de la quantité d'éléments fins par la méthode traditionnelle d'analyse par tamisage modifie les grandeurs telles que et le module de finesse utilisé dans les méthodes de formulation des bétons.

De même il est habituellement reconnu que la compacité des bétons dépend des trois paramètres suivants :

- Squelettes granulaires (ou courbe granulométrique massique)
- Forme des grains
- Quantité d'énergie du malaxage pour réaliser l'empilement granulaire

Par la suite, la recherche d'un squelette granulaire idéal du béton est faite selon les différentes méthodes traditionnelles évoquées dans le chapitre 1. Elle aboutit au choix d'une proportion entre sables, gravillons et graviers.

Au vu des résultats présentés dans ce chapitre (masses volumiques fonction de la classe granulaire, présence de fines, morphologie particulière, influence d'un malaxage et

résistances à l'usure,...) il est légitime de se poser la question du bien-fondé de cette approche dans le cas des granulats recyclés. C'est pourquoi des modifications pour la détermination du squelette granulaire seront proposées pour l'étude des bétons au chapitre 3.

Par ailleurs, les résultats de résistances mécaniques à l'usure et à la fragmentation ainsi que l'influence du malaxage sur l'évolution du squelette granulaire justifient d'une étude particulière sur les conditions de malaxage et leur influence sur les propriétés des bétons, un malaxage à sec étant au vu des résultats à proscrire car générant une modification du squelette trop importante pour les granulats recyclés.

Enfin, l'écart d'estimation de la surface spécifique des grains, sera pris en compte lors de la réalisation de mortier de bétons équivalents au chapitre 3.

Conclusion du Chapitre 2

L'utilisation de granulats de bétons recyclés est aujourd'hui limitée de par leur comportement et influence sur le matériau qui diffère notablement de ceux de granulats roulés traditionnels. Les résultats présentés dans ce chapitre ont ouvert des perspectives concernant l'approfondissement des connaissances sur les qualités des granulats recyclés et les méthodes expérimentales associées.

Plusieurs propositions d'adaptations aux méthodes expérimentales existantes ou d'utilisation d'essais complémentaires ont été faites. Parmi les nouveaux protocoles, nous pouvons citer l'étude de la morphologie par analyse d'image, de la réactivité des granulats, et de la cinétique d'absorption et de désorption.

L'origine des GR implique une réflexion autour, d'une part, des définitions normalisées d'eau efficace et de demande en eau et d'autre part, de la classification des éléments fins. L'interprétation des courbes granulométriques faite pour la détermination du choix du squelette idéal des bétons doit aussi être ajustée, notamment en ce qui concerne le module de finesse et la surface spécifique.

Les différences de propriétés observées pour les GR sont liées majoritairement à la présence de mortier et modifient les propriétés du béton. Ainsi, les résultats obtenus justifient une analyse de l'adaptation des méthodes de formulation pour obtenir des bétons de granulats recyclés de propriétés équivalentes à celles des bétons de granulats naturels, ce qui est proposé dans le chapitre suivant. Cependant, une grande partie des bétons présentés dans le chapitre 3 suivant ont été réalisés avant l'obtention de tous les résultats sur GRB, ainsi tous les éléments évoqués ici n'ont pas pu être pris en compte lors de la détermination de la composition du BGR initial.

Chapitre 3 – Les Bétons de Granulats Recyclés et leurs méthodes de formulation

Introduction

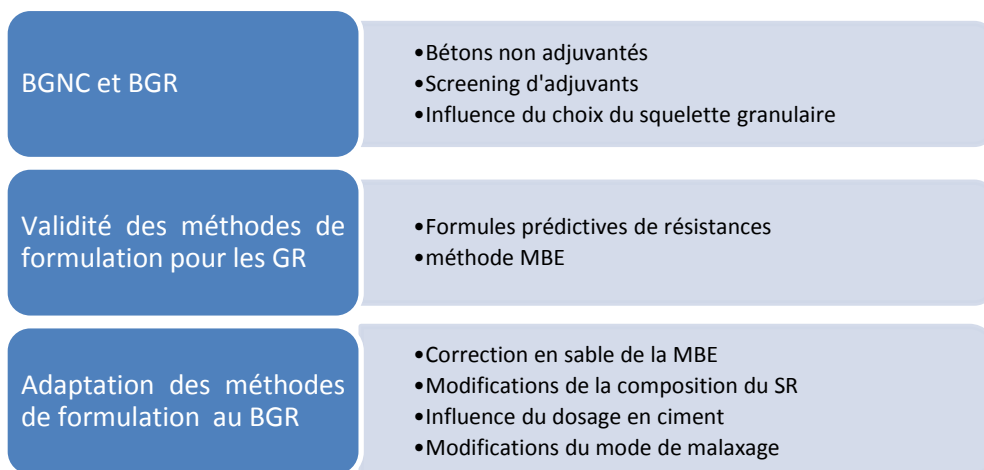
Ce chapitre est consacré à l'étude des propriétés aux états frais et durci de bétons et mortiers de granulats recyclés et naturels. Les BGR sont composés à 100% de matériaux recyclés, les éléments fins étant conservés. En ce qui concerne leur composition, il a été décidé de rapprocher le plus possible les squelettes des granulats naturels concassés et recyclés, ce choix est justifié dans le chapitre.

Premièrement, les propriétés à l'état frais et durcis de BGNC et BGR sont comparées avant une recherche d'optimisation des propriétés du BGR à l'état frais. Pour cela une recherche d'adjuvants efficaces vis-à-vis de l'ouvrabilité du béton et surtout de son maintien dans les premières heures est réalisée. L'efficacité de ces adjuvants pour les BGR sera comparée à celle obtenue pour les BGNC.

La validité des modèles prévisionnels de résistances mécaniques et l'applicabilité de la méthode MBE (Mortiers de Bétons Equivalents) pour les granulats recyclés sont étudiées.

Ensuite, des propositions de modifications du choix des paramètres de formulation et d'amélioration des procédés de mise en œuvre des bétons et mortiers équivalents sont présentées. Ces dernières tiennent compte des spécificités des GR identifiées au chapitre précédent.

Afin de faciliter la lecture de ce chapitre, les étapes et paramètres d'étude des BGR sont résumés ci-dessous :



1 Compositions de BGR et méthodes expérimentales

1.1 Composition des bétons de références et mortiers équivalents

Dans cette partie de l'étude, des bétons de granulats naturels concassés et des bétons de granulats recyclés ont été comparés. L'utilisation d'adjuvants a été évaluée dans le but d'atteindre les objectifs d'ouvrabilité visés.

Remarque : Ces bétons ont été réalisés avant que l'ensemble des résultats sur GRB ne soient obtenus donc certaines hypothèses faites en première approche seront discutées par la suite.

1.1.1 Matériaux constitutifs

1.1.1.1 Granulats

Les granulats naturels concassés GRN, naturels roulés GNR et recyclés GR4 ont été utilisés pour cette partie de l'étude.

1.1.1.2 Ciment

Un ciment CEM I 52,5 N de l'usine Lafarge de Saint Pierre la Cour a été utilisé. Sa composition et ses caractéristiques sont données Tableau 46.

Un ciment Portland, non composé, a été privilégié afin de ne pas induire de paramètre supplémentaire dans l'analyse des résultats obtenus (interactions entre les composés du ciment et les granulats recyclés).

Tableau 46: Compositions et propriétés du ciment utilisé

Type de ciment CEM	I	
Classe	52,5	
Réactivité ou montée en résistance	Normale	
Masse volumique [g/cm ³]	3,05	
Surface spécifique [cm ² /g]	Blaine	3752 ± 99
	BET	11 700
% massique de clinker	95	
% massique d'addition	0	
Compositions chimiques des ciments (% massique)		
SO ₃	3,3 ± 0,063	
Cl	0,014 ± 0,002	
Alcalins équivalents	0,867 ± 0,044	
Propriétés mesurées		
Temps de début de prise [min]	138 ± 9,9	
Résistance à la compression à 1 jour [MPa]	25,5 ± 1,7	
Résistance à la compression à 2 jours [MPa]	35,9 ± 1,6	
Résistance à la compression à 28 jours [MPa]	59,6 ± 1,8	

1.1.1.3 Adjuvants

Les adjuvants, dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 47, ont été utilisés au cours des campagnes d'essais sur bétons et mortiers de béton équivalents. Ils ont été livrés par l'entreprise partenaire CHRYSO.

Tableau 47 : Caractéristiques des adjuvants utilisés

Dénomination de l'adjuvant	Dosage min et max recommandé	Action prévisionnelle	Natures chimiques	pH	Densité
EPB 897-001	0,6-1,6%	Faible réducteur d'eau, maintien d'ouvrabilité, retard	Solution aqueuse à base de phosphonate modifié	4	0,98
EPB 897-011	0,3-0,4%	Faible réducteur d'eau, maintien d'ouvrabilité, retard	Solution aqueuse à base de gluconates	6	1,05
EPB 897-013	0,6-1,4%	plus réducteur d'eau, fort réducteur d'eau, maintien d'ouvrabilité	Solution aqueuse à base de polycarboxylates modifiés	7	1,01
EPB 897-014	0,6-1,4%	fort réducteur d'eau, maintien d'ouvrabilité	Compositions à base de polycarboxylates modifiés	6	1,01
EPB 897-017	0,6-1,4%	fort réducteur d'eau, maintien d'ouvrabilité	Solution aqueuse à base de polynaphtalènes condensés	7,5	1,15
EPB 897-018	0,6-1,4%	fort réducteur d'eau, maintien d'ouvrabilité	Solution aqueuse à base de polymélanines condensées	11	1,12
EPB 897-025	Non communiqué			7,5	1,01
EPB 897-026				6,5	1,01
EPB 897-027				5	1,02
EPB 897-028				5	1,01
EPB 897-029				4	1,01

1.1.2 Compositions des bétons

Une composition théorique de bétons de granulats naturels concassés et une composition théorique de béton de granulats recyclés (100%) ont été déterminées dans un premier temps. Ces compositions de références ont ensuite été modifiées lors de l'étude de l'influence des paramètres de formulation et de mise en œuvre.

Les valeurs de masses volumiques utilisées dans les formulations des bétons sont celles qui ont été obtenues avec le premier protocole décrit au chapitre 2, ces valeurs ont été conservées tout au long de l'étude sur bétons, il n'a pas été fait d'ajustement, avec prise en compte des nouvelles valeurs trouvées avec le protocole amélioré, dans le but de conserver les mêmes compositions.

1.1.2.1 Dosages en eau et en ciment

Ils ont été déterminés à partir des objectifs du béton fixés :

- Classe de résistance visée : C25/30
- Consistance visée : S4 (obtenue par ajout d'adjuvant)
- Classe d'exposition : XC1

Remarque : cette classe d'exposition conduit à une valeur limite acceptable C20/25 selon la norme NF EN 206-1 ; comme nous utilisons un CEMI 52.5, nous conservons un objectif C25 /30 à la demande de l'industriel. Nous indiquerons sur les graphes la valeur visée correspondant au C20/25 comme valeur limite.

Selon la norme NF EN 206-1, ces objectifs conduisent à :

- Dosage minimal en ciment de 260 kg/m³
- Eeff/C maximal = 0,65,

Ces valeurs seront celles de l'étude, le dosage en ciment n'est pas défini à partir de modèles prévisionnels de résistance (Bolomey, Féret,..). Ce choix a été imposé par l'entreprise partenaire. L'objectif de résistance C25/30 est ainsi simplement contrôlé.

Afin de n'étudier que l'influence de la substitution du granulats naturel par le granulats recyclés, le rapport E/C et le dosage en ciment seront gardés constant pour tous les bétons.

Cependant, lors de la première partie de l'étude, un dosage en eau correspondant à un E/C 0,76 sera également proposé pour comparer l'influence du rapport E/C sur BGNC et BGR.

1.1.2.2 Choix du squelette granulaire et de la teneur en granulats

BGNC

La constitution du squelette granulaire théorique du béton de granulats naturel de référence a été réalisée en utilisant la méthode CES Dreux Gorisse (Détermination d'une courbe idéale appelée courbe OAB), choix justifié dans le chapitre précédent.

En effet, il a été montré que le malaxage des granulats recyclés même saturés conduit à une modification du squelette granulaire (Figure 78) et, de fait, du module de finesse. Ainsi il ne s'est pas avéré nécessaire de construire le squelette granulaire à partir des méthodes d'empilement granulaire optimal, cette optimisation étant remise en cause par le malaxage. Cette méthode simplifiée de Dreux Gorisse a été également appliquée aux granulats naturels concassés, puisque un des objectifs de l'étude est de comparer les propriétés des BGN et des BGR.

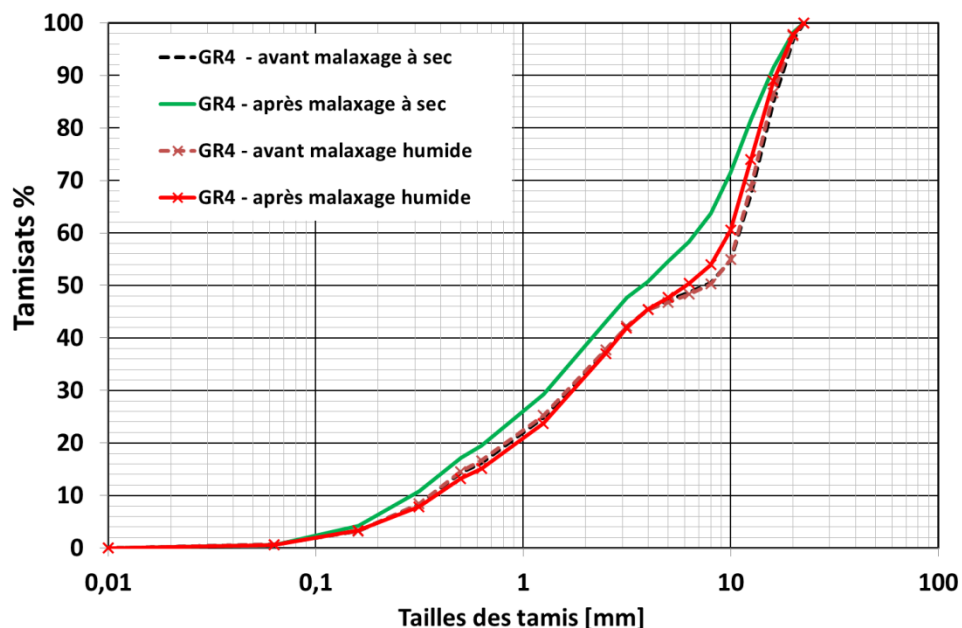


Figure 78 : Malaxage – Evolution du squelette granulaire

Les classes granulaires 0/4 mm, 4/10 mm et 6,3/20 mm de granulat naturel concassé ont été utilisées telles que livrées. Les hypothèses de mise en œuvre de ce béton de référence sont les suivantes :

- Type de vibration : normale
- Dosage en ciment : 260 kg/m³

Le squelette granulaire obtenu est donné Tableau 48.

Tableau 48 : squelette granulaire du béton de référence de granulats naturels

Fractions	Proportions massiques	proportions volumiques
0/4 mm	38,0%	39,3%
4/10 mm	9,0%	8,8%
6,3/20 mm	53,0%	52,0%

Afin de déterminer la composition volumique de la phase solide (ciment + granulats), une compacité prévisionnelle a été estimée. Pour cela des hypothèses sur les conditions de mise en œuvre et sur la consistance prévisionnelle du béton (non adjuvanté) ont été avancées. Les caractéristiques des granulats ont également été prises en compte. Une compacité prévisionnelle de 0,8 a ainsi été supposée. La composition théorique de béton obtenue est donnée Tableau 49

Tableau 49 : Composition théorique de bétons de granulats naturels concassés pour 1 m³

	Ciment	Fractions granulaires			Eau
		0/4 mm	4/10 mm	6,3/20 mm	
Composition béton massique (kg/ m ³)	260	724,36	171,56	1010,29	169
Masse volumique (kg/m ³)	3060	2580	2730	2720	1000
Composition béton volumique (m ³ /m ³)	0,085	0,281	0,063	0,371	0,169

BGR

Dans le but d'obtenir des compositions de bétons de granulats naturels et de bétons de granulats recyclés proches, les paramètres de composition ont été conservés : dosage en ciment, en eau, proportion volumique totale des granulats, compacité prévisionnelle.

Dans le même but, un squelette granulaire identique à celui du béton de granulats naturels a été recherché dans un premier temps pour le béton de granulats recyclés. Ainsi un « fitage » (voir Figure 79) du squelette granulaire du béton recyclé sur le squelette granulaire du béton naturel a été effectué par la méthode des moindres carrés à partir des courbes granulaires des sables, gravillons et graviers.

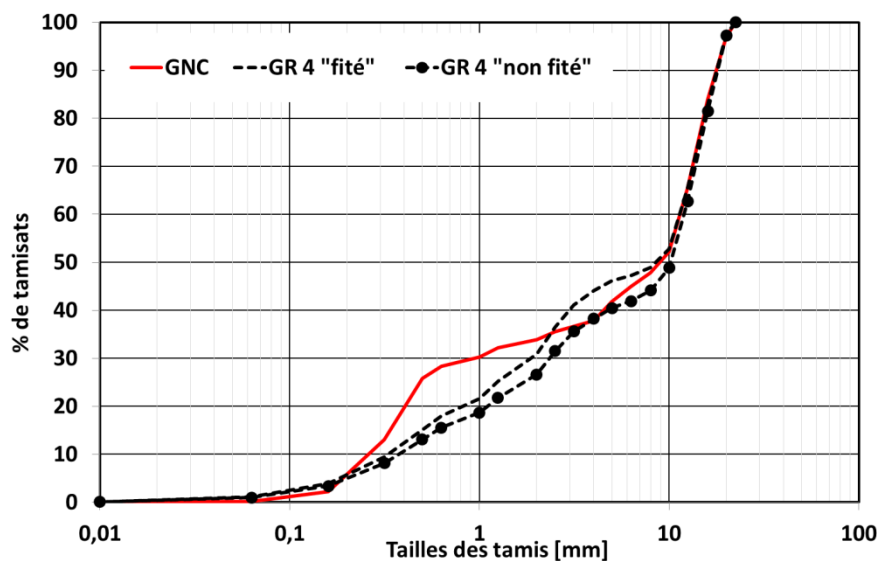


Figure 79: Fitage du squelette granulaire du béton de granulats recyclés sur celui de granulat naturels concassés

Le squelette granulaire ainsi obtenu est donné Tableau 50 et la composition théorique obtenue pour le béton de granulats recyclés est donnée Tableau 50.

Tableau 50: Résultats du squelette granulaire superposé

Fractions	Proportions massiques
0/4 mm	45,1%
4/10 mm	5%
10/20 mm	49,9%

Tableau 51: Composition théorique de bétons de granulats recyclés en kg pour 1 m³

	Ciment	Fractions granulaires			Eau
		0/4 mm	4/10 mm	10/20 mm	
Composition béton massique (kg/ m ³)	260	689,06	76,39	762,40	169
Masse volumique (kg/m ³)	3060	2000	2290	2260	1000
Composition béton volumique (m ³ /m ³)	0,085	0,345	0,033	0,337	0,169

Les compositions de bétons théoriques sont ensuite corrigées pour garantir une formulation à E_{eff}/C constant en fonction :

1. Du coefficient d'absorption des granulats
2. De la teneur en eau des granulats
3. De l'extrait sec des adjuvants

Par la suite, **des optimisations de la superposition du squelette granulaire de BGR** sur le BGNC ont été proposées en créant une coupe supplémentaire à 2 mm, 1 mm ou 500 μ m, représentées **Figure 80** et Tableau 52, l'optimisation a alors été faite sur la proportion 0/x mm et X/4 mm

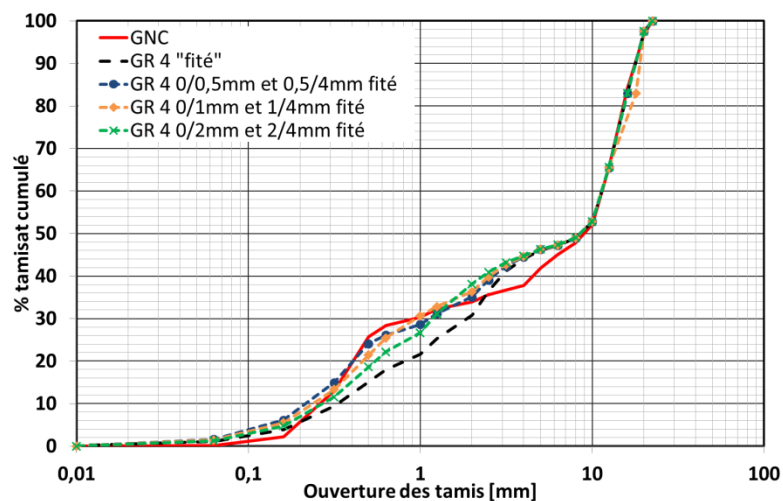


Figure 80: Superposition des squelettes granulaires selon les différentes coupes

Tableau 52: Résultats des valeurs de corrélations obtenus pour chaque granulométrie

Fractions granulaires [mm]	Valeur de l'indice de corrélation
0/4; 4/10 et 10/20	22,91
0/0,5 ; 0,5/4 ; 4/10 et 10/20	7,52
0/1 ; 1/4 ; 4/10 et 10/20	8,67
0/2 ; 2/4 ; 4/10 et 10/20	13,91

Les proportions massiques obtenues sont données Tableau 53. La composition du béton en annexe 9.

Tableau 53: Proportions des fractions intermédiaires du sable

Différentes fractions de GR 4	Coupe à 500 μm	Coupe à 1 mm	Coupe à 2 mm
0/X	24%	30,5%	38%
X/4 mm	21,1%	14,6%	7,1%

Seul le béton avec une coupe à 1mm sera réalisé, la quantité d'éléments inférieurs à 500 μm nécessaires à la réalisation d'un béton étant trop importante pour être obtenue pour le volume de béton mis en œuvre.

Enfin un squelette granulaire du béton de granulats recyclés non fité a été réalisé. Il conduit à une teneur en sable moindre tel que présenté Tableau 54.

Tableau 54 : squelette granulaire recyclé Dreux 0,75

Fractions	Proportions massiques	Proportions volumiques
0/4 mm	39%	41%
4/10 mm	7%	7%
10/20 mm	54%	52%

Deux compacités théoriques ont été proposées : 0,8 et 0,75. Les compositions de bétons obtenues sont données en annexe 9. Des tableaux récapitulatifs des paramètres et des compositions des bétons sont donné en annexe 9

1.1.3 Mortiers de bétons équivalents

Des mortiers de béton équivalent (MBE) ont été formulés selon la méthode décrite dans le PN Calibé (Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil (France), 2004).

Comme rappelé dans le chapitre 1, le principe de la formulation des MBE est basé sur l'obtention d'un mortier pour lequel la surface spécifique des grains du sable constitutif est identique à celle des granulats du béton auquel le mortier est équivalent.

En effet, pour réaliser un mortier de rhéologie à l'état frais équivalente à celle du béton, il fallait trouver une méthode pour déterminer la composition d'un mortier passant au tamis de 5mm, sans être obligé de faire un béton que l'on tamise, sinon tout l'intérêt de la méthode était perdu. Le simple retrait des éléments de taille supérieure à 5 mm n'est pas une solution satisfaisante car une partie de la pâte adhère à ces éléments et le mortier ainsi composé ne serait pas représentatif de celui passant au tamis de 5 mm.

Pour formuler le MBE, les dosages en ciment et en eau efficace sont conservés, le dosage en sable est celui correspondant à l'obtention d'une surface spécifique de grains égale à celle des bétons. La teneur en sable des gravillons (éléments inférieurs à 5mm) est ajoutée en correction à celle déterminée par la méthode. Les calculs sont faits sur granulats saturés surface sèche

Ainsi les compositions suivantes sont obtenues (Tableau 55 et Tableau 56), le détail des calculs est donné en annexe 9

Tableau 55 : Composition de MBE de granulats naturel sans adjuvant, E/C=0,65

Constituants Sans adjuvant	Composition théorique de MBE sec pour 1m ³ [kg]
ciment (CEM I 52.5 N)	471,27
Sable sec	1392,06
Eau totale	318,83

Tableau 56 : Composition de MBE de granulats recyclés sans adjuvant, E/C=0,65

Constituants Sans adjuvant	Composition théorique de MBE secs pour 1m ³ [kg]
ciment (CEM I 52.5 N)	425,7
Sable sec	1168,33
Eau totale	391,03

Le rapport Eff/C est maintenu constant égal à 0,65, mais la méthode MBE conduit à des dosages en ciment au m³ plus faibles pour le recyclé car les volumes équivalents des MBE sont différents du fait des masses volumiques plus faibles du GR, soit respectivement de 546 litres pour le MBEGC et 609 litres pour le MBEGR (voir annexe 9).

Un tableau récapitulatif des paramètres et des compositions des MBE est donné en annexe 9

1.2 Programme d'expérimentation du screening d'adjuvants

Le but des essais sur bétons est de vérifier s'il est possible de mettre en œuvre un béton de granulats recyclés (100% avec conservation des fines) qui respecte les objectifs suivants :

- Affaissement initial du béton : classement S4 soit 200 mm ± 10 mm. (Selon EN 206)
- Dans les 90 minutes qui suivent le malaxage, maintien d'un béton fluide soit S3/S4
- Résistances en compression à 24 heures supérieures à 5 MPa malgré l'utilisation d'adjuvants (effet secondaire lié à l'utilisation des adjuvants limité)

Dans ce but plusieurs campagnes d'essais ont été menées successivement, avec l'objectif initial d'identifier un adjuvant ou un couple d'adjuvant dont l'utilisation permettait au béton d'atteindre les objectifs ci-dessus.

Un screening des adjuvants présentés Tableau 47 a été réalisé sur les bétons dont les compositions ont été déterminées précédemment. Cette étude a été menée en majeure partie sur les granulats recyclés et dans une moindre mesure sur les granulats naturels concassés. L'intégralité des compositions et des résultats obtenus ont été consignés dans des rapports industriels transmis au partenaire. Seules les informations principales sont données dans ce document. Les adjuvants ont été testés seuls ou couplés à différents dosages (Tableau 57)

Tableau 57 Complément d'informations sur les plages de dosages utilisés

Dénomination de l'adjuvant	Dosage min et max recommandé	Plages de dosages utilisés		Réalisation			
		GR	GN	BGR	MBEGR	BGN	MBEGN
EPB 897-001	0,6-1,6%	1-1,2%	-	X +couplé 011	X+ couplé 011		
EPB 897-011	0,3-0,4%	Uniquement couplé 0,4%	0,4%	X+ couplé 011	X	X	X
EPB 897-013	0,6-1,4%	1-1,2%	0,5-0,8%	X+ couplé 011	X	X	X
EPB 897-014	0,6-1,4%	0,9-1%	0,72%	X+ couplé 011	X	X	X
EPB 897-017	0,6-1,4%	1%	1%	X+ couplé 011	X	X	
EPB 897-018	0,6-1,4%	1-1,4%	-	X+ couplé 011	X		
EPB 897-025	Non communiqué	0,5-0,8%	0,56%	X + couplé 029	X	X	X
EPB 897-026		0,9-1%	0,8%	X	X	X	X
EPB 897-027		0,9-1%	0,72%	X	X	X	X
EPB 897-028		0,8%	-	X	X		
EPB 897-029		0,4 couplé 1,5% seul	1,04% seul	X	X seul	X seul	X seul

Ensuite le même screening que celui réalisé sur bétons est effectué sur mortier. Un tableau récapitulatif des paramètres de composition des MBE est donné en annexe 9

1.3 Autres compositions de bétons et de mortiers équivalents

Des propositions de modifications des paramètres de formulation et de mise en œuvre ont été faites pour prendre en compte certaines spécificités des granulats recyclés. Elles seront présentées dans la quatrième partie de ce chapitre.

1.4 Description des essais à l'état frais et durci

1.4.1 Mise en œuvre des bétons

Les compositions de bétons ont été mises en œuvre pour le BGNC et les BGR décrits précédemment selon le mode présenté Tableau 58. Ce mode de mise en œuvre a été imposé par le partenaire industriel.

Tableau 58 : mode de mise en œuvre des bétons et moment d'introduction de l'adjuvant

ETAPES	TEMPS
Introduction des granulats	T ₀ - préliminaire
Malaxage (Malaxeur Zyklus)	15 s
Introduction de l'eau de préhumidification	15 s
Malaxage	15 s
Attente/phase d'humidification	4 min 15s
Introduction du ciment	T ₀
Fin introduction du ciment	15 s
Mélange manuel	30 s
Malaxage	15 s
Introduction de l'eau complémentaire adjuvantée	15 s
Malaxage	2min 15

L'eau de pré humidification correspond à l'eau d'absorption des granulats

1.4.2 Masse volumique des bétons et mortiers à l'état frais

Les mesures sont réalisées selon la norme NF EN 12 350-6 (NF EN 12 350-6, 1999). Les masses volumiques des mélanges dans leur état frais ont été mesurées 10 minutes après le début du malaxage (T₀). Celles des bétons ont été mesurées directement dans des moules à béton de 1 litre, celles des mortiers ont été mesurées dans un récipient calibré de volume 1 litre.

1.4.3 Teneur en air des mortiers

Cet essai a été réalisé avec un aéromètre à mortier (Figure 81) selon la méthode à pression définie dans la norme NF EN 413-2 (NF EN 413-2, 2006). Cette méthode consiste à déterminer la quantité d'air compris dans un mortier sur la base de la réduction de volume provoquée par l'application d'une pression. Cette mesure renseigne sur l'air entraîné lors de la mise en œuvre et donc sur l'air contenu dans le mortier à l'état frais.



Figure 81 : Mesure de la teneur en air avec un aéromètre à mortier

1.4.4 Ouvrabilité des bétons et mortiers

1.4.4.1 Affaissements des bétons

La mesure de l'affaissement des bétons se fait à l'aide d'un cône d'Abrams. Elle est réalisée conformément à la méthodologie définie dans la norme NF EN 12 350-2 (NF EN 12 350-2, 2012). Les résultats obtenus renseignent sur la classe normalisée d'affaissement des bétons :

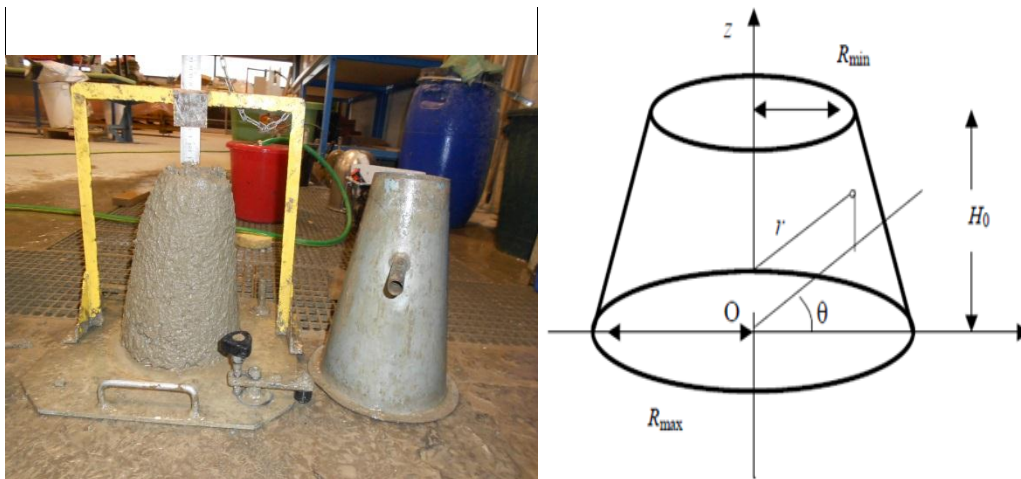


Figure 82 : Mesure de l'affaissement des bétons au cône d'Abrams

Tableau 59: Classes de consistance – NF EN 12 350-2[9]

Classes de consistance	Affaissement [mm]	Etat du béton
S1	10 à 40	Ferme
S2	50 à 90	Plastique
S3	100 à 150	Très plastique
S4	160 à 210	Fluide
S5	> 220	Très fluide

Les essais d'affaissement ont été réalisés 5 minutes après le début de la mise en œuvre (introduction du ciment). Puis, une mesure toutes les 30 minutes a été effectuée jusqu'à deux heures après le début de malaxage, ceci dans le but d'évaluer le maintien d'ouvrabilité au cours du temps. Avant chaque mesure, un malaxage manuel d'1 minute 30 est effectué.

1.4.4.2. Affaissements et étalement des mortiers

Pour la mesure des affaissements et étalements des mortiers, les essais sont réalisés à l'aide d'un mini-cône inspiré du cône d'Abrams et dont les dimensions lui sont proportionnelles. Les caractéristiques de ce dernier (Figure 83) sont : $5 \pm 0,2$ cm de diamètre en sa partie haute $10 \pm 0,2$ cm de diamètre en sa partie basse et $15 \pm 0,2$ cm de haut.

L'étalement a été déterminé par la mesure des diamètres des mortiers après étalement (3 mesures pour le cas où l'étalement ne serait pas circulaire). La mesure est effectuée une minute après retrait du moule. Ces 2 mesures sont effectuées simultanément sur le même échantillon et la durée de ces essais est de 1 minute 30 secondes.

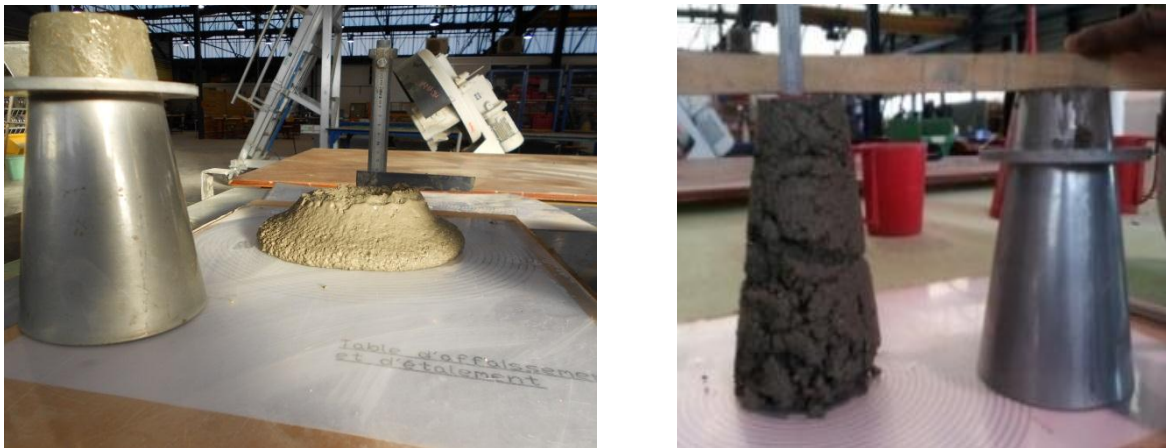


Figure 83 : Mesure de l'affaissement et l'étalement des mortiers au mini cône

1.4.5 Fabrication des éprouvettes de bétons

Après la réalisation des essais d'affaissement, le béton est mis en place dans des moules de dimension $10 \times 10 \times 10$ cm³ et vibré à l'aide d'une table vibrante pendant 10 secondes. Le démoulage s'est fait 24 heures après coulage.

1.4.6 Conservation des éprouvettes de bétons

Après démoulage, les éprouvettes sont pesées et placées dans une salle de conservation dont la température est de $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ et avec une humidité relative supérieure à $80\% \pm 5\%$.

1.4.7 Masse volumique des bétons et mortiers à l'état durci

Un contrôle de la masse puis un calcul de la masse volumique des matériaux avant essai mécanique sont effectués sur les éprouvettes cubiques. Un suivi des masses des échantillons est ainsi systématiquement effectué entre le démoulage et les différentes échéances.

1.4.8 Résistances en compression sur bétons

La détermination des résistances en compression sur bétons est effectuée sur une presse hydraulique Schenck pilotée asservie par un système « Quiri Hydro Systems ». La capacité de la presse est de 3000 kN (Figure 84). Le pilotage est effectué en déplacement avec une vitesse de déplacement constante du plateau inférieur de 0,75 mm/ min.

L'essai est effectué sur 3 éprouvettes pesées avant la réalisation de l'essai. Les essais mécaniques ont été réalisés aux échéances 1 jour ; 28 jours et 90 jours.



Figure 84 : Presse hydraulique pour les essais mécaniques sur bétons

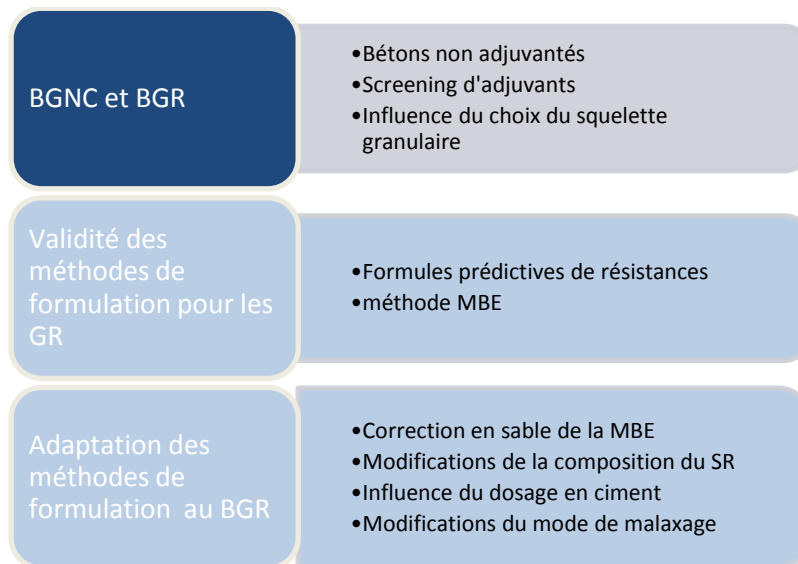
1.4.9 Résistances mécaniques sur mortiers

Un contrôle de résistances mécaniques des mortiers a été effectué à différentes échéances. L'essai est réalisé selon la norme NF EN 196-1.

2 Résultats sur bétons à l'état frais et durci

Dans un premier temps, les résultats de caractérisation des propriétés à l'état frais des bétons naturels et recyclés (affaissement et masse volumique) sont présentés et comparés : d'abord sans ajout d'adjuvant ensuite avec adjuvants afin d'atteindre l'objectif d'ouvrabilité. En ce qui concerne les résultats des bétons adjuvés, ils seront présentés et analysés sans distinction du type ou du dosage en adjuvant, ces points ayant fait l'objet de plusieurs rapports industriels transmis au partenaire (voir les références bibliographiques). Seuls les résultats discriminants pour l'un ou l'autre des adjuvants seront relevés. De plus, n'ayant eu que peu d'informations transmises sur la composition et le mode d'action des superplastifiants fournis par le partenaire (pour raison de confidentialité), une analyse pertinente de l'efficacité de telle ou telle gamme d'adjuvant n'est pas réalisable.

Dans un deuxième temps, afin de vérifier si la méthode MBE est applicable aux granulats recyclés, les mortiers équivalents formulés selon la méthode Calibé ont été réalisés sans puis avec adjuvants.



2.1 Analyse comparative BGN et BGR non adjuvés

L'intégralité des paramètres de compositions des bétons avec leur acronyme (comme ci-dessous GBR_2-5) est donnée en annexe 9.

L'ouvrabilité des bétons de granulats naturels concassés et de granulats recyclés est représentée par la mesure d'affaissement au cours des deux premières heures après le malaxage (Figure 85). Un contrôle des résistances mécaniques à différentes échéances, jusqu'à 90 jours est présenté (Figure 86). Deux rapports E/C ont été étudiés pour les mesures à l'état frais afin de confirmer nos paramètres d'étude choisis précédemment ($E/C = 0,65$).

2.1.1 Ouvrabilité

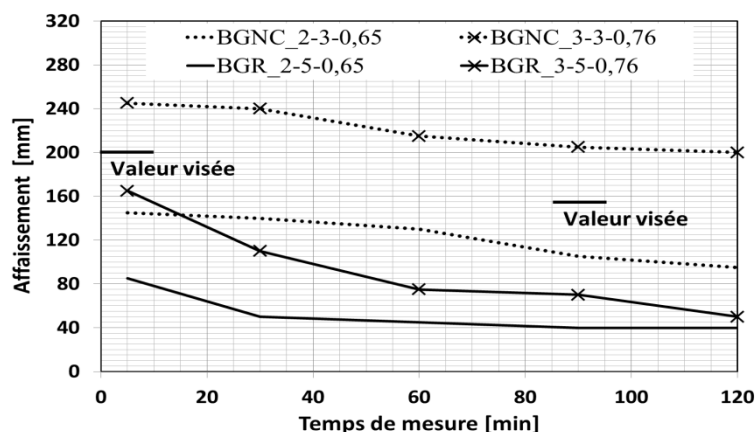


Figure 85 : Evolution de l'ouvrabilité des bétons non adjuvés

Concernant les caractéristiques à l'état frais, l'augmentation du rapport E/C de 0,65 à 0,76 (donc du dosage en eau), provoque une amélioration de l'ouvrabilité. Ainsi, les bétons non adjuvés BGNC et BGR passent respectivement d'une classe S3 à S5 et d'une classe S2 à S4-

d'affaissement à 5 minutes (objectif visé classe S4 soit 200 mm+ /- 10mm d'affaissement). L'objectif d'ouvrabilité à 5 minutes n'est donc pas atteint pour les bétons non adjuvés quel que soit le type de granulats (GNC ou GR) au dosage E/C fixé de 0,65. Le dosage à 0,76 ne permet pas non plus d'atteindre l'objectif à 5 min pour le BGR et dépasse l'objectif pour le BGNC provoquant un risque de ségrégation. L'objectif à 90 min d'une classe S3/S4 soit 150 à 160 mm d'affaissement n'est atteint (et même dépassé) que pour le BGNC à E/C = 0,76. Il est remarqué une forte perte d'ouvrabilité pour les BGR, bien supérieure à celle observée sur les BGNC. (Voir Figure 8). Ces résultats sur bétons BGNC et BGR sont conformes à ceux attendus : le remplacement du granulat naturel par le granulat recyclé nuit à l'ouvrabilité. La perte d'ouvrabilité au-delà de 90 minutes peut aussi être attribuée en partie aux effets du début de prise, puisque pour le ciment utilisé la valeur caractéristique du début de prise est 138 minutes. Cependant cet effet n'est pas prépondérant sur la perte d'ouvrabilité car elle ne s'observe pas autant sur les BGNC.

Cet écart sur l'affaissement obtenu peut être attribué à la géométrie des granulats et à la teneur en éléments fins selon les résultats présentés dans le chapitre bibliographique. Il ne devrait pas selon la bibliographie pouvoir être attribué au coefficient élevé d'absorption des granulats puisque l'eau d'absorption a été ajoutée au mélange.

2.1.2 Résistances en compression et évolution des masses volumiques

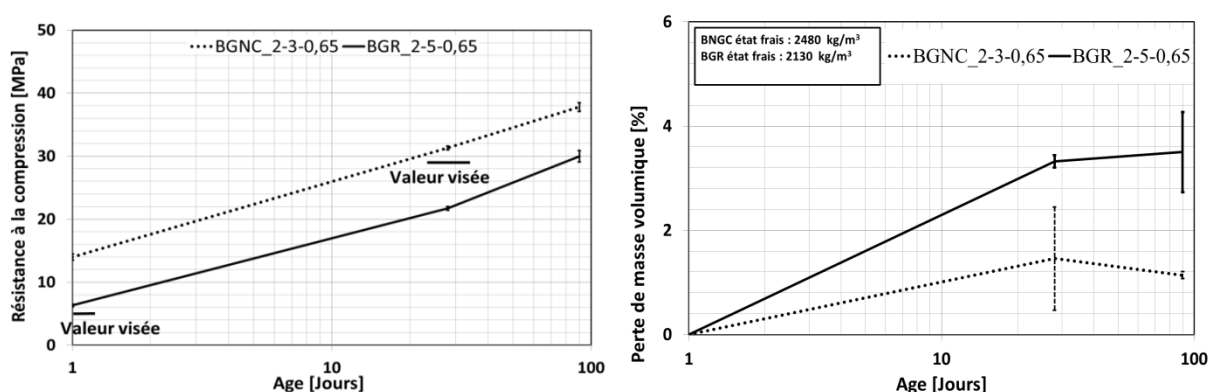


Figure 86 : Evolution des résistances mécaniques des bétons et des pertes de masse

Seuls les bétons de rapport E/C=0,65 ont été testés en compression aux différentes échéances.

Il ressort des résultats présentés Figure 86 que les BGNC présentent des résistances en compression supérieures à celles des BGR avec un écart quasi identique à chaque échéance de 8 à 10 MPa. Ainsi l'objectif de résistance visé de 29 MPa à 28 jours n'est pas atteint pour le BGR, il est atteint à 90 jours.

Les valeurs de masses volumiques à l'état frais et durci sont conformes aux résultats de la littérature : les BGR sont plus légers que les BGNC tant à l'état frais que à l'état durci. Par exemple à l'état frais le BGNC présente une masse volumique de 2480 kg/m³ contre 2130

pour le BGR. Cet écart pourrait s'expliquer par les caractéristiques intrinsèques des granulats mais aussi par une compacité du béton plus faible et une porosité de la pâte du béton plus élevée.

Le suivi des pertes de masses volumiques (ou perte de masse entre échantillon, voir Figure 86) fournit un renseignement intéressant et peut expliquer en partie l'écart observé sur les valeurs de résistances mécaniques entre BGR et BGNC. En effet, une perte de masse élevée (BGR) s'explique par un départ d'eau et peut ainsi laisser supposer un dosage E/C réel plus élevé que celui attendu, une partie de l'eau des granulats recyclés a pu être relarguée lors du malaxage et contribuer à l'augmentation du rapport E_{eff}/C réel. L'eau ainsi présente dans la pâte, dans une solution concentrée en ciment, aura plus de difficultés par la suite à être réabsorbée pendant la période initiale ou dormante de prise du ciment.

Pour rappel, un béton d'objectif C20/25, pour lequel les essais ont été réalisés sur cubes, doit présenter une valeur caractéristique à la compression de 25 MPa soit pour 3 éprouvettes testées une résistance moyenne de $25 +4$ MPa soit 29 MPa selon la norme NF EN 206.

Ainsi la différence de résistance observée entre les BGR et BGNC, de l'ordre de 8 à 10 MPa, pourrait s'expliquer par la qualité des granulats recyclés (résistance à l'usure et à la fragmentation) qui est moindre tel que présenté au chapitre 2, par une ouvrabilité moindre entraînant une non obtention de la compacité attendue et donc des proportions de composition non respectées, mais aussi par une présence d'eau dans la pâte supérieure à celle attendue suite à une désorption d'eau des granulats (effet de succion du ciment).

Un contrôle de la résistance en compression du BGNC à 90 jours a été fait. Une résistance de 31 MPa à 90 jours est atteinte, soit une perte de 18% et ce dosage ne permettrait pas d'atteindre les objectifs à 28 jours (valeur à 28 jours inférieure d'environ 15% à celle à 90 jours).

A l'issue de ces essais, il a été décidé de conserver le rapport E/C =0,65 (valeur maximale autorisée par la norme NF EN 206) et d'utiliser des adjuvants superplastifiants afin d'atteindre l'objectif d'ouvrabilité, mais aussi d'augmenter les résistances mécaniques par l'amélioration de l'ouvrabilité

2.2 Analyse comparative BGN et BGR adjuvantés Sélection des adjuvants

2.2.1 Ouvrabilité

L'affaissement initial (à 5 min) et à 90 minutes des bétons réalisés avec adjuvant quel que soit son type, son dosage ou son couplage est représenté Figure 87, les résultats concernant les BGR illustrent l'intégralité du screening.

L'évolution de l'affaissement des BGR et BGNC en valeur absolue ou en gain par rapport au béton non adjuvanté est représenté Figure 88. Afin de comparer l'efficacité des adjuvants sur

les BGNC et BGR, seul les BGR adjuvés avec les mêmes superplastifiants que les BGNC sont représentés sur cette figure. Les résultats sur le screening complet sur BGR sont représentés Figure 88 Des analyses graphiques complémentaires sont données en annexe 10.

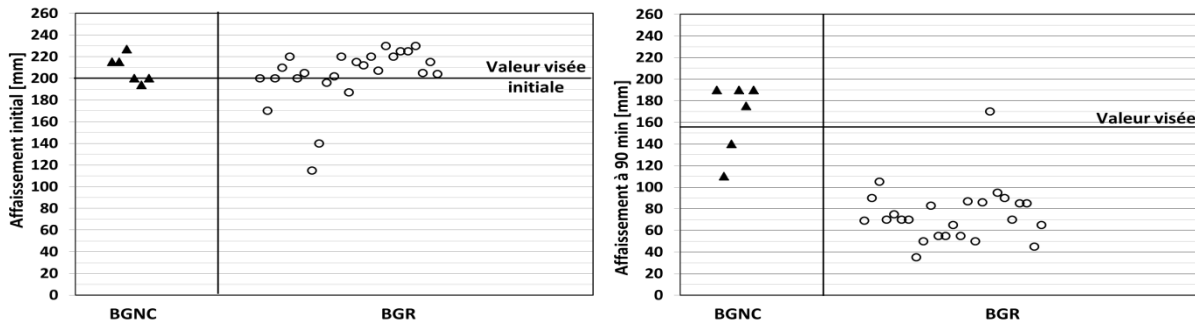


Figure 87 : Ouvrabilité des bétons à 5 et 90 minutes – screening complet pour BGR

Quel que soit l'adjuvant et son dosage, couplé ou utilisé seul, les résultats d'ouvrabilité immédiate (à 5 minutes représentés Figure 87) montrent une efficacité importante des adjuvants. Les dosages utilisés pour chacun des bétons BGNC et BGR permettent d'atteindre la valeur d'affaissement visée à 5 minutes sans qu'il y ait ségrégation. Il faut rappeler ici que les dosages en adjuvants utilisés pour les BGR sont supérieurs à ceux utilisés pour les BGNC (dosages rappelés en annexe 10).

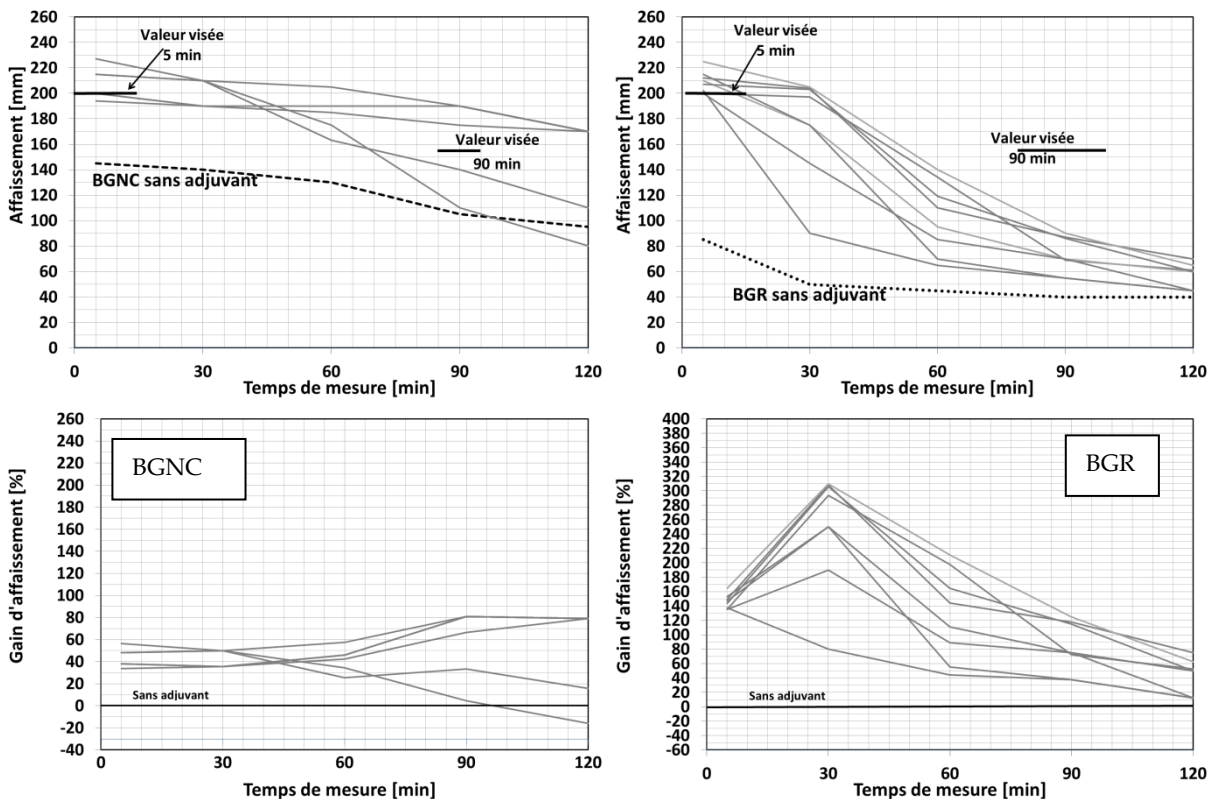


Figure 88 : Evolution de l'ouvrabilité des BGNC et BGR – screening identique BGR et BGNC

Le gain d'ouvrabilité (calculé en référence à la valeur sans adjuvant) est d'ailleurs beaucoup plus élevé pour les BGR (>120% pour la majeure partie des compositions) que pour les BGNC (~40%) ; ce qui s'explique aussi par la valeur d'affaissement plus élevée du BGNC non adjuvanté (145 mm) que du BGR non adjuvanté (85mm).

Plusieurs adjuvants sont efficaces pour le BGNC sur le maintien d'ouvrabilité, l'objectif à 90 minutes étant atteint (Figure 87). Au contraire, aucun des BGR adjuvantés ne présente un maintien d'ouvrabilité dans le temps qui soit satisfaisant et l'objectif d'un S3-S4 à 90 minutes n'est pas respecté, (voir Figure 88 et Figure 89), que l'utilisation d'adjuvant soit seul ou couplé (avec un retardateur 011). La rigidification observée sur les bétons non adjuvantés qui pouvait être attribuée à un début de prise ne peut plus l'être ici en présence d'adjuvants puisque les BGNC présentent un maintien satisfaisant.

Le non maintien d'ouvrabilité est illustré par la Figure 90 représentative des pertes d'affaissement à 90 minutes par rapport à la valeur initiale à 5 minutes. Ces pertes sont très supérieures (>50%) pour les BGR à celles obtenues pour les BGNC (~20%).

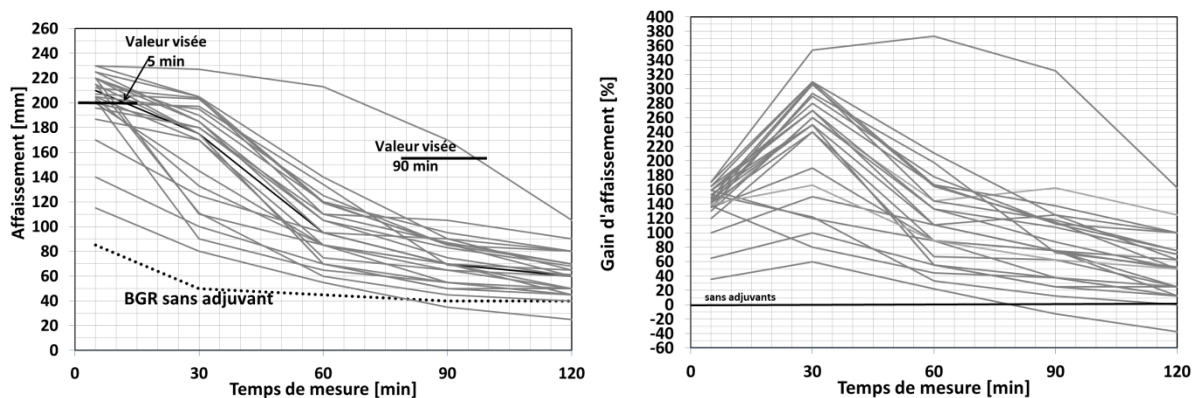


Figure 89 : Evolution de l'ouvrabilité des BGR – screening complet

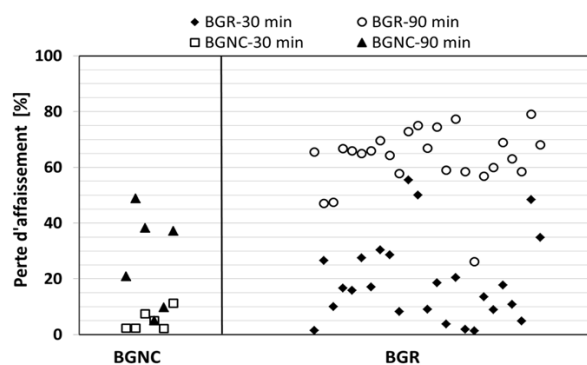


Figure 90 : Perte d'ouvrabilité des bétons par rapport à la valeur initiale à 5 min

Seul l'utilisation d'un adjuvant du screening complet sur BGR permet d'atteindre l'objectif visé, il s'agit de l'adjuvant 029 dosé seul à 1,3% (voir Figure 88). Nous n'avons pas pu recueillir d'information sur la composition de cet adjuvant pour des raisons de

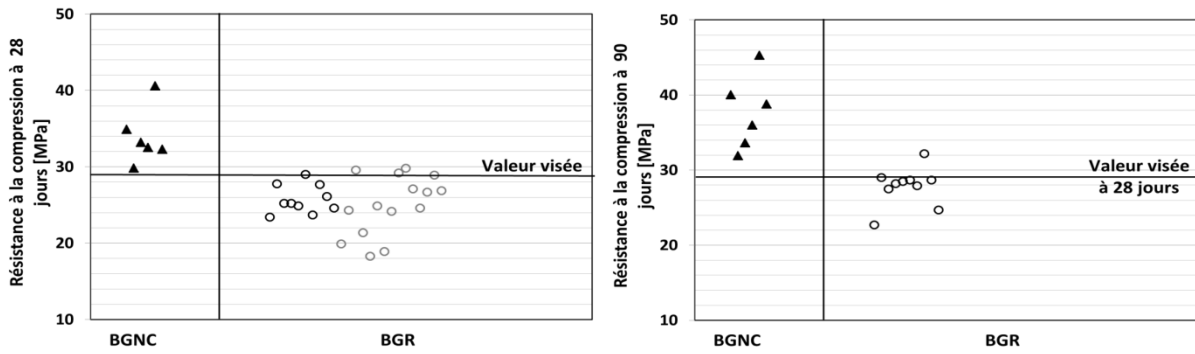


Figure 92 : Résistance des bétons à 28 et 90 jours

L'utilisation des adjuvants dans les BGNC entraîne une baisse des résistances mécaniques à 24 heures. (14 MPa pour le BGNC sans adjuvant à 10-12 MPa pour les BGNC adjuvés, voir Figure 92), mais l'objectif visé à 24 heures reste atteint (5MPa). Cette baisse des résistances mécaniques à 24h n'est pas observée pour tous les adjuvants du screening sur BGR. Ainsi, le BGR sans adjuvant présente une résistance en compression à 24 heures de 6,3 MPa +/- 0,3 MPa et les BGR adjuvés présentent des résistances en compression comprises entre 3,5 et 8 MPa. Les adjuvants provoquant une baisse de résistance à 24h ayant pour conséquence un non-respect de l'objectif visé de 5 MPa sont ceux pour lesquels nous n'avons pas reçu d'information de composition.

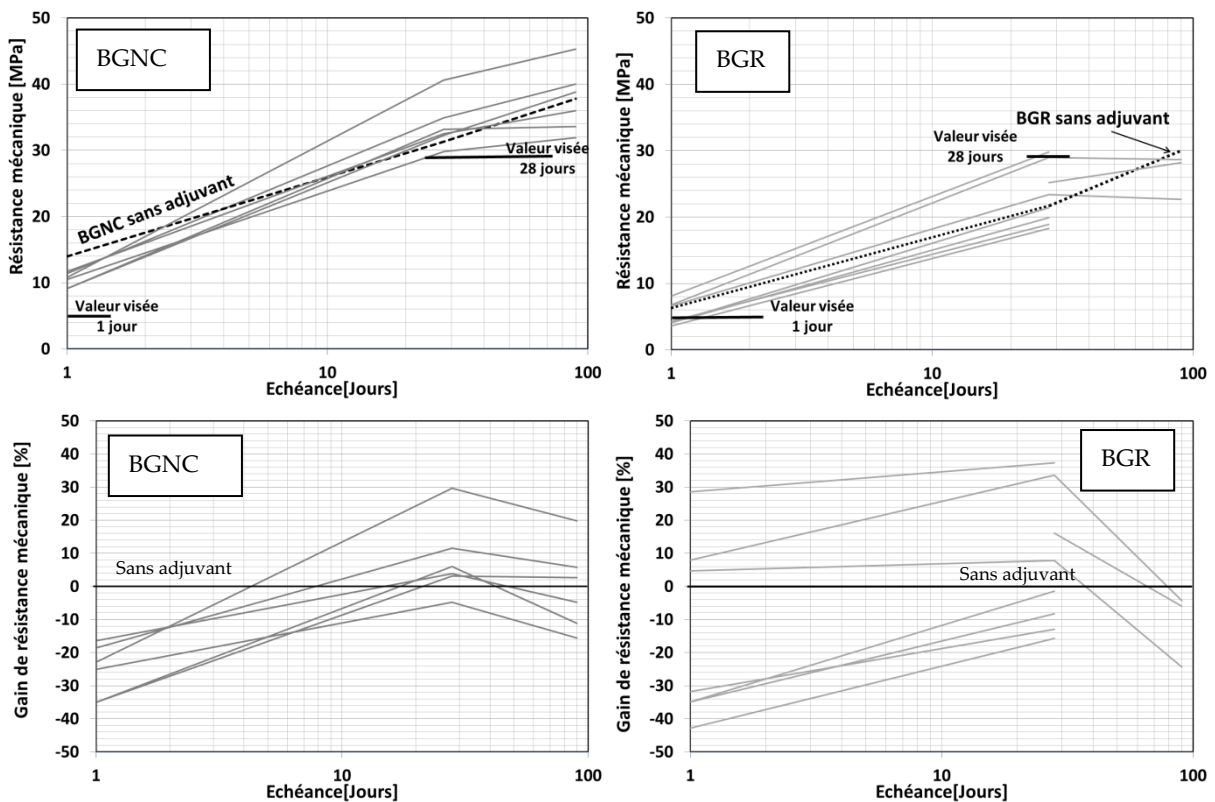


Figure 93 : Evolution de la résistance des BGNC et BGR

L'utilisation des adjuvants dans les BGNC entraîne une augmentation des résistances mécaniques entre 1 jour et 28 jours de plus grande ampleur que celle observée sur le BGNC non adjuvanté et cette augmentation est aussi significative entre 28 et 90 jours pour certains adjuvants mais ce résultat est plus dispersé (Figure 93). Ainsi, pour la majorité des adjuvants, leur utilisation sur BGNC est bénéfique pour les résistances à moyen et long terme (par rapport au BGNC sans adjuvant). Ces analyses sont confirmées par les résultats « gain de résistance » présentés Figure 93. En effet, à 28 jours, la quasi-totalité des adjuvants testés présentent un gain positif pouvant atteindre 30%. Ces gains de résistance sont calculés échéance par échéance en référence aux valeurs obtenues sur béton non adjuvantés.

Concernant les BGR, les résultats sont plus dispersés d'un adjuvant à l'autre. L'utilisation d'adjuvants induit soit une baisse des résistances mécaniques à 28 jours (par rapport au BGR sans adjuvant), soit une augmentation (voir Figure 93) par rapport au BGR sans adjuvant. Ces résultats sont à rapprocher de ceux obtenus à 24h.

Ces résultats sont confirmés par les calculs de gain de résistance mécaniques présentés Figure 93.

L'évolution des résistances mécaniques entre 1 jour et 28 jours est similaire à celle du BGR non adjuvanté pour la majorité des adjuvants. La réalisation du screening plus complet sur BGR conduit aux mêmes conclusions (voir Figure 96). Ainsi, seule l'utilisation de quelques adjuvants pour lesquels non seulement la résistance obtenue à 24 heures est supérieure mais aussi l'évolution des résistances entre 24 heures et 28 jours est plus importante, permet d'atteindre l'objectif de 29 MPa à 28 jours. Il s'agit des adjuvants 014, 013/011, 01/011, 26 et 25/29. Leurs dosages sont définis en annexe 9.

Le BGR non adjuvanté et les BGR adjuvantés présentent une nette différence d'évolution entre 28 et 90 jours ; en effet pour la quasi-totalité des BGR adjuvantés, la résistance mécanique n'évolue plus entre 28 et 90 jours, contrairement au BGR non adjuvanté.

Ainsi, à toute échéance, les BGR sont moins résistants que les BGNC, mais cet écart se réduit à 90 jours (Figure 92). A ce niveau il faut noter que les bétons étaient mis en place dans les moules à la fin du suivi de l'ouvrabilité (2h après le malaxage), or les BGR à 2 heures se sont plus rigidifiés que les BGNC (perte d'affaissement : béton S2), la mise en place peut donc en être affectée. C'est pourquoi cette dernière s'est faite par vibration à la table vibrante ce qui n'aurait pas été nécessaire pour la mise en place d'un béton de classe S4

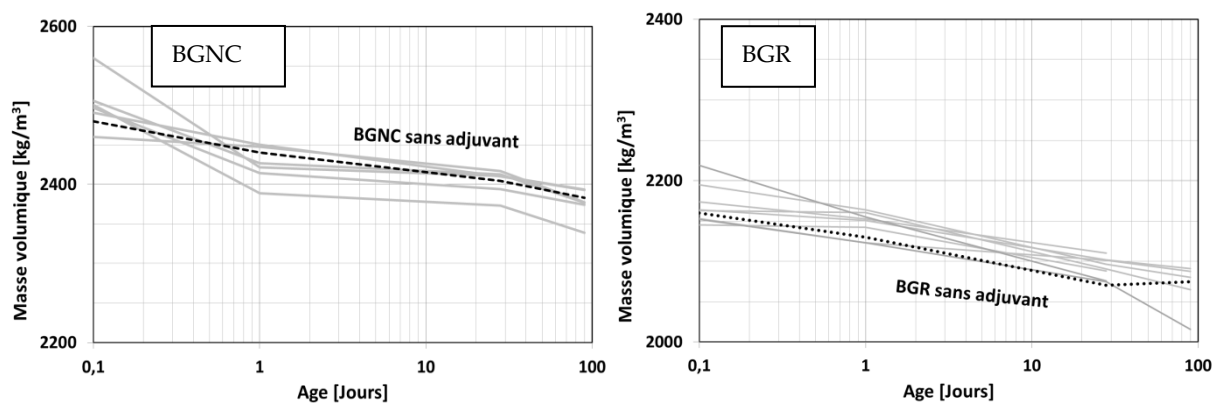


Figure 94 : -Masse volumique moyenne des BGNC et BGR

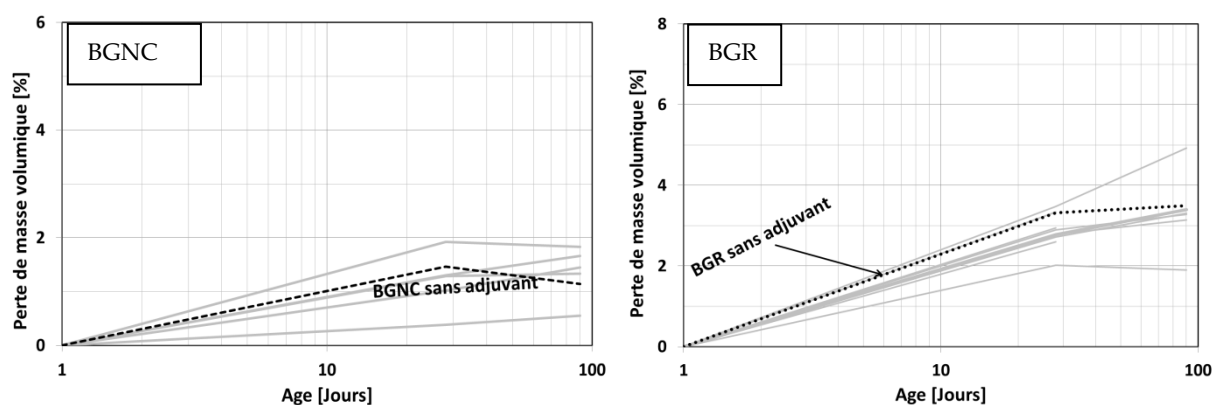


Figure 95 : -perte de masses volumique par éprouvette à l'état durci des BGNC et BGR

L'analyse des courbes d'évolution des masses volumiques entre 2h à l'état frais, 1, 28 et 90 jours à l'état durci apporte une première explication à ces résultats pour les BGNC. Pour rappel, les bétons sont conservés dans une salle à humidité et température constante mais en condition non saturée (80% d'humidité +/- 10%). Ainsi, les BGNC adjuvantés ont une perte de masse moyenne entre l'état frais et l'état durci à 24h plus élevée que le BGNC non adjuvanté. (Figure 94). Ce résultat peut expliquer les plus faibles résistances à 24 h des BGC adjuvantés par rapport au BGNC non adjuvanté (quantité d'air entraîné supérieure). Par la suite la perte de masse sur matériau durci est moindre pour la plupart des BGNC adjuvantés que pour le BGNC non adjuvanté, ce qui indique qu'il n'y a pas eu de départ d'eau importante à l'état durci, facteur de baisse des résistances mécaniques. Ce « non départ d'eau » peut expliquer l'accroissement supérieur des résistances mécaniques entre 1 et 28 jours pour les BGNC adjuvantés.

Les BGR adjuvantés présentent des masses volumiques à l'état frais légèrement supérieures à celles du BGR non adjuvanté et leurs pertes de masse entre l'état frais et l'état durci à 24h sont équivalentes. La comparaison des courbes d'évolution des résistances mécaniques et des pertes de masse entre 24h et 28j sur le screening complet (Figure 96) montrent que l'augmentation des résistances mécaniques observée pour les BGR adjuvantés (par rapport

au BGR non adjuvanté) est à rapprocher des pertes de masses à l'état durci dans l'ensemble inférieures pour les BGR adjuvantés. Par contre la comparaison de l'effet des adjuvants sur les BGR et BGNC pour la même série de superplastifiants testés (Figure 91 à Figure 95) est plus difficile à faire car pour cette gamme d'adjuvants, les résultats sur BGR sont plus dispersés.

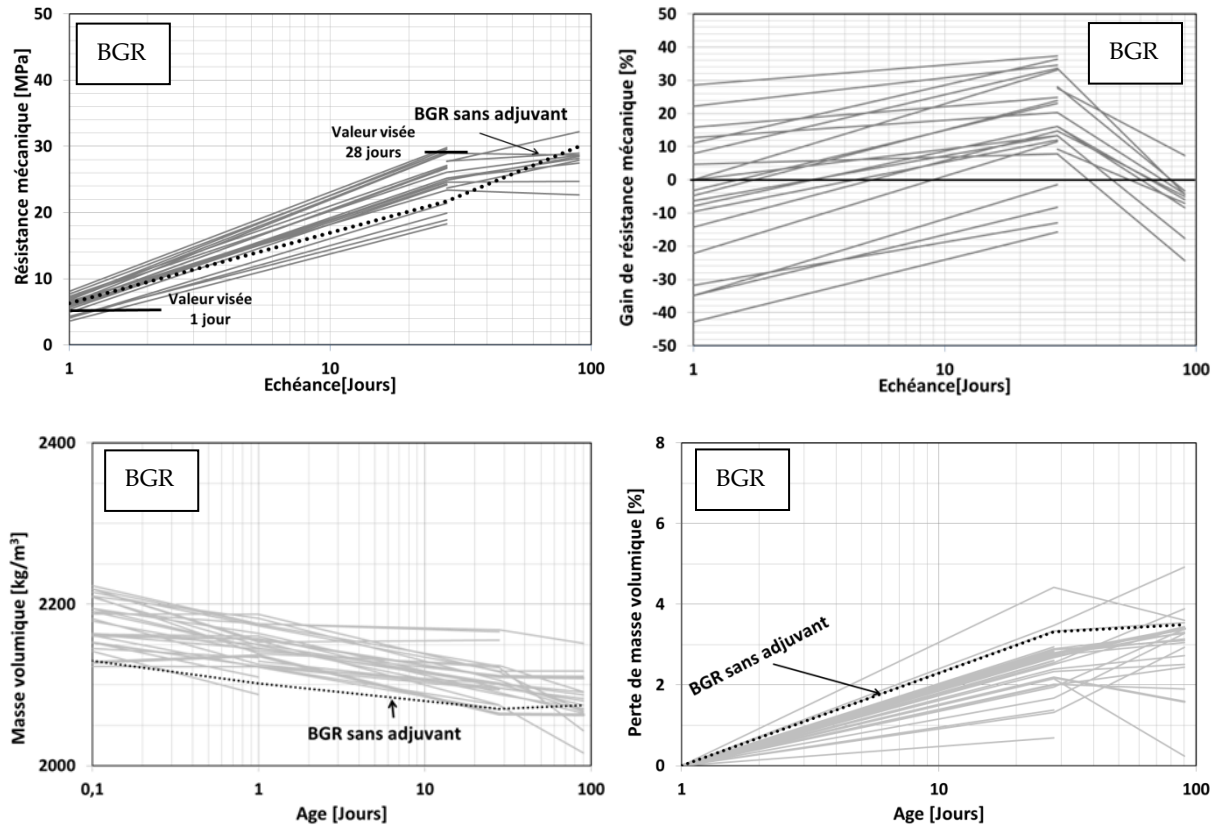


Figure 96 : Caractéristiques à l'état durci des BGR – screening complet

L'objectif principal du screening d'adjuvant était de déterminer les adjuvants efficaces vis-à-vis de l'ouvrabilité sans perte de résistance mécanique et si possible avec un gain de celle-ci par rapport au BGR non adjuvanté. Le bilan des résultats présentés précédemment (voir Figure 89 et Figure 96) indique que l'obtention d'une ouvrabilité élevée à 5 minutes est facilement accessible grâce à l'utilisation d'adjuvants. Cependant peu d'entre eux permettent de maintenir cette ouvrabilité dans le temps même lorsque deux superplastifiants sont couplés (dont un avec un effet retardateur). En outre l'utilisation d'adjuvant induit pour la majorité des adjuvants une augmentation des résistances mécaniques mais rarement d'une ampleur permettant d'atteindre l'objectif de résistance à 28 jours. L'utilisation d'adjuvant a également pour effet d'augmenter les masses volumiques et de diminuer les pertes de masses à l'état durci. Ces évolutions de pertes de masses différentes entre les BGNC et BGR sont fonction de l'adjuvant utilisé et indiquent que l'eau disponible pour l'hydratation et la mise en œuvre du béton varie : selon les compositions de BGR, une quantité d'eau variable peut être désorbée du granulat.

Ainsi, à l'issue du screening, le choix de l'adjuvant ou des adjuvants à utiliser pour la suite de l'étude s'est fait en prenant en compte les 2 critères suivants : amélioration de l'ouvrabilité et de la résistance mécanique. Ce compromis a conduit à sélectionner l'adjuvant 014 au dosage de 0,9% (BGR) et 0,72% (BGNC) et, pour quelques bétons l'adjuvant 013 au dosage de 1% (BGR).

Ces deux adjuvants efficaces vis-à-vis de l'ouvrabilité et des résistances mécaniques sont de la gamme des polycarboxylates modifiés. Les autres adjuvants (phosphonates modifiés, gluconates, polynaphtalènes ou polyméamines condensés) sont moins efficaces soit vis-à-vis de l'ouvrabilité, soit vis-à-vis des résistances mécaniques. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par Braymand (Braymand et al., 2015b).

Les résultats obtenus sur ces bétons sont rappelés dans le tableau suivant :

Tableau 60 Récapitulatif des résultats obtenus sur les adjuvants sélectionnés

Détail des compositions		BGR dosé avec l'adjuvant 013 à 1%, E/C=0,65	BGR dosé avec l'adjuvant 014 à 0,9%, E/C=0,65	BGNC dosé avec l'adjuvant 014 à 0,72%, E/C=0,65	BGR de référence sans adjuvant, E/C=0,65	BGNC de référence sans adjuvant, E/C=0,65
	Après	BGRS-013	BGRS-014	BGNC-014	BGR_2-5	BGNC_2-3
Affaissement [mm]	5 min	210	200	200	85	145
	30 min	175	145	190	50	140
	60 min	95	85	190	45	130
	90 min	70	70	190	40	105
	120 min	60	45	170	40	95
Résistance mécanique [MPa]	1 j	7,6 ± 0,2	6,8 ± 0	9,1 ± 0,2	6,3 ± 0,2	14 ± 0,5
	28 j	25,2 ± 0,3	29 ± 0,5	32,3 ± 1,1	21,7 ± 0,3	31,3 ± 0,3
	90 j	28,2 ± 0,8	28,7 ± 0,5	38,8 ± 0,5	30 ± 0,9	37,8 ± 0,7

2.3 Influence du choix du squelette granulaire du GR

Les BGR étudiés dans la première partie de ce chapitre ont été formulés avec une recherche de squelette granulaire proche de celui du béton de granulat naturel concassé considéré comme référent. De plus, il a été choisi de faire l'hypothèse d'une compacité égale entre les deux bétons. Cette dernière hypothèse peut avoir une influence non négligeable sur les résultats obtenus à l'état durci puisque si la compacité réelle du BGR est moindre (teneur en air entraîné supérieure), les proportions déterminées ne seront pas respectées dans le béton mis en œuvre.

Dans le but d'étudier l'influence de ces choix, d'autres bétons ont été réalisés, leurs méthodes de formulation sont détaillées au paragraphe composition des bétons, 3 paramètres ont été modifiés :

1. optimisation de la superposition du squelette granulaire de BGR sur le BGNC en créant une coupe supplémentaire à 1mm (BGRS 014 -> BGRS 014-0/1-0/4mm)
2. Pas de recherche de superposition du squelette granulaire du BGR sur celui du BGNC, les proportions sont conservées telles que trouvées sur le BGNC avec conservation de la compacité théorique à 0,8 (BGRS 013 -> BGR013-0,8)
3. Pas de recherche de superposition du squelette granulaire du BGR sur celui du BGNC, les proportions sont conservées telles que trouvées sur le BGNC avec modification de la compacité théorique à 0,75 (BGRS 013 -> BGR013-0,75)

Les résultats sur BGR à l'état frais et durci sont présentés Figure 97 et Figure 98.

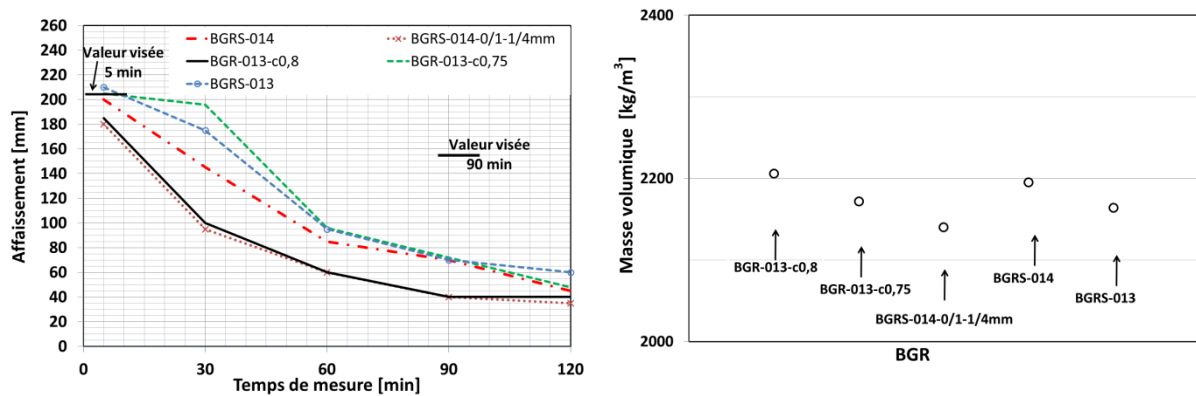


Figure 97 : Ouvrabilité et de masses volumiques à l'état frais – BGR squelettes granulaires modifiés

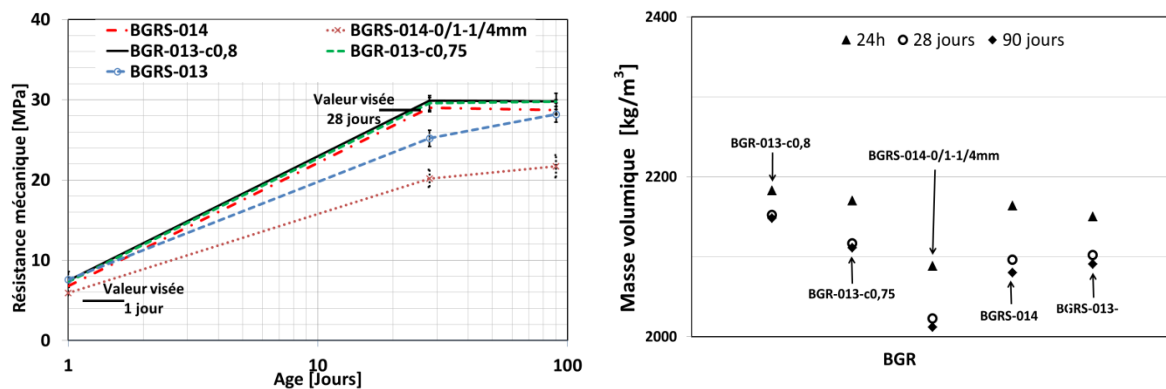


Figure 98 : Résistances et masses volumiques à l'état durci BGR squelettes granulaires modifiés

La coupe granulaire supplémentaire à 1mm, réalisée pour optimiser la superposition des 2 squelettes (BGNC et BGR), conduit à une augmentation de la teneur en éléments inférieurs à 1mm (21% sans coupure à 30,5% avec coupure). Les résultats sur bétons aux états frais et durcis indiquent que cette modification entraîne une baisse de l'affaissement immédiat (de 200 mm à 180 mm) et que cette baisse d'affaissement est maintenue dans le temps. En effet, la perte d'affaissement au cours du temps est similaire à celle du BGR 014 de référence. Les masses volumiques à l'état frais et durci sont également diminuées, mais la

perte d'eau entre les différentes échéances est proche de celle du BGR 014 de référence. Les résistances mécaniques obtenues sur ce béton sont très inférieures à 28 jours (20 MPa) à celles obtenues sur le béton BGR014 sans cette coupure à 1 mm (29 MPa). Ainsi rechercher un squelette granulaire plus proche de celui du BGNC n'est pas une solution optimale pour le BGR puisque l'ouvrabilité et les résistances mécaniques sont diminuées. Il faut rappeler ici que cette recherche de superposition avait été faite pour comparer les propriétés des BGR et des BGNC à squelettes « proches », ce choix n'avait pas été fait dans un but d'optimisation de squelette granulaire.

Les sables recyclés présentent des modules de finesse supérieurs à ceux des sables naturels concassés (3,4 pour le GR contre 2,4 pour le GNC selon la EN 12620) et des coefficients d'uniformité également plus élevés (8,3 pour le GR contre 2,5 pour le GNC). Cette coupure granulaire modifie ces modules et coefficients, ainsi le sable GR reconstitué présente un module de finesse de 2,3 et un coefficient d'uniformité de 6,1. Les résultats tendent donc à montrer qu'un sable de granulométrie grossière et étalée est peut être préférable pour les BGR à un sable plus fin (au regard du module de finesse) et de granulométrie serrée.

Le squelette granulaire non fité conduit à une teneur en sable dans le squelette granulaire complet du BGR moindre (39% contre 45,1%) et de ce fait des teneurs en gravillons supérieures. Les résultats obtenus sur ces bétons indiquent qu'une teneur en sable plus basse n'améliore pas ou très peu l'ouvrabilité des BGR. Au contraire, à même compacité de 0,8 l'ouvrabilité des BGR avec une teneur en sable plus faible est moins bonne (180 mm d'affaissement à 5 minutes contre 210 mm). Par contre les résistances mécaniques de ces bétons sont améliorées puisque les BGR présentent des résistances mécaniques de 25 MPa pour le squelette fité contre 30 MPa pour le squelette non fité (donc avec moins de sable) et ceci quelle que soit la compacité théorique supposée.

Ainsi, les résultats obtenus sur les bétons pour lesquels des modifications du squelette granulaire ont été faites conduisent aux conclusions suivantes :

Concernant le squelette granulaire du sable recyclé : l'augmentation de la teneur en éléments inférieurs à 1 mm nuit aux propriétés à l'état frais et durci. Un squelette granulaire avec du sable plus grossier et plus étalé est préférable.

Concernant le squelette granulaire complet du BGR : la diminution de la teneur en sable 0/4 mm nuit aux propriétés à l'état frais (à compacité égale) mais améliore les résistances mécaniques.

Concernant la compacité prévisionnelle (fonction de la teneur en air à l'état frais) : le choix d'une compacité théorique inférieure pour le calcul des compositions des GBR est probablement plus proche de la compacité réelle ce qui permet d'améliorer les propriétés des bétons à l'état frais et durci.

Rappelons ici que le choix de compacités égales s'était justifié par le choix de proportions volumiques constantes entre constituants et de ne faire varier que les proportions des classes granulaires dans le squelette.

Pour mémoire, la compacité avait été conservée identique pour les BGNC et BGR car même si les BGR présentent des propriétés morphologiques (circularité et convexité) différentes, la présence d'éléments fins laissait supposer une meilleure compacité, cette hypothèse serait donc à revoir.

Pour compléter cette étude, il a semblé intéressant de réaliser des BGR pour lesquels le squelette granulaire serait déterminé directement à partir de la méthode Dreux Gorisse avec prise en compte de la proportion d'éléments fins réellement présents dans le sable (valeur obtenue par granulométrie laser). L'ensemble des résultats sur ce béton n'a pu être réalisé dans le temps imparti à la thèse ; son calcul théorique conduit au squelette granulaire suivant et les résultats à l'état frais et durci à 24 heures sont présentés.

Tableau 61: Résultats du squelette granulaire superposé

Fractions	Proportions massiques
0/4 mm	55,4%
4/10 mm	8,4%
10/20 mm	36,2%

Tableau 62 Résultats de résistance mécanique à 24 heures sur BGR formulé selon Dreux Gorisse

Temps [jours]	BGRS-014	BGRS-014-0/1-1/4mm	BGR-014-dreux-c0,8	BGR-014-dreux-c0,75
1	6,8	5,9	4,8	5,27
Ecart type	0	0,3	0,22	0,12

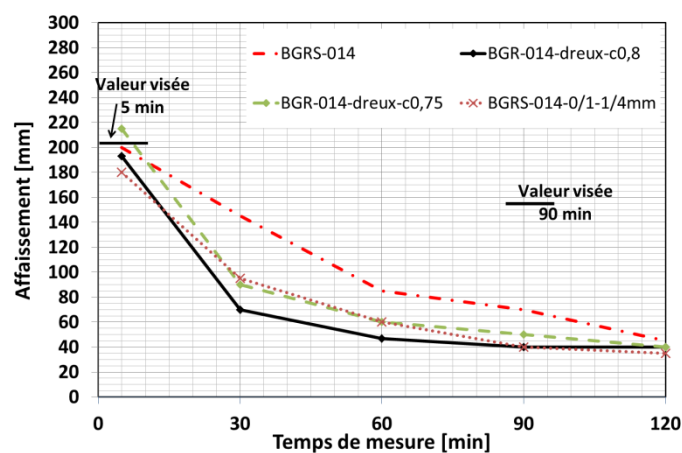
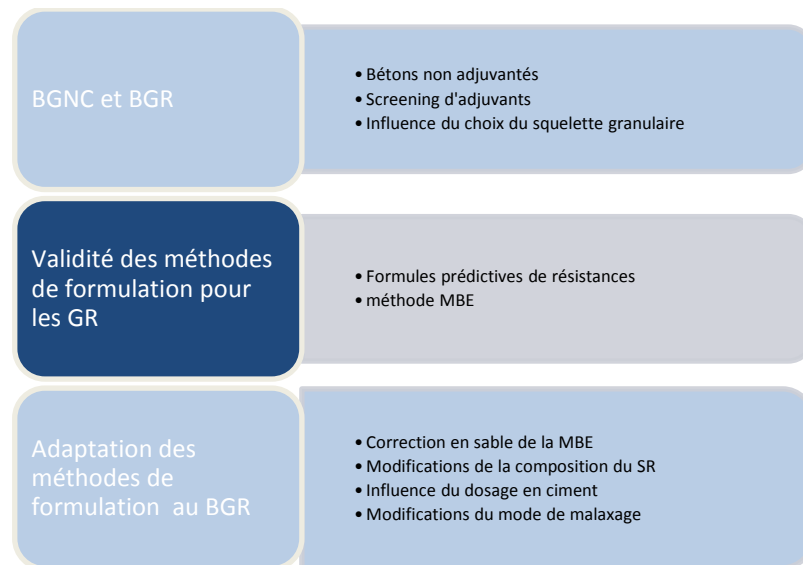


Figure 99 Evolution d'ouvrabilité des bétons réalisés avec l'adjuvant 014 dont les squelettes ont été modifiés

Ces résultats indiquent qu'augmenter de façon importante la teneur en sable n'est bénéfique ni pour l'ouvrabilité, ni pour les résistances mécaniques à court terme. **Ces résultats confrontés aux précédents confirment que le dosage de la teneur en sable ne peut se faire par les méthodes habituelles de détermination du squelette granulaire.**

3 Applicabilité des méthodes de formulation usuelles



3.1 Validité de la méthode MBE à l'état frais pour les GR

Dans un premier temps, des mortiers de bétons équivalents aux bétons ont été formulés et réalisés en appliquant la méthode MBE telle que décrite dans le projet Calibé ((Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil (France), 2004)). Un béton de granulat roulé (voir composition Tableau) et son mortier équivalent ont également été réalisés pour vérifier la validité de cette méthode. Les résultats des corrélations obtenues sur les propriétés à l'état frais sont présentés Figure 100. Les deux rapports $E/C = 0,65$ et $E/C = 0,76$ sont comparés.

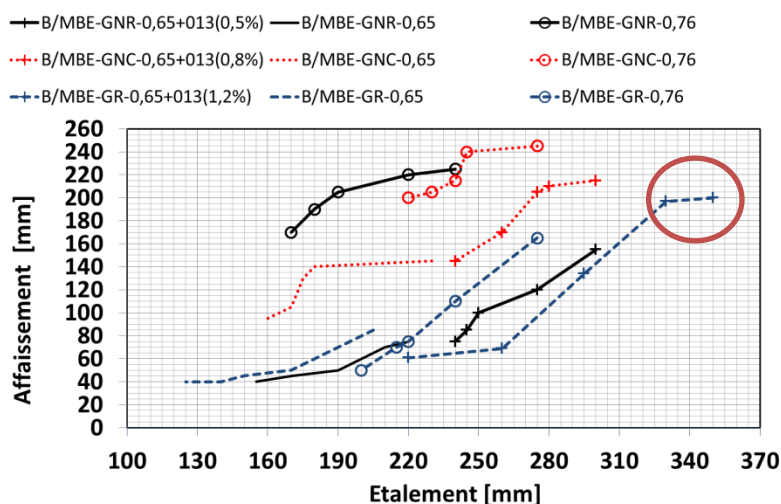


Figure 100 : corrélation béton et MBE non adjuvanté et sans correction en sable

A la lecture des courbes présentées Figure 100 le constat suivant peut être fait : il n'existe pas une courbe de corrélation unique pour tout granulat, tout rapport E/C, que le béton soit adjuvanté ou non. Les influences d'un changement de granulat, d'un changement de rapport E/C ou de l'ajout d'un adjuvant sont en outre interdépendantes.

Par exemple, pour les granulats naturels concassés ou roulés, la diminution du rapport E/C décale les courbes vers le bas du graphique (étalement du mortier identique pour un affaissement du béton plus faible). De plus ce décalage n'est pas de même amplitude pour les deux granulats naturels et est inversé pour le granulat recycle. Par contre, l'ajout d'adjuvant ne modifie pas ou peu les courbes de corrélation des 3 granulats.

En ce qui concerne plus particulièrement le granulat recyclé, le mortier adjuvanté présente des ouvrabilités très supérieures à celles de son béton équivalent notamment aux valeurs élevées d'ouvrabilité (comme repéré Figure 100). Ainsi, à un BGR adjuvanté de classe de consistance S4 correspond un mortier d'étalement 350 mm, valeur très au-delà des valeurs admissibles car représentatives d'un mortier liquide qui présente une ségrégation quasi instantanée.

Il n'est donc pas possible de réaliser ces MBE pour effectuer le screening des adjuvants, cette ségrégation observée fausserait les résultats. Une adaptation de cette méthode, particulièrement pour les BGR, est nécessaire. Cette particularité des GR est liée à leur morphologie et notamment à leur circularité et convexité inférieures à celle des granulats naturels roulés ou concassés. Cette différence de morphologie entraîne une sous-estimation de la surface spécifique lors du calcul des formulations de MBE. En outre, des mesures des critères morphologiques sur sables 1-4 mm naturels et recyclés ont indiqué que les différences observées sur la circularité étaient moindres pour les sables que pour les gravillons et graviers. Ainsi la sous-estimation de la surface spécifique des gravillons

et graviers recyclés n'est pas compensée par un sable présentant aussi cette caractéristique. Une correction de la quantité de sable à ajouter au MBE est donc nécessaire pour atteindre une surface spécifique plus proche de celles des gravillons et graviers.

3.2 Validité des formules prédictives de propriétés

Les valeurs prédictives obtenues à partir des formules analytiques simples données chapitre 1 ont été comparées aux valeurs expérimentales.

Les modèles plus complets tels que le modèle proposé par De Larrard (de Larrard, 2000)(Dao, 2012) n'est pas étudié car d'une part il nécessite l'utilisation du logiciel bétonlab pro et d'autre part le MEC (Modèle d'Empilement Compressible) proposé pour la détermination du squelette granulaire peut ne pas être adapté aux GR du fait de sa modification au cours du malaxage mise en évidence au chapitre 2.

Les formules analytiques suivantes de prédiction des résistances mécaniques ont été étudiées :

- **Méthode de Bolomey sans la prise en compte de l'air occlus : cas des bétons**

Selon Bolomey, la formule qui permet de déterminer les résistances prévisionnelles est la suivante (Équation 14) (Association technique de l'industrie des liants hydrauliques et al., 1996).

$$f_{c28} = G * F_{CE} * \left(\frac{C}{E} - 0,5\right)$$

Équation 14

f_{c28} étant la résistance moyenne prévisionnelle à 28 Jours

F_{CE} classe vraie du ciment soit dans notre cas $F_{CE} = 65 \text{ MPa}$

G le coefficient granulaire.

C'est la détermination de ce coefficient qui n'est pas aisé dans le cas des granulats recyclés puisqu'il prend en compte la qualité des granulats et la dimension maximale des grains. La qualité des granulats dépendant de leur origine ais aussi de leurs propriétés mécaniques. La teneur en air entraîné n'étant pas prise en compte dans cette équation, ce coefficient granulaire doit aussi inclure la qualité de mise en œuvre directement liée à cette teneur en air.

En première estimation, pour des bétons non adjuvantés respectivement de classe S3 pour les BGNC et S2 pour les BGR, ce coefficient sera pris égal à 0,55 pour les BGNC et 0,45 pour les BGR.

Ainsi, avec $E/C = 0,65$, on obtient respectivement les valeurs prévisionnelles de 30 et 37 MPa, valeurs supérieures aux valeurs expérimentales obtenues respectivement de 22 et 31 MPa. Pour obtenir ces valeurs les coefficients G choisis doivent être respectivement de 0,33 et 0,46.

- **Méthode de Bolomey avec la prise en compte de l'air occlus**

La relation de Bolomey mise en place dans les années 1935 a été modifiée pour prendre en compte la teneur en air à l'état frais, ainsi elle donne (Équation 1).

$$f_{c28} = f_m * K_b * \left(\frac{C}{(E + V)} - 0,5 \right)$$

Équation 15

Où :

f_{c28} étant la résistance moyenne prévisionnelle à 28 Jours

f_m classe vraie du ciment soit dans notre cas $F_{CE} = 65 \text{ MPa}$

K_b le coefficient granulaire.

Les valeurs de K_b sont définies selon la nature minéralogique du granulat ou l'état poreux des granulats pour les granulats calcaires.

Tableau 63: Valeurs des coefficients granulaires K_b (Dreux and Festa, 1998)

Nature pétrographique des granulats	Dimensions des granulats (mm)		
	10 à 16	20 à 25	30 à 40
Siliceux, légèrement altérés	0,45	0,50	0,55
Siliceux, roulés	0,50	0,55	0,60
Calcaires, durs	0,55	0,60	0,65

En considérant $\frac{c}{(E+V)} = K_v * \frac{c}{E}$, il est proposé les valeurs de K_v suivantes (Association technique de l'industrie des liants hydrauliques et al., 1996) :

Tableau 64 : Valeur de K_v

Consistance	Ferme	Plastique	Très plastique
K_v	0,87	0,90	0,93

En prenant les valeurs de K_b identiques aux précédentes, et les valeurs de K_v respectivement égale à 0,90 (S2 plastique) pour le BGR et 0,93 (très plastique) pour le BGNC on obtient des valeurs prévisionnelles égales à 26 et 33 MPa, plus proches des valeurs expérimentales obtenues. En considérant que les bétons ont été mis en place après deux heures, les classes d'affaissement étaient alors respectivement S1 (ferme) et S2 (plastique) et les valeurs prévisionnelles obtenues respectivement de 24,5 et 31,5 MPa.

Le modèle prévisionnel est satisfaisant pour le BGNC (31 MPa), il surestime légèrement les valeurs pour le BGR (22 MPa). On peut attribuer cette surévaluation à l'estimation des coefficients K_b et K_v ou à une surestimation de C/E, puisque nous faisons l'hypothèse que partie de l'eau est désorbée lors du malaxage des GRB.

En conservant les valeurs de $K_b = 0,45$ et de $K_v = 0,87$ pour le BGR, le rapport C/E estimé est égal à 0,69 soit un supplément d'eau de 10 litres au m^3 , soit environ 10% de l'eau d'absorption qui serait désorbée, valeur potentiellement réaliste.

L'application de ces modèles aux bétons adjuvantés très fluide S4 est plus délicate car les teneurs en air ne peuvent être directement corrélées aux affaissements tel que proposées dans le Tableau 64, les superplastifiants pouvant présenter un entraîneur d'air, n'ayant pas mesuré cette teneur en air, nous ne pouvons utiliser ce modèle pour les bétons adjuvantés. La plage de variation observée pour les résistances mécaniques sur les bétons adjuvantés confirme cette remarque.

Méthode de Féret

La relation définie par Féret en 1892 pour le calcul des résistances à la compression des bétons à 28 jours sous sa forme la plus complète s'écrit comme suit (Équation 16) :

$$f_{c28} = f_{mc} * K_f * \left(\frac{V_c}{V_c + V_e + V_a}\right)^2 \quad (\text{exprimé en volume})$$

$$f_{c28} = f_{mc} * K_f * \left(\frac{1}{1 + \frac{\rho_c}{\rho_e} \left(\frac{E + \rho_e V_a}{C}\right)}\right)^2 \quad (\text{exprimé en masse})$$

Équation 16

Où :

f_{c28} est la résistance moyenne prévisionnelle du béton à l'échéance considérée de 28 Jours

f_{mc} est la rclasse vraie du ciment

K_f est un coefficient qui dépend principalement des granulats (sable, gravillons et graviers) et il caractérise le squelette granulaire. Selon Dreux, " Il varie de 4,4 à 5,6 ".

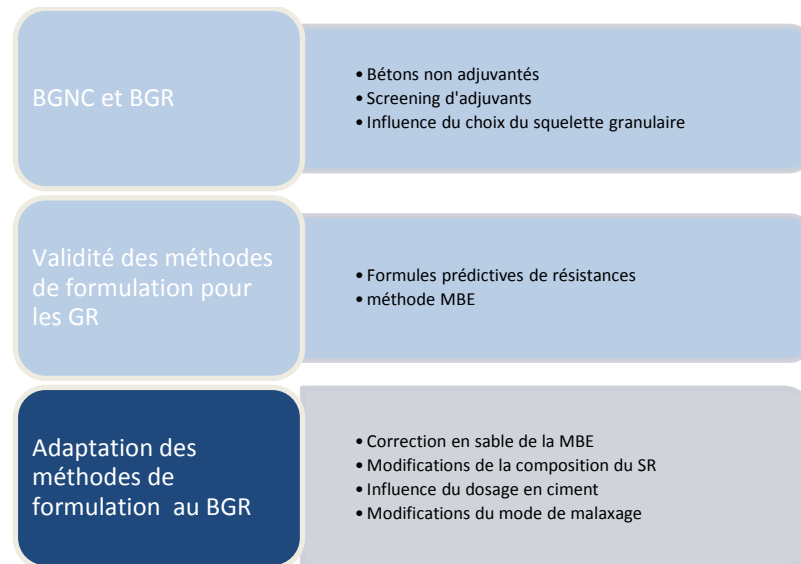
L'utilisation de ce modèle conduit aux mêmes conclusions que la relation de Bolomey généralisée (avec pris en compte de l'air), la difficulté réside dans l'estimation de ce coefficient granulaire.

4 Adaptation des méthodes de formulation et de mise en œuvre

Des adaptations à la méthode MBE sont proposées. Elles prennent en compte la spécificité morphologique des granulats recyclés.

Ensuite, les influences d'autres paramètres de formulation et de mise en œuvre des bétons tels que le taux de substitution des granulats recyclés, le retrait des éléments fins recyclés, la teneur en ciment et les modes de malaxage et de pré-humidification ont été évaluées.

Afin de compléter l'analyse, des bétons et mortiers équivalents de granulats naturels roulés ont été fabriqués.



4.1 Corrections de la méthode MBE

Au regard des premiers résultats obtenus sur mortiers de bétons équivalents, il s'est avéré que dans le cas des granulats recyclés, la méthode n'était pas directement transposable du fait, entre autres, de la géométrie particulière des granulats recyclés, notamment de leur critère de circularité. Les mortiers obtenus étaient trop liquides et présentaient une ségrégation importante, leur comportement à l'état frais n'était donc pas équivalent à celui du béton.

Dans le but de corriger la valeur supposée sous-estimée de la surface spécifique des gravillons et graviers par la méthode Calibé, une correction de la teneur en sable a alors été effectuée.

4.1.1 Correction en sable des MBE

La valeur de cette correction a été déterminée lors d'une campagne d'essai au cours de laquelle plusieurs taux de substitution ont été testés. Le taux retenu est celui qui correspond le mieux à une courbe de corrélation « moyenne » habituellement utilisée par le partenaire industriel pour transposer les résultats obtenus sur mortiers aux résultats prévisionnels sur bétons. Ces résultats sont reportés dans le rapport « essais réalisés sur les compositions de MBE corrigées en sable » (Kunwufine et al., 2014)

A l'issue de ces résultats :

Pour la corrélation béton/MBE sur sable naturel concassé : Le MBE avec 0% d'ajout supplémentaire de sable naturel se rapproche bien de la courbe de référence.

Pour la corrélation béton/MBE sur sable recyclé : Le MBE avec 13 % d'ajout supplémentaire de sable recyclé se rapproche bien des valeurs de référence et cette correction correspond à l'écart trouvé au chapitre 2 dans l'estimation des surfaces spécifiques entre gravillons et graviers naturels concassés et recyclés. Les écarts sur les classes plus faibles étant moindre (quelques %).

De ce fait, 13% d'ajout de sables recyclés seront effectués lors de la formulation des MBEGR.

Ce taux de correction de teneur en sable est à rapprocher des critères spécifiques de morphologie identifiés au chapitre 2. Il pourrait être déterminé de façon plus précise après analyse d'image par stéréo photographie en 3 dimensions.

De nouvelles corrélations ont été établies et sont présentées Figure 101.

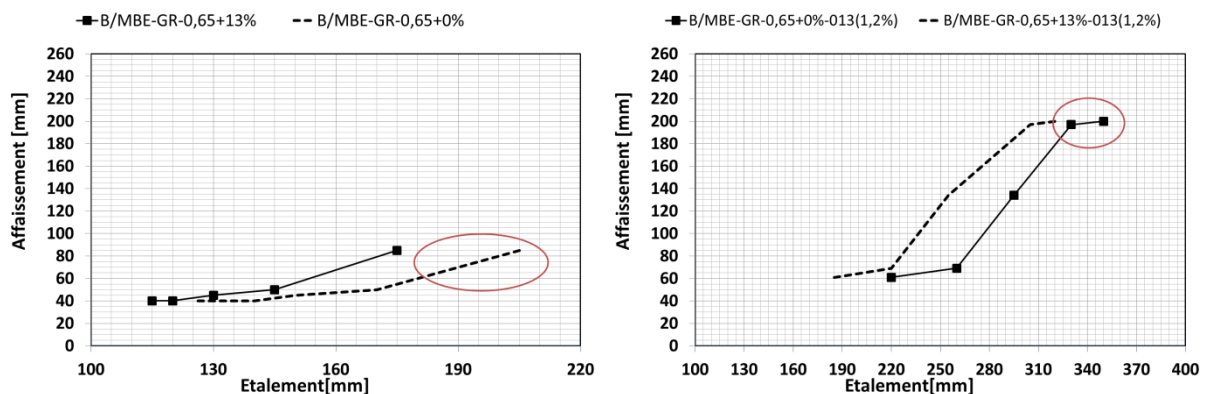


Figure 101 Influence de la correction en sable sur la corrélation B/MBE sans et avec adjuvant

La lecture des graphes présentés Figure 101 confirme que la correction en sable est une solution qui permet d'améliorer les corrélations entre bétons et mortiers équivalents, puisque l'étalement excessif observé sur mortier qui entraînait une ségrégation n'est plus observé.

Cette correction en sable a donc été utilisée pour réaliser le screening des adjuvants sur MBE, à l'issue de la réalisation de ces compositions de MBE et des essais de caractérisation à l'état frais et durcis, les corrélations entre bétons et mortiers équivalents sont étudiées.

4.1.2 Corrélations bétons/MBE à l'état frais sur les compositions du screening

Un grand nombre des adjuvants testés sur bétons de granulats naturels concassés (BGNC) et sur bétons de granulats recyclés (BGR) ont été testés sur mortiers équivalents (respectivement MBEGNC et MBEGR). Le détail des compositions réalisées est donné en annexe 9.

Les résultats des corrélations B/MBE à l'état frais sont présentés Figure 102 à Figure 105.

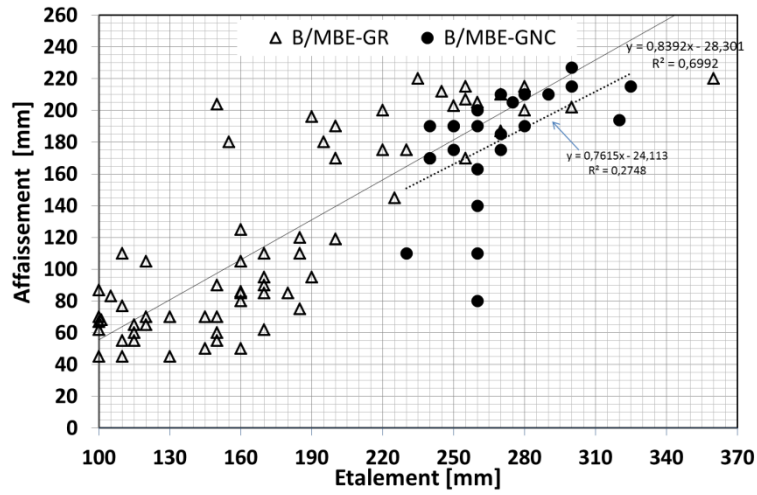


Figure 102 Corrélations B/MBE adjuvants GNC et GR, toutes échées

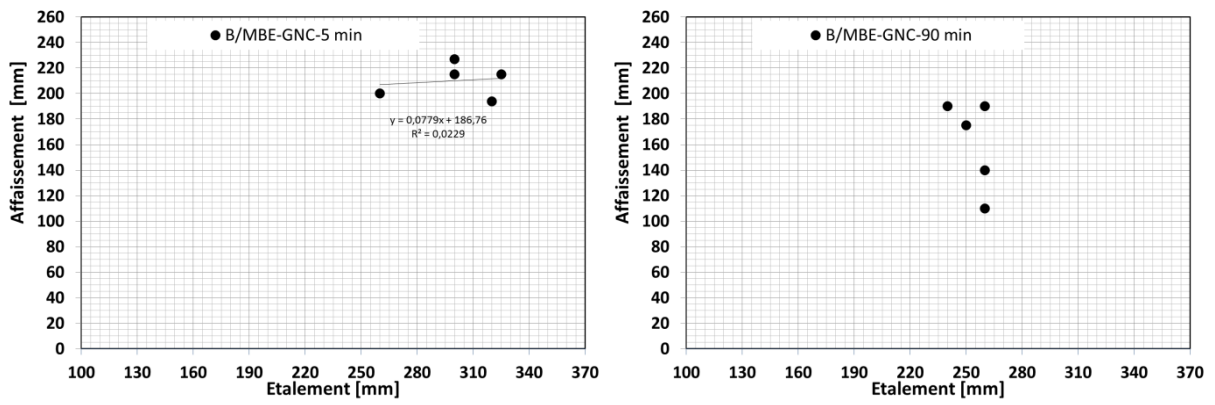


Figure 103 Corrélations B/MBE adjuvants GNC 5 et 90 min

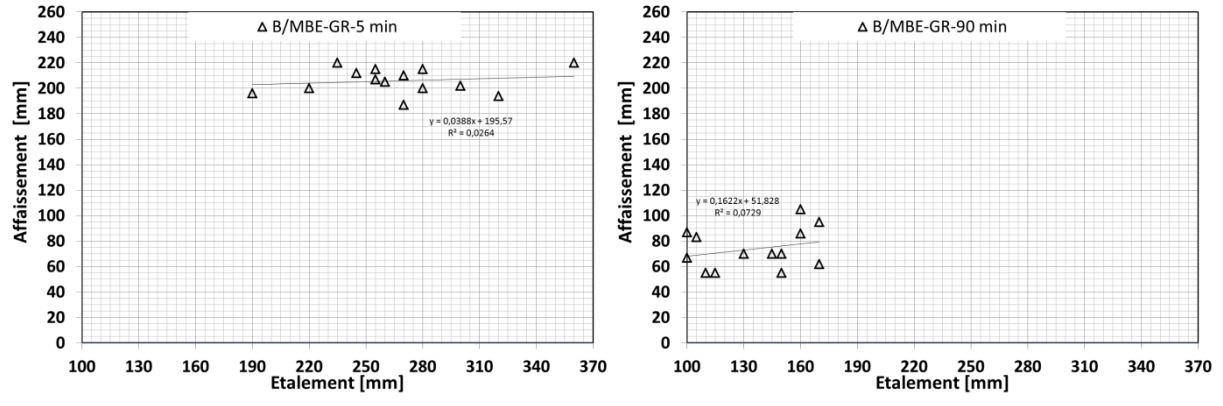


Figure 104 Corrélations B/MBE adjuvants GR 5 et 90 min

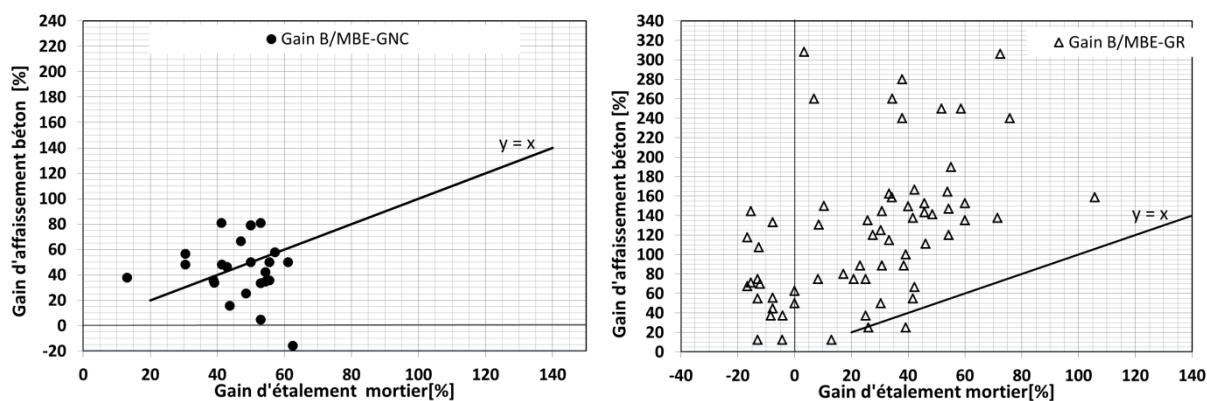


Figure 105 Corrélations gains ouvrabilité B/MBE adjuvantés GR 5 et 90 min

La représentation des valeurs d'affaissement des bétons corrélées à celles d'étalement des mortiers indique qu'il n'est pas possible d'obtenir une courbe de corrélation unique pour tous les adjuvants, ce qui est illustré par le coefficient de corrélation des droites de régression linéaire ($R^2 = 0,70$ pour les GR et $R^2 = 0,27$ pour les GNC).

Cette mauvaise corrélation a plusieurs origines :

- La nature de l'adjuvant qui peut agir différemment sur béton ou mortier,
- l'âge du mortier/béton auquel la mesure est faite.

En effet les résultats présentés Figure 102 regroupent les mesures d'affaissement/étalement de tous les bétons/mortiers aux âges de 2, 30, 60, 90 et 120 minutes. Or, aux échéances de 90 et 120 minutes, les mortiers dont le dosage en ciment est plus élevé (427 kg/m^3) peuvent avoir tendance à se rigidifier plus (même si le rapport E/C est maintenu constant) que leurs bétons. Au contraire à 5 minutes, on observe une fluidité supérieure des mortiers par rapport à leurs bétons (voir Figure 103).

Il est donc difficile d'effectuer une sélection d'adjuvants efficaces à l'aide de cette méthode. Ce constat est confirmé par l'analyse des courbes représentées Figure 105, sur lesquelles le gain d'affaissement entre béton adjuvanté et non adjuvanté est corrélé au gain d'étalement entre mortier adjuvanté et non adjuvanté.

Pour pouvoir juger de l'efficacité d'un adjuvant sur MBE, ce calcul de gain est un critère pertinent. Or les résultats indiquent que ce gain est très différent entre les bétons et les MBE., surtout pour les granulats recyclés.

La corrélation B/MBE n'est donc pas adaptée aux granulats recyclés et n'est pas unique quel que soit l'adjuvant ou l'échéance à laquelle la mesure est effectuée (pour les GR et les GNC).

4.1.3 Corrélations bétons MBE à l'état durci sur les compositions du screening

Le calcul des compositions de MBE étant fait à rapport E/C constant, il a semblé pertinent de comparer les résistances mécaniques des bétons et mortiers équivalents. Les résultats de ces comparaisons sont présentés Figure 106.

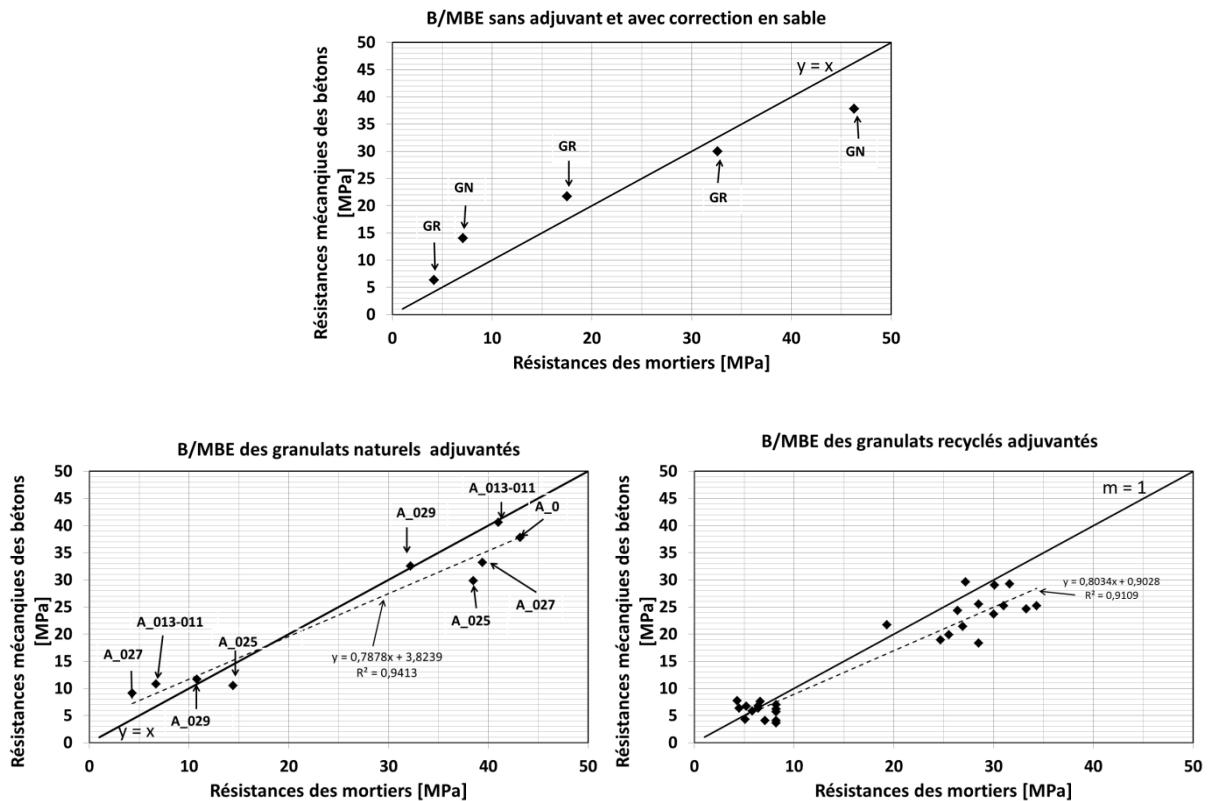


Figure 106 Corrélations résistances mécaniques B/MBE

La lecture des résultats tend à montrer qu'une corrélation existe entre les résistances mécaniques des bétons et de leur mortier équivalent, puisque les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0,9. Si la corrélation était parfaite, tous les points se trouveraient sur la droite représentée sur les graphiques. Ainsi, il est observé qu'à 28 et 90 jours, les mortiers sont plus résistants que leurs bétons. Ce résultat peut être expliqué par le fait que le dosage en ciment des mortiers équivalents est élevé (427 kg/m^3 contre 260 kg/m^3 pour les bétons), même si selon les formules prédictives de résistances telles que la formule de Bolomey, seul le rapport E/C est à prendre en compte avec la qualité du granulat. A ce propos, un granulat de dimension plus petite (telle celle des mortiers) devrait conduire à une résistance plus faible selon ces formules prédictives, ce qui ne se retrouve pas ici puisque les MBE de GR sont plus résistants que leurs bétons. Au contraire le MBEGR non adjuvanté est mieux corrélé à son béton.

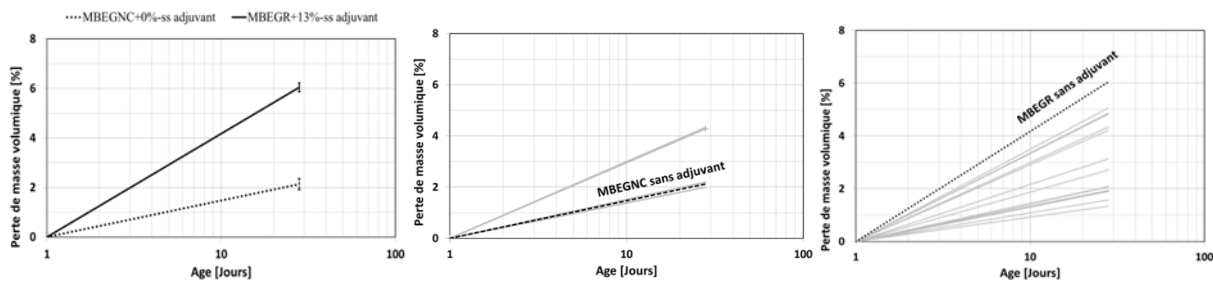


Figure 107 Perte de masse des MBE GR et GNC

Les pertes de masses sur matériau durci (donc les pertes d'eau pendant le durcissement) sont aussi corrélées à celles du béton puisque les mêmes phénomènes que ceux identifiés lors du screening sur béton sont retrouvés : l'utilisation d'adjuvant limite la perte de masse liée au départ d'eau, et ceci surtout pour les GR (voir Figure 107 et Figure 95). Cette moindre perte d'eau (supposée liée à la désorption des granulats) peut contribuer à modifier les corrélations B/MBE.

Par ailleurs, les mesures d'air entraîné sur matériau frais réalisées sur MBE indiquent que les MBEGR ont des teneurs en air entraîné comprises entre 3 et 6% et que les MBEGNC ont des teneurs comprises entre 4 et 5%. Il n'est pas observé de corrélation avec les affaissements initiaux ou à plus longue échéance (90 minutes). Les résultats détaillés sont donnés en annexe 10.

La corrélation B/MBE peut donc s'appliquer aux prévisions de résistances mécaniques à 28 jours, même si elle n'est pas conçue à l'origine pour cette application.

L'évolution de l'ouvrabilité (étalement) au cours des premières heures et des résistances mécaniques au cours du temps des MBEGNC et MBEGR donnée en annexe 10 va dans le même sens que celles des bétons mais les amplitudes sont très différentes et quelques MBEGNR adjuvantés ont un maintien d'ouvrabilité inférieur au MBEGNR non adjuvanté. Ici encore, la corrélation est adjuvant-dépendante.

4.2 Modifications des paramètres de formulation et de mise en œuvre des bétons

Des propositions de modifications des paramètres de formulation et de mise en œuvre ont été faites pour prendre en compte certaines spécificités des granulats recyclés. Elles sont présentées ci-après.

4.2.1 Influence de la nature, de la forme des granulats et de la teneur en sable GR

Il a été montré précédemment qu'une augmentation de la fraction d'éléments inférieurs à 1mm nuit aux propriétés à l'état frais et durci et qu'une baisse de la teneur en sable dans les BGR provoque un accroissement des résistances mécaniques. Comme les sables ont une teneur élevée en élément fins, il a été jugé judicieux de réaliser des BGR pour lesquels soit le

sable recyclé est remplacé par du sable naturel concassé ou roulé, soit les éléments fins inférieurs à 63 µm sont retirés. Le détail des compositions est donné ci-après.

- A titre de comparaison, des bétons composés à 100% de granulat naturel roulé (GBNR) ont été réalisés, en complément des bétons de granulats naturels concassés et des bétons de granulats recyclés.

Pour ces derniers le squelette granulaire a été déterminé selon la méthode CES- Dreux Gorisse. Il n’y a donc pas eu de « fitage » d’un squelette sur l’autre.

Le squelette granulaire obtenu et la composition théorique sont donnés *Tableau 66*

Tableau 65 : squelette granulaire du béton de granulats naturels roulés

Fractions	Proportions massiques
0/4 mm	40,5%
4/8 mm	6%
8/16 mm	53,50%

Tableau 66 : Composition théorique de bétons de granulats naturels roulés pour 1 m³

	Ciment	Fractions granulaires			Eau
		0/4 mm	4/8 mm	8/16 mm	
Composition béton massique (kg)	260	754,68	111,80	996,93	169
Masse volumique (kg/m ³)	3060	2630	2590	2590	1000
Composition béton volumique (m ³)	0,085	0,287	0,043	0,385	0,169

Seuls les essais sur bétons frais ont été réalisés ils sont présentés Figure 108

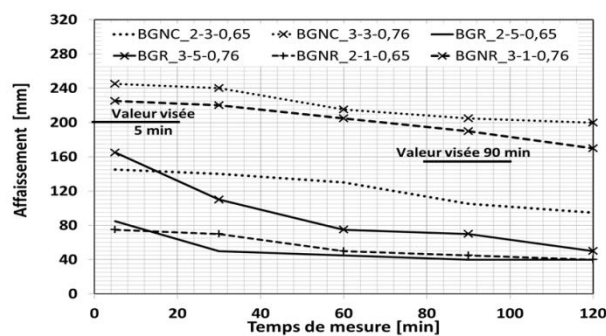


Figure 108 : Affaissement des BGNC, BGNR et BGR

Les résultats indiquent que l’ouvrabilité des BGNR est plus sensible à la modification du rapport E/C puisque une augmentation de ce rapport améliore très nettement l’ouvrabilité du BGNR et son maintien dans le temps. Le BGNR au rapport E/C = 0,65 présente un

comportement à l'état frais proche de celui du BGR et au rapport E/C = 0,76 proche de celui du BGNC. Il est donc fortement E/C dépendant.

- Ensuite, des bétons « mixtes » naturels/recyclés ont été réalisés.

Pour ces bétons, le sable recyclé a été substitué par du sable naturel concassé ou par du sable naturel roulé. Une superposition du squelette mixte sur le squelette naturel a été effectuée comme précédemment. Les proportions massiques obtenues sont données Tableau 67 et Tableau 68

Tableau 67: Squelette granulaire composé des granulats recyclés et de sable naturel concassé

Fractions	Proportions massiques
GNC 0/4 mm	40%
GR 4 4/10 mm	5%
GR 4 10/20 mm	55%

Tableau 68: Squelette granulaire composé des granulats recyclés de sable naturel roulé

Fractions	Proportions massiques
GNR 0/4 mm	43%
GR 4 4/10 mm	5%
GR 4 10/20 mm	52%

Les compositions théoriques des bétons obtenus sont données en annexe 9.

Les résultats obtenus à l'état frais et durci sont présentés Figure 109.

- Enfin, le squelette granulaire du sable recyclé est modifié par retrait des éléments fins inférieurs à 63 microns Le squelette granulaire est alors fité sur celui du sable naturel comme précédemment (Tableau 69). La composition théorique est donnée en annexe 10.

Tableau 69: Squelette granulaire des granulats recyclés sans éléments fins

Fractions	Proportions massiques
63µm/4 mm	46%
4/10 mm	5%
10/20 mm	49%

Les résultats à l'état frais et durcis sont présentés Figure 109.

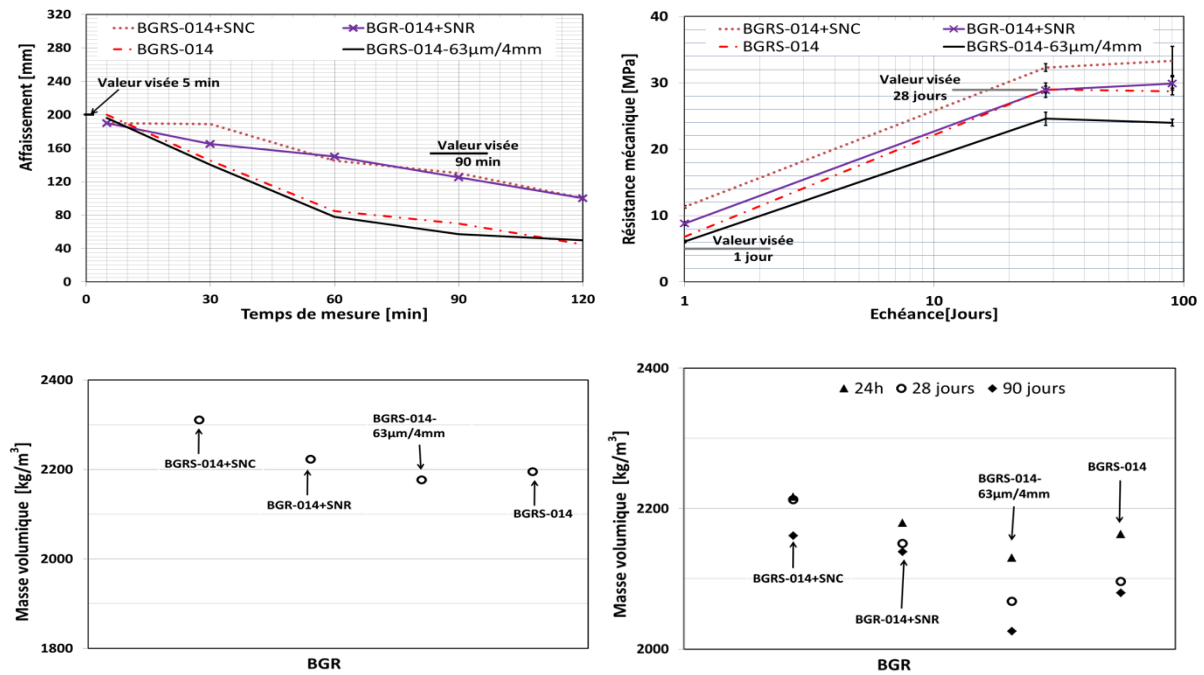


Figure 109 Caractéristiques des BGR dont la fraction sableuse a été modifiée

La substitution du sable recyclé par du sable naturel roulé ou concassé n'améliore pas l'ouvrabilité initiale (à 5min) des BGR mais permet un meilleur maintien de cette ouvrabilité puisque un affaissement de 120mm à 90 min est conservé soit une classe de consistance S3. Cependant seul le SNC améliore les résistances mécaniques (accroissement de 3 à 4 MPa) à toute échéance. La substitution par du SNR conduit aux mêmes résistances que le BGR avec son SR. Les pertes de masses à l'état durci sont proches pour les bétons dont le sable est naturel en substitution du recyclé.

Le retrait des éléments fins inférieurs à 63 µm n'améliore pas l'ouvrabilité du BGR et nuit aux propriétés mécaniques à l'état durci à toutes les échéances. De plus, ces bétons ont des masses volumiques plus faibles et des pertes de masses à l'état durci plus élevées.

L'hypothèse peut être faite que le retrait des éléments fins génère la présence d'une quantité d'eau plus importante dans la pâte de ciment, suite à sa non adsorption sur ces éléments fins.

La substitution du SR par du SNR ou SNC améliore l'ouvrabilité des bétons et les résistances mécaniques dans le cas du SNC. Cependant, cet effet ne peut être attribué à la non-présence des éléments fins du SR puisque leur retrait ne modifie pas leur ouvrabilité et nuit aux résistances mécaniques. Il ne peut non plus être attribué au seul squelette granulaire des sables puisque il a été montré précédemment qu'une optimisation du squelette granulaire du sable recyclé sur le sable naturel nuisait à l'ouvrabilité. L'origine de cet effet est liée à d'autres spécificités du SR (morphologie, absorption, désorption).

Le sable naturel concassé est le seul qui présente des coefficients d'absorption faibles ce qui peut expliquer que son utilisation en substitution du sable recyclé contribue au développement des résistances mécaniques puisque peu d'eau d'absorption doit être ajoutée au mélange pour respecter une teneur en eau efficace constante au regard des normes ; eau d'absorption susceptible d'être désorbée par le ciment lors du malaxage.

La substitution du SR par du SNC améliore les propriétés à l'état frais et durci, ce qui est en accord avec les résultats de la littérature. Cependant, cette influence n'est pas liée à la présence d'éléments fins, puisque leur retrait nuit aux propriétés des BGR, ni à une amélioration du squelette granulaire.

Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus lors d'une étude réalisée au laboratoire au cours de laquelle des mortiers 0/2mm naturel et recyclés ont été mis en œuvre pour lesquels des superpositions de squelettes granulaires ont été réalisées. (Hoerd, 2013)

Lors de cette étude dont les compositions sont détaillées en annexe 9 et les résultats en annexe 10, il a été montré que :

- La reconstitution du sable recyclé pour se superposer au sable naturel concassé ou le retrait des éléments fins nuit aux résistances mécaniques (chute respectivement de 33 % et 27%).
- Les fines du squelette peuvent être considérées comme liant équivalent (et prise en compte dans le rapport $E/L_{\text{éq}}$), mais cela conduit à une perte de résistance équivalente à celle qui consiste à les retirer (27%).
- Un ajout supplémentaire de fines recyclées en tant que liant équivalent est nuisible aux résistances mécaniques. Une chute de près de 50% est observée lorsque leur teneur (éléments inférieurs à $63\mu\text{m}$) est doublé et que ce supplément est considéré comme liant équivalent.
- Le sable recyclé possède un fuseau granulaire proche de celui du sable naturel roulé normalisé et les résultats ci-dessus indiquent que ce fuseau semble être optimal vis-à-vis des résistances mécaniques.

4.2.2 Modification du dosage en ciment

Un béton de granulats naturels concassés et un béton de granulats recyclés ont été formulés avec un dosage en ciment supérieur.

En augmentant le dosage en ciment sans modification du dosage en eau ($\text{Eff}/C = 0,65$), la quantité d'eau par m^3 de béton sera supérieure et devrait faciliter la mise en œuvre, tel que préconisé par les abaques de Dreux (Dreux and Festa, 1995). Un gain en résistance mécanique est aussi attendu puisque même si le rapport E/C n'est pas modifié, le dosage en ciment est plus élevé.

En outre, ce dosage correspond mieux à celui préconisé par les formules prévisionnelles de résistances mécaniques.

Les compositions théoriques sont données en annexe 9. Les résultats à l'état frais et durcis sont présentés Figure 110.

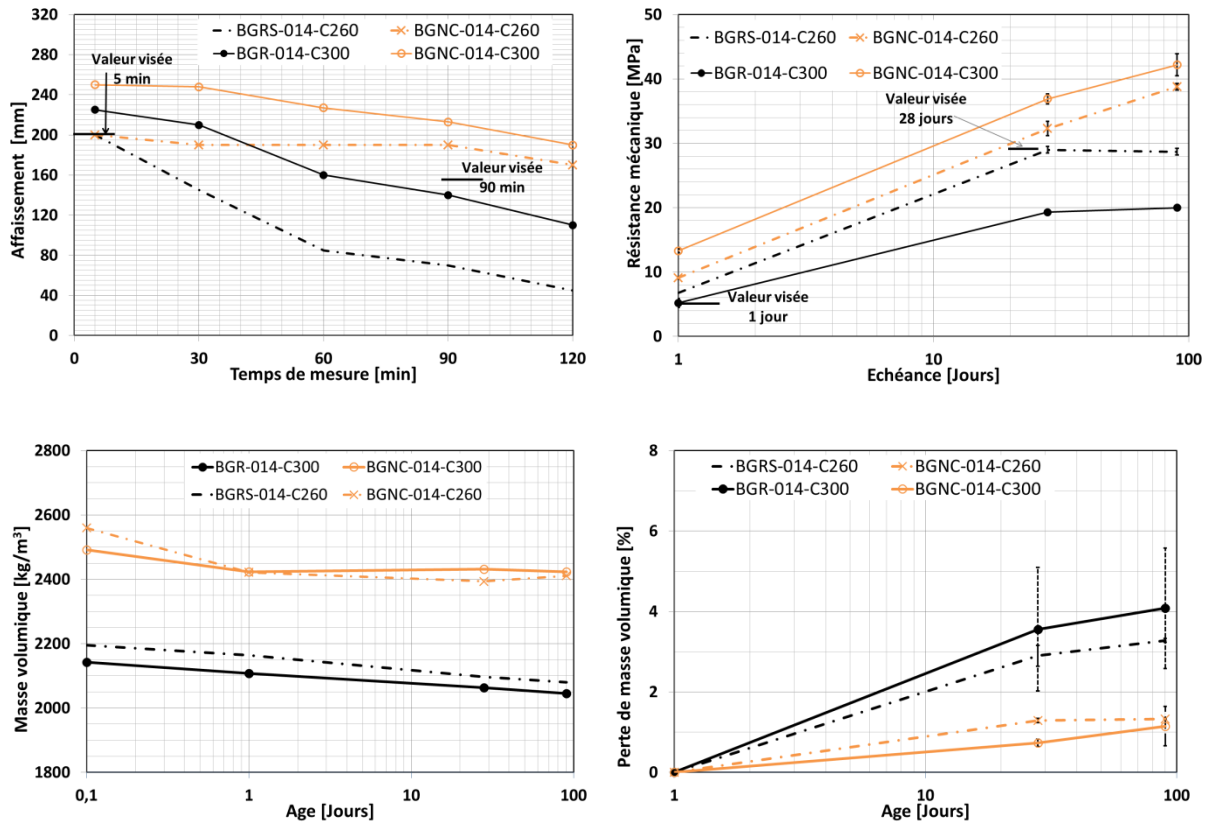


Figure 110 Caractéristiques des BGR dont le dosage en ciment a été modifié

Les résultats sont très différents entre le BGNC et le BGR. En effet, à l'état frais l'augmentation du dosage en ciment (à même rapport E/C) améliore l'ouvrabilité des bétons, son maintien n'est cependant que peu modifié. Par contre à l'état durci, une augmentation du dosage en ciment n'accroît que très légèrement les résistances mécaniques du BGNC (accroissement de 4 MPa) et nuit fortement aux résistances mécaniques du BGR (chute de 9 MPa). Ce résultat peut difficilement être remis en cause (par une réalisation « ratée » d'un béton), puisque le même constat est observé sur les MBEGNR (chute de 4 MPa, résultats donnés en annexe 10). L'hypothèse suivante peut être faite : un dosage en ciment plus élevé peut augmenter la quantité d'eau désorbée des granulats par effet de succion des ciments ce que semblent confirmer le suivi des pertes de masses à l'état durci (pertes de masses plus élevées et dispersion accrue des valeurs).

4.2.3 Modification des conditions de mise en œuvre

Après l'analyse des résultats de cinétique d'absorption et de désorption, il a été décidé de proposer des modifications au protocole de mise en œuvre des bétons de granulats recyclés. Ainsi, le mode de pré-humidification des constituants et l'ordre d'incorporation des constituants initialement utilisés ont été modifiés. Ces conditions sont décrites ci-dessous. La composition théorique du béton de granulat recyclé n'est pas modifiée.

- l'adjuvant est introduit avec l'eau de pré humidification 5 minutes avant le malaxage ;
- l'ensemble adjuvant + eau puis le ciment sont introduits en premier, ensuite les granulats non saturés ;
- l'ensemble adjuvant + eau puis le ciment sont introduits en premier, ensuite les granulats saturés ;
- l'adjuvant est introduit sans être mélangé à l'eau. Il est introduit 2 minutes avant la fin du malaxage ;
- les granulats sont introduits avec l'eau de pré humidification en premier, ensuite l'eau de gâchage adjuvantée puis en dernier le ciment les granulats sont préalablement saturés avec l'eau de prémouillage 24 heures avant le malaxage ;
- les granulats sont préalablement saturés avec l'eau de prémouillage et l'adjuvant 24 heures avant le malaxage.

Les résultats des bétons à l'état frais et durcis sont donnés Figure 111.

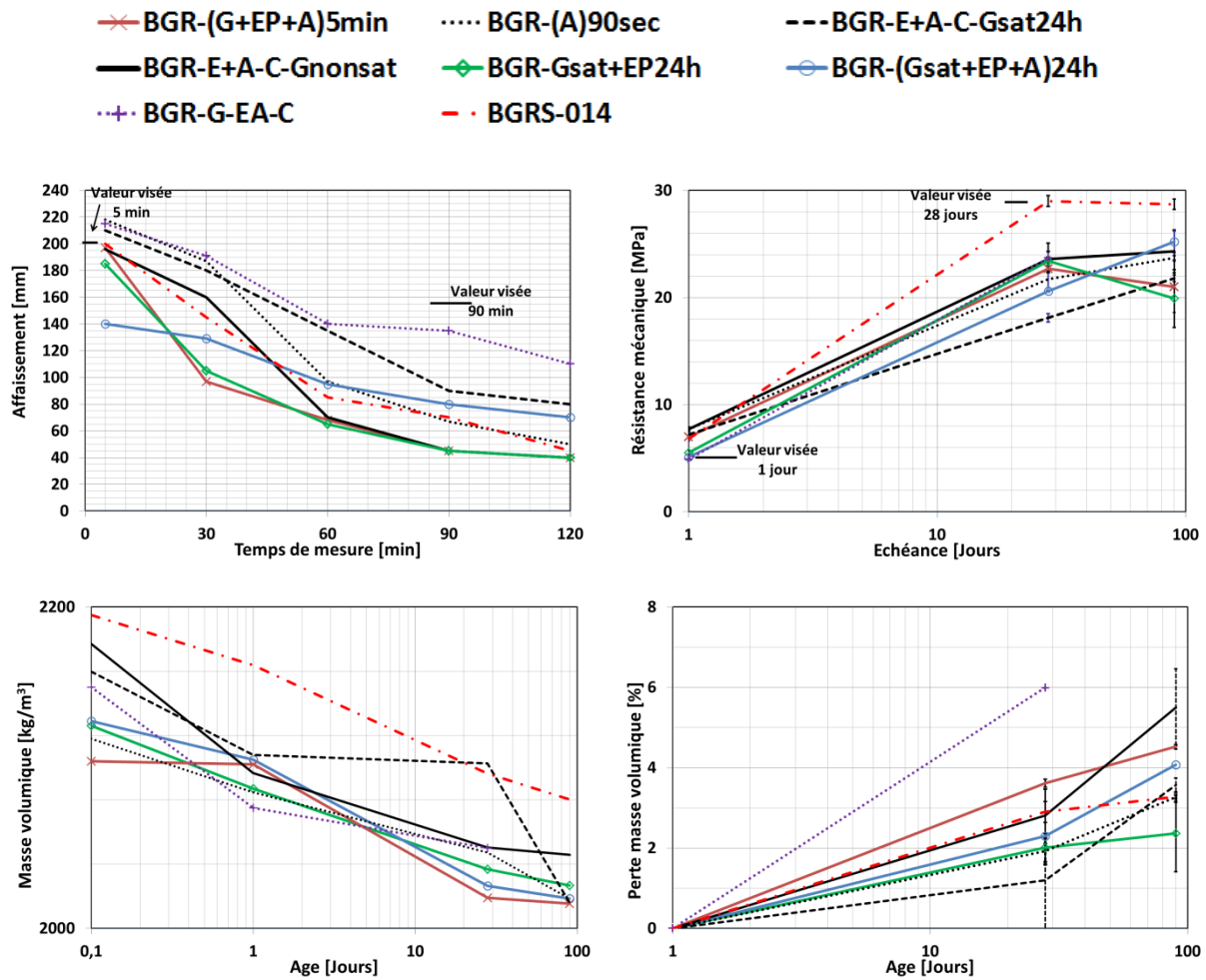


Figure 111 Caractéristiques des BGR dont les conditions de mise en œuvre ont été modifiées

Acronymes utilisés	Signification
BGR-(G+EP+A)5min	Béton BGR est formulé en préhumidifiant les granulats avec de l'eau de préhumidification adjuivée 5 minutes avant malaxage
BGR-(A)90sec	Béton BGR est formulé en introduisant l'adjuvant 90 secondes avant la fin du malaxage sans être mélangé à de l'eau
BGR-E+A-C-Gsat24h	Béton BGR est formulé en introduisant progressivement de l'eau adjuivée avec du ciment puis les granulats saturés 24 heures avant malaxage
BGR-E+A-C-Gnonsat	Béton BGR est formulé en introduisant progressivement de l'eau adjuivée avec du ciment puis les granulats dans son état naturel
BGR-Gsat+EP24h	Béton BGR est formulé avec des granulats saturés avec de l'eau de préhumidification 24 heures avant malaxage
BGR-(Gsat+EP+A)24h	Béton BGR est formulé avec des granulats saturés avec de l'eau de préhumidification adjuivée 24 heures avant malaxage
BGR-G-EA-C	Béton BGR formulé en introduisant les matériaux de la façon suivante: granulats ; eau adjuivée puis du ciment
BGRS-014	Béton BGR formulé avec l'adjuvant 014 selon la procédure suivante : Granulats préhumidifiés ; ciment ; eau efficace adjuivée

L'ouvrabilité des BGR (initiale et maintien) est améliorée lorsque le ciment est introduit après l'eau (gain de 20 à 40 mm d'affaissement). La pré-saturation des granulats 24 heures à l'avance n'a que peu d'effet sur l'ouvrabilité des bétons qui a même tendance à diminuer celle-ci lorsque aucun autre paramètre de mise en œuvre n'est modifié (BGR-Gsat6EP24h ; BGR-GsatE+A24h).

Cependant, toutes les modifications des conditions de malaxage et de mise en œuvre étudiées sur les BGR conduisent à une diminution des résistances mécaniques.

La pré-saturation des granulats entraîne une diminution de la perte de masse des matériaux à l'état durci.

Les explications suivantes peuvent être avancées :

La pré-saturation des granulats (perte de masse réduite) permet à ces derniers de conserver une partie plus grande de leur eau d'absorption, qui n'est donc pas relarguée dans la pâte de ciment, celle-ci est alors moins fluide et l'ouvrabilité réduite, ce qui nuit aux résistances mécaniques.

Lorsque les granulats sont simplement préhumidifiés 5 minutes à l'avance (protocole utilisé pour tous les bétons du screening), ils sont humides mais non saturés (voir cinétique d'absorption) et cette saturation ne peut se poursuivre en présence de ciment qui d'une part crée une « gangue » autour du granulat et l'assèche et d'autre part désorbe l'eau qu'ils contiennent dans la pâte de ciment.

L'introduction du ciment après l'eau de malaxage limite le phénomène de désorption ce qui accroît l'ouvrabilité (sauf lorsque le matériau est sec), mais ce procédé n'aboutit pas à l'obtention de résistances mécaniques satisfaisantes car la pâte de ciment peut perdre de son homogénéité suite à l'action réduite du superplastifiant (ordre d'incorporation).

Eviter le phénomène de désorption des granulats par introduction du ciment après l'ajout de l'eau et après l'introduction des granulats améliore l'ouvrabilité. Par contre, lorsque ce phénomène de désorption se produit, le ciment « assèche » les granulats en surface et l'ouvrabilité est affectée ; limiter la quantité d'eau désorbée (par pré-saturation des granulats) n'est pas la solution. Aucune des solutions proposées n'est satisfaisante vis-à-vis des résistances mécaniques, les interactions entre les paramètres du mode de malaxage et les résistances mécaniques sont complexes car elles font intervenir la désorption des granulats, l'homogénéité de la pâte et l'ouvrabilité permettant une mise en place satisfaisante. Une des pistes serait d'étudier l'adjuvantation des éléments fins en complément de l'adjuvantation du ciment.

Ainsi il est difficile de trouver un procédé de mise en œuvre qui améliore l'ouvrabilité sans nuire aux résistances mécaniques. Les phénomènes mis en jeu par l'utilisation des GR sont différents de ceux des GN.

5 Synthèse et analyse critique : BGR et méthodes de formulation

Les BGR formulés à même E/C et même dosage en ciment présentent des caractéristiques à l'état frais et durci inférieures à celles des BGNC (surtout le maintien d'ouvrabilité dans le temps à l'état frais), qu'un adjuvant soit utilisé ou non.

L'utilisation d'adjuvants est efficace vis-à-vis de l'ouvrabilité immédiate, mais le maintien d'ouvrabilité n'en est que peu amélioré. L'influence de l'utilisation des adjuvants sur les résistances en compression est dépendante du type d'adjuvant utilisé. Majoritairement, leur utilisation permet une augmentation des résistances en compression mais rarement d'amplitude suffisante pour atteindre les objectifs fixés.

Les différences de propriété peuvent être attribuées à :

- A l'état frais :
 - La présence d'éléments fins et la teneur en sable du squelette granulaire du BGR ;
 - La géométrie des GR ;
 - Le phénomène d'adsorption du ciment en surface des granulats (sorption) ;
 - Dans une moindre mesure, la prise du ciment (perte d'affaissement)
- A l'état durci :
 - La résistance mécanique des granulats ;
 - Une mise en place de moins bonne qualité due à l'ouvrabilité à l'état frais moindre ;
 - Le phénomène de désorption qui augmente le rapport E/C de la pâte de ciment.

Les bétons pour lesquelles des modifications des paramètres de formulation ont été proposées, ont donné des résultats qui peuvent étayer ces hypothèses. En effet les résultats suivants ont été obtenus sur les BGR :

Une augmentation de la teneur en éléments inférieurs à 1mm ou de la teneur en sable, entraîne une perte d'ouvrabilité immédiate et de son maintien mais aussi une diminution des résistances mécaniques.

A contrario, la baisse de la teneur en sable, ou la suppression des éléments fins inférieurs à 63 μ m nuit à l'ouvrabilité d'autant plus lorsque l'hypothèse d'une compacité identique est faite. La suppression des éléments fins nuit aux résistances mécaniques mais la diminution de la teneur en sable leur est favorable.

La substitution du SR par du SNC améliore les propriétés à l'état frais et durci, mais pas une substitution par du SNR, probablement car les géométries sont trop différentes. Ces résultats sont confirmés par les travaux de Braymand (Braymand et al., 2015b).

L'augmentation de la teneur en ciment à E/C constant améliore l'ouvrabilité immédiate et son maintien mais nuit aux résistances mécaniques pour le BGR uniquement ; une relation avec le phénomène de succion de l'eau par le ciment est avancée pour expliquer ce constat.

Les influences de l'état de saturation des GR et du mode de mise en œuvre (ordre d'incorporation des constituants) sur les propriétés à l'état frais et durci sont complexes et font intervenir des phénomènes qui interagissent : présence d'une quantité d'eau supérieure dans la pâte de ciment par désorption ; assèchement des granulats en surface ; influence sur l'homogénéité de la pâte et l'ouvrabilité donc sur les résistances mécaniques.

Les GR ne doivent pas être mélangés dans leur état sec car l'action mécanique du malaxeur modifie de façon notable leur squelette granulaire.

La synthèse de ces observations donne une première justification aux hypothèses faites précédemment, visant à expliquer les différences de propriétés entre BGR et BGNC et apporte des propositions d'adaptation aux méthodes de formulations.

Constitution du squelette granulaire du Sable Recyclé :

Conserver le squelette granulaire du SR plus grossier et plus étalé que celui du SN est préférable car la présence, tant des éléments fins inférieurs à $63\mu\text{m}$ que des éléments plus grossiers, contribue à l'obtention de propriétés satisfaisantes. Il reste à optimiser ces teneurs en éléments fins d'une part, et grossiers d'autre part. Ici le critère C_u (coefficient d'uniformité) pourrait être utilisé en complément du M_f (mode de finesse).

Constitution du squelette granulaire du BGR :

La teneur en sable dans le BGR doit également être optimisée. Un compromis pour cette teneur en sable doit être trouvé : trop de sable augmente de façon excessive la teneur en éléments fins, mais trop peu de sable constitue un squelette granulaire dont l'ouvrabilité est réduite. La courbe idéale définie à partir entre autres du M_f du sable ne conduit pas au dosage optimal. Les méthodes basées sur le modèle d'empilement granulaire peuvent apporter une solution mais la teneur réelle en éléments fins doit être intégrée, ainsi que l'évolution du squelette granulaire, donc de son empilement au cours du malaxage, ce qui complique leur application. La détermination d'un squelette granulaire volumique intégrant d'une part, la prise en compte de l'évolution des masses volumiques en fonction de la taille de granulat et d'autre part, la différence de circularité entre les GR et les GN pourrait s'avérer intéressante pour des études futures.

Eau efficace, eau d'absorption et demande en eau :

Un phénomène d'attraction du ciment hydrophile à la surface des granulats humides ou saturés se produit dès la mise en contact et a pour conséquence premièrement, d'assécher les granulats en surface qui ne sont plus dans un état de mouillage satisfaisant et, deuxièmement, de désorber l'eau d'absorption qui migre vers la pâte de ciment modifiant de ce fait le rapport Eff/C. Il semble discutable, par la suite, de considérer que l'eau contenue dans la pâte de ciment puisse être réabsorbée au cours des phases initiale et dormante de la prise du ciment. Une première approche a été faite indiquant que cette désorption pourrait être de l'ordre de 10% de l'eau d'absorption pour les BGR non adjuvantés lors de l'utilisation de GR pré humidifiés mais non saturés pendant 24h.

Il serait intéressant d'intégrer ce paramètre dans les formules analytiques de prédiction des résistances mécaniques et de formulation des bétons avec la prise en compte de l'état de saturation des granulats de la mise en œuvre. En effet, selon la EN 206, l'hypothèse est faite que l'eau d'absorption ajoutée aux granulats n'est plus disponible ni pour l'hydratation du ciment, ni pour la mise en œuvre. Il s'avère que dans le cas des GR, cela ne peut s'appliquer complètement, surtout lorsque le temps de saturation des granulats est supérieur à 24h.

Adjuvantation :

Pour approfondir l'étude faite ici sur l'adjuvantation des BGR, il serait intéressant d'étudier d'une part, l'influence de l'adjuvantation sur les cinétiques d'absorption des granulats et sur leur désorption par le ciment et, d'autre part, l'adjuvantation des fines de GR. Il semble probable que les adjuvants efficaces pour défloculer le ciment en présence de GR ne soient pas les mêmes que ceux efficaces pour défloculer les fines elles-mêmes.

Comment considérer les fines :

Les fines, dont l'intérêt à être conservées a été démontré, pourraient être assimilées à des additions telles que cela a été montré au chapitre 2. Dans ce cas une nouvelle appellation fines recyclées devrait être envisagée. Une réflexion autour de la constitution du squelette granulaire devra alors être menée si les fines sont considérées comme faisant partie du liant. De même leur adjuvantation devra être étudiée. La validité des formules prédictives de résistances mécaniques devra aussi être adaptée.

Mode de mise en œuvre :

Le mode de mise en œuvre habituel qui consiste à mélanger les constituants de la phase solide à sec avant d'ajouter l'eau éventuellement adjuvantée ne doit pas être appliqué pour les BGR car d'une part, le squelette granulaire du GR est modifié lors d'un malaxage à sec et d'autre part, le granulat recyclé ne peut pas atteindre son état saturé dans un mélange eau et ciment au cours du malaxage puisque seulement 80% de l'eau est absorbée en 10 minutes.

Méthode MBE :

Il a été montré que la méthode MBE appliquée aux GR devait être modifiée pour tenir compte de la plus faible circularité des GR. Cependant, cette méthode pose encore des problèmes dans son application aux GR :

- La méthode de calcul conduit dans le cas des matériaux à forte absorption à une augmentation de la teneur en ciment pour un même rapport E/C ;
- Il n'existe pas de courbe de corrélation quel que soit l'adjuvant utilisé, en ce qui concerne les propriétés à l'état frais ;
- La composition des MBE dont la teneur en ciment est plus élevée que celle des bétons qu'ils représentent, présente de ce fait un maintien d'ouvrabilité inférieur ;
- Son application pour prédire l'effet d'une modification des paramètres de formulation sur les propriétés mécaniques est cependant intéressante.

Il sera donc nécessaire si cette méthode devait être appliquée aux GR de revoir la constitution du squelette granulaire du sable équivalent pour prendre en compte les spécificités des BGR identifiées précédemment.

Conclusion du Chapitre 3

Dans ce chapitre, les caractéristiques des BGR et des BGNC à l'état frais et durci ont été étudiées et comparées. L'efficacité d'un grand nombre d'adjuvants a été identifiée tant sur BGR que sur BGNC. Les adjuvants les plus efficaces sur BGR étant de la famille des polycarboxylates. Des justifications aux ouvrabilités et résistances des BGR ont été avancées et des propositions d'adaptation aux méthodes de formulation ont été proposées.

Ainsi, il a été montré que la constitution du squelette granulaire du BGR doit prendre en compte non seulement la proportion de sable, gravillons et graviers mais aussi optimiser dans le squelette granulaire du sable la teneur en fines. Leur conservation en totalité étant la meilleure solution.

La courbe optimale recherchée pour le squelette granulaire ne correspond pas à celle recherchée dans les méthodes traditionnelles de formulation des bétons, la caractéristique d'étalement du squelette granulaire du sable devant être prise en compte et conservée ; un squelette granulaire serré n'est pas adapté.

Il a aussi été montré que les résultats obtenus incitent à remettre en cause les notions d'eau efficace et d'eau d'absorption telles que définies dans la norme EN 206. En effet, l'hypothèse est faite qu'une partie de l'eau est désorbée par effet de succion du ciment et cette désorption contribue à augmenter la quantité d'eau présente dans la pâte de ciment et à assécher les

granulats. Ainsi, une explication a été apportée aux résultats d'ouvrabilité d'une part et de résistance mécanique d'autre part obtenus sur les BGR.

La question de la conservation des fines de leur considération a été abordée et confirme l'intérêt de leur conservation dans un béton formulé avec 100% de GR.

Des propositions d'adaptations aux modes de mise en œuvre des bétons ont été faites sans que celles-ci ne donnent entière satisfaction.

Enfin, l'application des modèles analytiques de détermination des résistances mécaniques et de la méthode MBE a été étudiée et des propositions d'adaptation ont été faites. Entre autres, il a été proposé de modifier la valeur de l'eau efficace à prendre en compte dans les formules. La teneur en sable équivalente des MBE a été corrigée pour prendre en compte la spécificité morphologique des GR.

Ces résultats vont être discutés au regard du chapitre 2 et confrontés à ceux de la littérature dans le chapitre 4 suivant.

Chapitre 4 Discussion et perspectives

Les résultats expérimentaux sur BGR, les résultats expérimentaux sur GRB et les résultats de la bibliographie doivent être confrontés en prenant en considération l'objectif de faible impact environnemental pour les formules de béton proposées. La comparaison des Analyses des Cycles de Vie des BGNC, BGNR et BGR est ainsi proposée pour justifier de la qualité « éco-respectueuse » des BGR.

1 Propriétés des BGR liées aux spécificités des GRB

Si les résultats de caractérisation sur GRB dans le cadre de ce travail sont, majoritairement, en accord avec la littérature, ceux sur BGR sont plus difficilement comparables. En effet, les compositions de bétons différentes, soit par la proportion et fraction de GRB utilisés, soit par le dosage en eau et en ciment rendent les corrélations entre les performances des bétons difficiles. La plupart des résultats de la littérature concerne des BGR avec un taux d'utilisation inférieur à 100%, en préconisant le retrait du sable ou des éléments fins alors que cette étude se focalise sur le fait que la conservation du sable avec ses éléments fins est non seulement possible, mais souhaitable. Pereira (Pereira et al., 2012b) et Braymand (Braymand et al., 2015a) confirment que l'utilisation de superplastifiants, particulièrement de polycarboxylates, permet non seulement la conservation du sable recyclé, mais encore une amélioration de l'ouvrabilité ou une réduction possible du dosage en eau .

Les valeurs de coefficients d'absorption sont dans la plage (ou proches) de celles obtenues dans la littérature (5 à 10%). Il en est de même pour celles de masses volumiques réelles (entre 2 000 et 2 200 kg/m³). Cependant le fait de prolonger le temps d'immersion pour atteindre la saturation, tel que cela est proposé dans notre étude, contribue à augmenter les valeurs obtenues mais ne reflète plus l'absorption réelle. Les protocoles de suivi de la cinétique d'absorption proposés par Djerbi (Djerbi Tegger, 2012) et Tam (Tam et al., 2012) et les résultats qui en découlent confirment le fait que 24 heures d'immersion ne permettent pas de garantir l'atteinte de la saturation, point évoqué également par plusieurs autres auteurs. Cependant, il n'est pas fait mention dans les travaux de la nécessité d'agiter les granulats au cours du suivi de l'évolution de l'absorption dans le temps afin de permettre à l'eau d'accéder aux vides intergranulaires. Nous avons montré l'importance de cette agitation, surtout lorsqu'une valeur initiale de pesée hydrostatique est utilisée pour la détermination du coefficient d'absorption comme le propose Tam (Tam et al., 2012). La corrélation entre taille du granulat et coefficient d'absorption est la même que celle observée dans notre étude : un sable absorbe plus qu'un gravillon ou un gravier, même si, là encore, les valeurs sont plus faibles que celles que nous avons obtenues, toujours pour les raisons d'un temps d'immersion prolongé. Il n'est pas non plus fait mention d'une résorption observée comme celle que nous avons constatée au cours du suivi de l'absorption des GRB. Les travaux de Zhao (Zhao, 2014b) dans lesquels il met en évidence une carbonatation des GRB en présence

d'eau évoquent également une possible résorption de ce type de granulat, toujours pour les mêmes raisons d'un temps d'immersion prolongé.

Cette absorption élevée des GRB conditionne les compositions des BGR et la validité des modèles analytiques prédictifs puisque, pour obtenir la bonne quantité d'eau efficace, l'eau d'absorption des granulats est ajoutée au mélange. Peu d'auteurs évoquent une désorption de l'eau contenue dans les granulats pour migrer vers la pâte de ciment au cours du malaxage (Meftah and Arabi, 2011) (Braymand, 2012), contrairement à ce que nous proposons et qui génère une teneur en eau efficace (non absorbée) plus élevée que celle prévue. Cette absorption/désorption indique qu'une pré-humidification des GRB par tout ou partie de leur eau d'absorption est nécessaire pour éviter un effet d'éponge dans les premières minutes (Meftah and Arabi, 2011), effet d'éponge confirmé par Poon (Poon et al., 2004) qui, dans le cas d'un mélange sans ajout d'eau d'absorption, provoque une baisse de l'eau efficace dans la pâte. Par ailleurs, une réabsorption, suite à cette désorption, pendant les phases initiale et dormante de prise du ciment semble peu probable. Certains auteurs préconisent d'augmenter la teneur en ciment à rapport E/C constant, ce que nous avons fait. Cependant même si cela permet d'améliorer l'ouvrabilité du BGR, nous avons constaté que cette modification nuisait aux propriétés mécaniques, ce qui n'est pas mentionné par les auteurs. Nous attribuons cette chute de résistance à une plus grande quantité d'eau fournie par les granulats par désorption dans la pâte.

Des densités plus faibles, des pertes de masse et des retraits plus importants sont observés pour les BGR par rapport aux BGN. Sur ce point, les résultats de la bibliographie sont en accord avec ceux que nous avons obtenus. Les mécanismes qui régissent les pertes d'eau pendant la prise et le durcissement sont complexes et le retrait plus élevé observé pour les BGR (Dao, 2012) est associé à cette perte d'eau par évaporation. Certains auteurs attribuent cette perte de masse au départ en premier de l'eau d'absorption contenue dans les granulats saturés qui précède celle de l'eau non combinée, alors que nous faisons l'hypothèse que c'est l'eau excédentaire de la pâte non combinée par l'hydratation du ciment qui migre en premier, les granulats n'étant plus saturés. Cette eau excédentaire contenue dans la pâte ayant pour origine la désorption des granulats par le ciment ou la non-absorption de l'eau par ces mêmes granulats, la cinétique d'absorption identifiée indiquant que quelques minutes ne suffisent pas à absorber toute l'eau. Une corrélation « cinétique de la perte de masse/retrait plastique/retrait endogène », associée à un suivi de l'évolution de la porosité de la pâte permettrait de confirmer ou d'infirmer ces hypothèses.

Les études de la distribution granulaire des GRB présentées par l'ensemble des auteurs concluent aussi sur la similitude de squelettes granulaires entre recyclés et naturels dans le cas des gravillons et graviers. La différence de squelettes des sables entre le recyclé et le naturel est aussi observée, le recyclé étant plus grossier que le naturel, au regard de l'évaluation par le critère module de finesse.

Les valeurs d'équivalent de sable des GRB trouvées par Dao (Dao, 2012) sont de l'ordre de 78 à 87% proche des 80% de notre étude. Une teneur en fines élevée est aussi relevée par les auteurs, mais moindre que celle que nous avons trouvée et ceci pour deux raisons majeures : les conditions de conservation entre le site de concassage et le laboratoire sont variables, d'où la possibilité d'avoir une perte de poussière de fines recyclées au cours de la fabrication ou du transport et les méthodes de détermination de cette teneur en fines restent liées à la seule analyse par tamisage dans la bibliographie. Or nous avons montré qu'une analyse complémentaire par analyse laser était nécessaire pour compléter l'analyse par tamisage afin d'obtenir des valeurs fiables de cette teneur en éléments fins. L'étude de la réactivité de ces fines n'est que très peu abordée dans la littérature et lorsque cela est fait la prise observée ne conduit pas à un durcissement et est plus attribuée à une carbonatation de l'hydroxyde de calcium. Les travaux de Hansen et Narud (Hansen, 1986) ainsi que Nelfia (Nelfia et al., 2013) vont dans ce sens. Nous avons montré au contraire qu'une réelle hydraulité des fines recyclées pouvait exister mais seulement dans le cas de matériau récemment concassé et de béton jeune (inférieur à 5 ans). De plus, cette réactivité mise en évidence par un dégagement de chaleur ne se limite pas aux éléments fins mais concerne également les éléments plus grossiers. Par contre, cette réactivité hydraulique lorsqu'elle existe ne modifie pas les résistances mécaniques des bétons ou mortiers dans lesquels les granulats réactifs sont incorporés. Rappelons que la notion de fines recyclées n'est pas clairement définie dans la littérature et que cette appellation est utilisée pour des éléments dont la taille peut être comprise entre 63 et 500 μm , voire plus. L'effet de cette présence élevée de fines sur les propriétés à l'état frais ou durcis ne conduit pas toujours aux mêmes conclusions que les nôtres, la plupart des auteurs considèrent que ces fines nuisent à ces propriétés. A contrario Katz (Katz, 2003) suggère que leur conservation est intéressante car elles peuvent jouer le rôle de lubrifiant pour le béton à l'état frais, ce qui est en accord avec nos résultats. Par ailleurs, la combinaison de l'ajout de fines (pas spécifiquement recyclées) et de superplastifiant peut améliorer les propriétés à l'état frais et durci des bétons, notamment par un effet bouche pore (Diederich, 2010), (Escadeillas, 1988). Enfin nous avons montré que certaines de ces fines, issues du concassage d'un béton jeune, remplissaient les conditions vis-à-vis des résistances mécaniques, pour être assimilées à des additions. Dans le cas d'une telle utilisation les modèles analytiques de prédiction des résistances mécaniques devront être ajustés pour prendre en compte la notion de liant équivalent et ajuster aussi la valeur de l'eau efficace qui en découle.

En ce qui concerne un complément des études de distribution granulométrique par l'analyse morphologique des granulats, seul le coefficient d'aplatissement est déterminé dans certaines études. Les spécificités de morphologie des GRB que nous avons mises en évidence telles que la circularité et la convexité pourraient être approfondies par une analyse d'image en 3 dimensions et reliées à la rugosité et la forme angulaire, facteurs prépondérants dans l'obtention d'une maniabilité réduite des BGR selon Butler (Butler et al., 2013). Cette différence de morphologie n'est pas identifiée comme paramètre influençant la compacité

individuelle des granulats ou la compacité du squelette granulaire dans les méthodes utilisant ces propriétés (Dao, 2012).

Un point important à relever concerne le comportement des granulats recyclés lors du malaxage. En effet, des différences sont observées en ce qui concerne les valeurs de résistance à l'usure et à la fragmentation des granulats recyclés, notamment pour les valeurs présentées par Dao (Dao, 2012) qui sont plus élevées que celles que nous avons obtenues. Mais dans le cas de l'étude de Dao, les bétons étaient plus jeunes et fabriqués en laboratoire, ce qui peut expliquer cette différence. Nous proposons donc de prendre en compte la faible résistance des granulats dans l'adaptation des modes de malaxage en évitant un malaxage à sec des granulats qui modifie la courbe granulométrique de ceux-ci du fait de leur fragmentation lors de cette phase. Par ailleurs, le malaxage à sec modifie également la cinétique d'absorption des granulats lorsque l'eau est introduite ultérieurement.

Même si les auteurs s'accordent à relier ces propriétés particulières des GRB à la présence de mortier résiduel dans le granulat, tant les méthodes pour déterminer la teneur en mortier que l'appellation et la définition même de ce mortier sont différentes d'un auteur à l'autre. En outre, nous avons identifié certaines propriétés pour lesquelles les valeurs particulières obtenues sont, certes dues à la présence de mortier, mais non liée à sa teneur, c'est-à-dire non corrélées au coefficient d'absorption. C'est le cas de la teneur en fines et des résistances mécaniques. Certains auteurs utilisent l'appellation pâte de ciment sans qu'une présence de sable ou d'éléments fins ne soit pris en compte (Dao, 2012), d'autres la fraction soluble à l'acide salicylique (Zhao, 2014b) assimilable à une teneur en mortier, d'autre encore l'appellation mortier accolé. Les méthodes de détermination de cette quantité de mortier/pâte présente dans le GRB explorent des voies expérimentales par analyses chimiques ou prédictives par application de modèles analytiques nécessitant une parfaite connaissance fines des propriétés du béton parent. Cette variété de méthodes et d'hypothèses fait que les résultats sont très dispersés et qu'il est difficile aujourd'hui de proposer une méthode fiable d'estimation de la quantité de mortier accolé ou résiduel. En effet, rien ne permet de garantir que seul le mortier est ôté lors des procédés expérimentaux chimiques. Dans ce sens, nous avons montré que les procédés mécaniques appliqués seuls ne sont pas non plus satisfaisants puisqu'ils ne permettent pas de retirer tout le mortier. Une combinaison de plusieurs procédés est donc probablement la voie à poursuivre.

Pour terminer, nous avons démontré que l'applicabilité de la méthode MBE n'était pas directe pour les GRB et qu'une correction en sable était nécessaire, correction liée à la circularité particulière des GRB. Cependant, la corrélation reste limitée aux valeurs immédiates d'ouvrabilité ou aux résistances mécaniques, ce qui est confirmé par les résultats du projet Calibé (Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil (France), 2004) qui indiquent que le maintien d'ouvrabilité ne peut être corrélé entre bétons et mortiers équivalents. Pour cette corrélation, le suivi de l'affaissement des MBE semble être mieux corrélé à l'affaissement des bétons que le suivi de l'étalement (voir Figure 112).

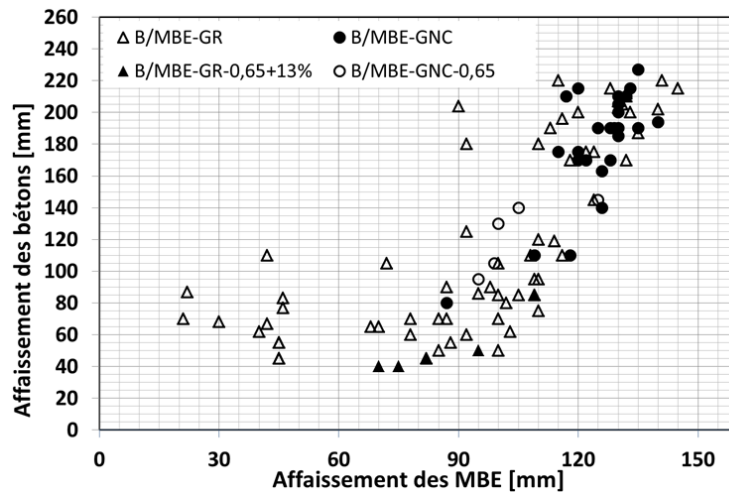


Figure 112 : Corrélation entre les valeurs d'affaissement des Bétons et MBE adjuvanté avec correction en sable

2 Le BGRB, un béton éco-respectueux à faible impact environnemental

Comme cela a été évoqué, lors de la formulation d'un béton, les objectifs actuels fixés par les prescripteurs concernent les résistances mécaniques et l'ouvrabilité. Ils dépendent de la classe d'exposition (ou classe d'environnement) à laquelle le béton sera exposé.

Dans ce travail, un objectif supplémentaire est à prendre en compte lors du choix des paramètres de formulation : l'impact environnemental. Celui-ci est quantifié par l'intermédiaire du calcul de l'ACV (Analyse du cycle de vie) du béton.

Le processus d'analyse du cycle de vie d'un matériau était décrit jusqu'en juin 2014 dans la norme NFP 01-010. Il donne lieu à la rédaction de fiches FDES (Fiche de déclaration Environnementale et Sanitaire). Depuis juin 2014, la norme référente est la norme EN 15 804, le résultat est fourni sous forme d'EPD (Environmental Product Declaration)

Les résultats d'analyse ACV des bétons ont été réalisés avant juin 2014 et à ce jour peu de données au format européen EPD sont disponibles, le travail qui est présenté ici a ainsi été réalisé avec la méthodologie FDES.

2.1 ACV et FDES

L'ACV d'un matériau peut être schématisé comme ci-dessous :

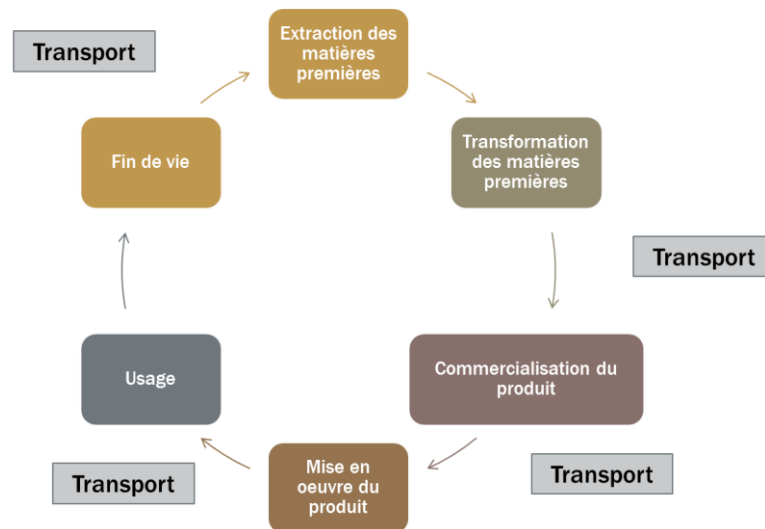


Figure 113 Analyse du Cycle de Vie (Braymand, 2015b) ; (S Braymand, 2014) ; (Braymand, 2013).

Les étapes de réalisation d'une analyse du cycle de vie sont décrites Figure 114. Un inventaire des données est nécessaire tel que décrit Figure 115.

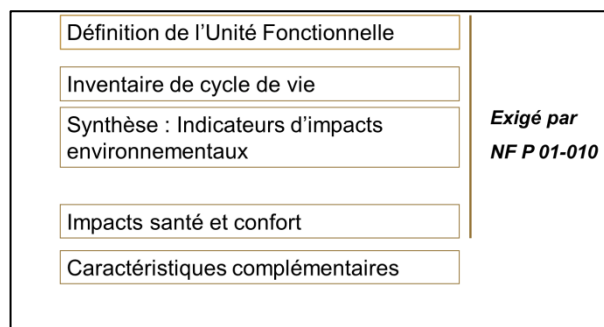


Figure 114 Contenu d'une FDES (Braymand, 2015b) ; (S Braymand, 2014) ; (Braymand, 2013).

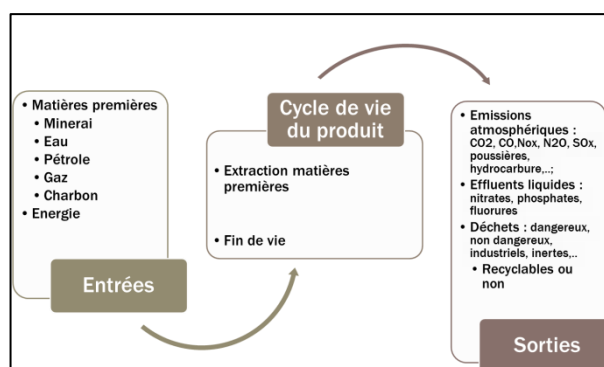


Figure 115 Inventaire de Cycle de Vie : collecte de données (Braymand, 2015b) ; (S Braymand, 2014) ; (Braymand, 2013).

L'analyse de cet inventaire conduit au calcul d'indicateurs d'impacts environnementaux. Les indicateurs d'impacts exigés par la norme NFP 01-010 sont les suivants :

1. Consommation des ressources énergétiques
2. Épuisement des ressources
3. Consommation d'eau
4. Pollution de l'eau
5. Déchets solides
6. Changement climatique
7. Acidification atmosphérique
8. Pollution de l'air
9. Destruction de la couche d'ozone
10. Formation d'ozone photochimique

2.2 ACV des BGR

2.2.1 Quelques éléments de bibliographie

Serres et al (Serres et al., 2014) en déterminant les indicateurs d'impact environnemental des échantillons de bétons mixte ; recyclé et traditionnel avec différentes méthodes d'évaluation (EDP, CML, EDIP et BEES) et en accord avec la norme NF P 01-010 et la nouvelle norme EN 15804A, ont montré que l'utilisation des sables et des granulats recyclés étaient très intéressants pour réduire leur impact environnemental. Le même constat a été fait sur des micro-bétons pour lesquels la classe granulaire maximale est 10mm.

Nikola et al (Tošić et al., 2015) ont évalué la quantité d'énergie utilisée pour la réalisation des bétons avec soit des granulats naturels roulés, soit des granulats naturels concassés, soit un mélange de granulats naturel roulés et de granulats recyclés selon une méthode d'optimisation multicritère. Il a présenté la composition réalisée avec 50% de granulats recyclés (taux maximum utilisé dans cette étude) comme étant la plus optimale avec une faible quantité d'énergie utilisée.

Henry et al (Henry et al., 2011) ont étudié l'effet d'un ajout de granulats recyclés à différentes teneurs contenant ou non des additions (cendres volantes et laitiers) sur l'émission de gaz à effet de serre en équivalent CO₂. Au vu de ses résultats, la quantité de CO₂ émise diminue avec l'emploi de cendre volante. Elle est sensiblement identique lorsque le taux de substitution en granulats recyclés est de 0% ; 50% ou 100%.

2.2.2 Réalisation de l'ACV des BGR, des BGNC et des BGNR de l'étude

Plusieurs outils logiciels permettent de réaliser ces ACV. Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé l'outil Betie, mis en place par le SNBPE (Potier, 2015) et adapté à l'édition des FDES des bétons. (Fiche de Déclarations environnementale et Sanitaire)

Plusieurs paramètres d'entrée sont fixes, il est possible notamment de n'avoir recours qu'à un seul type de granulats recyclés, un seul type de granulats de roche massive et un seul type de granulats alluvionnaire. Pour chacun de ces trois types de granulats (GR4, GNC, GNR) une FDES est disponible, elle permet ensuite le calcul de l'ACV et l'édition de la FDES du béton concerné.

Pour les bétons étudiés, la caractérisation du produit est définie comme suit :

Définition de l'Unité Fonctionnelle (UF)

Assurer la fonction de mur porteur (structure et clos) pour le bâtiment considéré, sur 1 m² de paroi d'épaisseur 0,2 mètre, pendant une annuité.

Masses et données de base pour le calcul de l'unité fonctionnelle (UF)

Quantité de produit, d'emballage de distribution et de produits complémentaires contenus dans l'UF sur la base d'une Durée de Vie Typique (DVT) de 100 ans

Produit :

Le béton C20/25 XC1 est fabriqué avec un liant ciment type CEM I. 0,2 m³ de béton sont nécessaires à la mise en œuvre du produit. Le flux de référence de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) de ce produit est 0,2 m³ de produit /100 ans de produit, soit 0,2 m³ de produit. Le béton considéré est conforme à la norme béton NF EN 206-1.

Emballages de Distribution (nature et quantité) : Sans Objet

Produits complémentaires (nature et quantité) pour la mise en œuvre :

- Banches Métalliques (1000 réemplois)

Le taux de perte lors de la mise en œuvre a été estimé à 4%.

Caractéristiques techniques utiles non contenues dans la définition de l'unité fonctionnelle

Le béton étant un matériau incombustible, le produit considéré ne présente pas de risques spéciaux vis-à-vis du feu.

Remarque : la valeur de C20/25 est une valeur minimale recherchée. La résistance réelle des bétons peut être différente.

Les valeurs paramètres d'études des bétons sont données Tableau 70. Plusieurs hypothèses ont été faites, il a été choisi de faire varier les paramètres

- Distance de transport
- Etat de saturation des granulats
- Utilisation d'adjuvant ou non

La distance réelle entre le lieu de production des matériaux et le laboratoire n'a pas été utilisée car non significative. En effet le choix de nos matériaux d'étude, notamment GNC, GR, ciment et adjuvant a été déterminé dans le cadre du partenariat industriel et n'est pas représentatif du choix qui serait fait pour une réalisation industrielle de béton. Nous avons

donc choisi des distances correspondant aux gravières, carrières, plateforme de recyclage et cimenterie proches de notre laboratoire. Des FDES de béton avec des distances de transport nulles ont dans un premier temps été réalisées afin de n'étudier que l'influence des compositions.

Le béton considéré n'est pas armé, le choix d'un béton armé aurait généré un effet de dilution des résultats, la quantité d'armature d'un béton à l'autre aurait été la même et l'impact de l'acier non négligeable.

Lorsque le béton est considéré saturé, la quantité d'eau ajoutée est égale à l'eau efficace, dans le cas contraire, lorsque le granulat est considéré sec, la quantité d'eau ajoutée est égale à l'eau totale, l'eau contenue dans l'adjuvant a été considérée négligeable pour cette étude.

Ainsi 4 séries sont proposées ici :

- Série 4 : aucune distance de transport, pas d'adjuvant, granulat saturé
- Série 5 : aucune distance de transport, pas d'adjuvant, granulat sec donc ajout d'eau d'absorption
- Série 7 : aucune distance de transport, adjuvant, granulat sec donc ajout d'eau d'absorption
- Série 17 : Distances de transport « proches », adjuvant, granulat sec donc ajout d'eau d'absorption

Les compositions de bétons sont celles choisies à l'issue des screening.

Les résultats analysés précédemment ont montré que le béton testé satisfaisait à l'objectif de résistance visé, si cela n'avait pas été le cas, il aurait été difficile de comparer les résultats d'ACV puisque cette comparaison doit se faire à Unité Fonctionnelle constante par m² de paroi.

Tableau 70 : Fiche de béton de granulats naturels concassés-production

référence	Eau/dist d'approv	CEM I /dist d'approv	Sable/dist d'approv	Gravillon /dist d'approv	Gravier /dist d'approv	Adj/dist d'approv	Qté totale/m ³	Nature du granulat
Bgnc4	169 kg / 0 km	260 kg / 0 km	724 kg / 0 km	172 kg / 0 km	1010 kg / 0 km		2335	GNC
Bgnc5	182 kg / 0 km	260 kg / 0 km	724 kg / 0 km	172 kg / 0 km	1010 kg / 0 km		2348	
Bgnc7	182 kg / 0 km	260 kg / 0 km	724 kg / 0 km	172 kg / 0 km	1010 kg / 0 km	2,1 kg / 0 km	2350	
Bgnc17	182 kg / 0 km	260 kg / 124 km	724 kg / 104 km	172 kg / 104 km	1010 kg / 104 km	2,1 kg / 145 km	2350	
Bgnr4	169 kg / 0 km	260 kg / 0 km	755 kg / 0 km	112 kg / 0 km	997 kg / 0 km		2293	GNR
Bgnr5	186 kg / 0 km	260 kg / 0 km	755 kg / 0 km	112 kg / 0 km	997 kg / 0 km		2310	
Bgnr7	186 kg / 0 km	260 kg / 0 km	755 kg / 0 km	112 kg / 0 km	997 kg / 0 km	1,3 kg / 0 km	2311	
Bgnr17	186 kg / 0 km	260 kg / 124 km	755 kg / 30 km	112 kg / 30 km	997 kg / 30 km	1,3 kg / 145 km	2311	
Bgr4	169 kg / 0 km	260 kg / 0 km	689 kg / 0 km	76 kg / 0 km	762 kg / 0 km		1956	GR4
Bgr5	284 kg / 0 km	260 kg / 0 km	689 kg / 0 km	76 kg / 0 km	762 kg / 0 km		2071	
Bgr7	284 kg / 0 km	260 kg / 0 km	689 kg / 0 km	76 kg / 0 km	762 kg / 0 km	3,12 kg / 0 km	2074	
Bgr17	284 kg / 0 km	260 kg / 124 km	689 kg / 10 km	76 kg / 10 km	762 kg / 10 km	3,12 kg / 145 km	2074	

Dans le but de comparer les résultats des ACV entre les bétons, deux types de comparaisons ont été faites :

1. Les impacts relatifs des BGR et BGNR par rapport à ceux des BGNC sont présentés pour les 4 séries de paramètres étudiés (4, 5, 7, et 17). Ces impacts relatifs sont calculés en gain par rapport aux impacts du BGNC : Figure 116 .

2. Les impacts relatifs des séries 5, 7 et 17 par rapport à ceux de la série 4 sont présentés pour les 3 bétons (BGR, BGNC, BGNR) : Figure 117 et Figure 118.

Les résultats complets des FDES sont donnés en annexe 11. En exemple, les résultats sur BGR de la série 7 sont présentés Tableau 71.

Tableau 71 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGR 7

N°	Impact environnemental	Valeur de l'indicateur pour l'unité fonctionnelle		Valeur de l'indicateur pour toute la DVT	
1	Consommation de ressources énergétiques				
	Energie primaire totale	4,23	MJ/UF	423	MJ
	Energie renouvelable	0,252	MJ/UF	25,2	MJ
	Energie non renouvelable	3,98	MJ/UF	398	MJ
2	Epuisement de ressources (ADP)	0,00164	kg équivalent antimoine (Sb)/UF	0,164	kg équivalent antimoine (Sb)
3	Consommation d'eau totale	2,09	litre/UF	209	litre
4	Déchets solides				
	Déchets valorisés (total)	3,12	kg/UF	312	kg
	Déchets éliminés				
	Déchets dangereux	0,000222	kg/UF	0,0222	kg
	Déchets non dangereux	0,00129	kg/UF	0,129	kg
	Déchets inertes	1,04	kg/UF	104	kg
	Déchets radioactifs	2,38 E-05	kg/UF	0,00238	kg
5	Changement climatique	0,556	kg équivalent CO ₂ /UF	55,6	kg équivalent CO ₂
6	Acidification atmosphérique	0,00184	kg équivalent SO ₂ /UF	0,184	kg équivalent SO ₂
7	Pollution de l'air	28,7	m ³ /UF	2866	m ³
8	Pollution de l'eau	0,131	m ³ /UF	13,1	m ³
9	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	0	kg CFC équivalent R11/UF	0	kg CFC équivalent R11
10	Formation d'ozone photochimique	0,000135	kg équivalent éthylène/UF	0,0135	kg équivalent éthylène

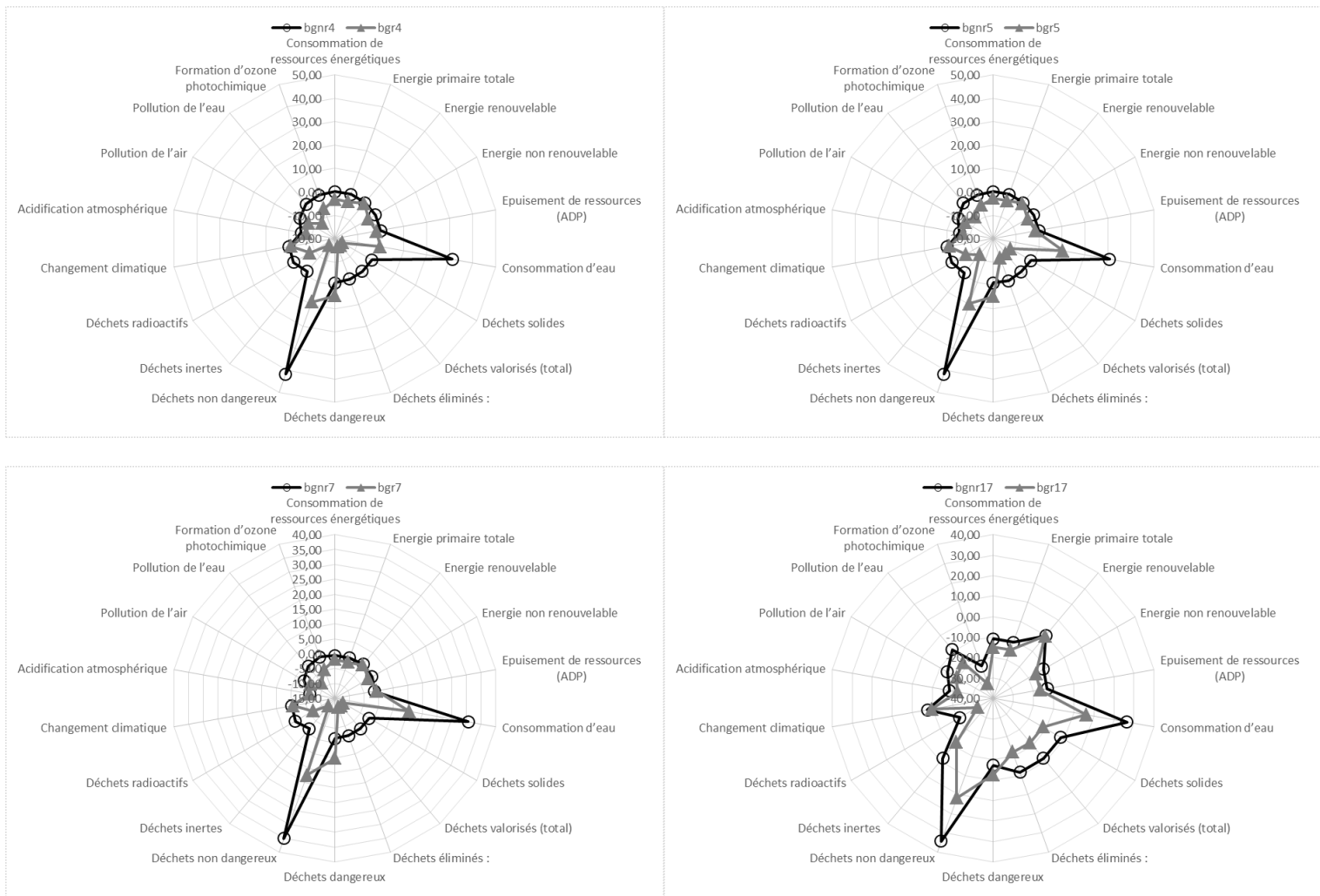


Figure 116: Impacts environnementaux relatifs - Série 4, 5, 7 et 17 (ref BGNC)

Le BGNR présente des valeurs d'impact proches de celles du BGNC puisque les gains sont majoritairement plus élevés. Ces analyses se retrouvent quelles que soient les séries sauf lorsque le transport est pris en compte. Dans ce cas, les impacts environnementaux sont fortement modifiés et les rapports entre bétons également.

Concernant l'impact DND, la quantité de déchets produits est très faible quel que soit le béton et donc son augmentation n'est pas significative (voir résultats en annexe). En effet, la quantité produite est de 0,00105 kg/m² de paroi pour les BGNC contre 0,00149 kg/ m² de paroi pour les BGR ; ces valeurs sont très basses en comparaison des quantités de déchets inertes produits par exemple : qui sont supérieures à 1 kg.

L'accroissement de l'impact consommation d'eau s'explique par le procédé d'extraction et de lavage des granulats roulés, lavage nécessaire pour retirer les particules d'argile.

Le BGR présente des impacts dans l'ensemble inférieurs à ceux du BGNC puisque les gains sont presque tous inférieurs à 0.

C'est le cas pour Consommation des ressources, Formation d'ozone photochimique (entre 10 et 20 % inférieur) mais aussi pollution de l'eau, pollution de l'air et déchets inertes. La même remarque que celle faite pour les BGNR s'applique pour l'impact DND.

L'ajout d'eau d'absorption en quantité importante pour le BGR se retrouve dans l'impact consommation d'eau. L'ajout d'adjuvant réduit cet écart entre BGNC et BGR.

De l'étude comparative par série, il ressort que le transport des matériaux est le facteur prépondérant, quel que soit le granulats. Les paramètres ajouts d'eau d'absorption et ajout d'adjuvant ont des effets de second ordre devant le transport.

Ainsi, le transport des GNC accroît jusqu'à 80% certains impacts (formation d'ozone et acidification) et 15% d'autres (Energie non renouvelable, ADP).

Les BGR et BGNC sont moins impactés par le transport et cet impact est de même amplitude. Ces résultats sont directement liés à la distance de transport qui a été prise en compte.

Afin d'évaluer l'effet des facteurs autres que le transport, la comparaison a été faite sans la série 17. (Figure 118).

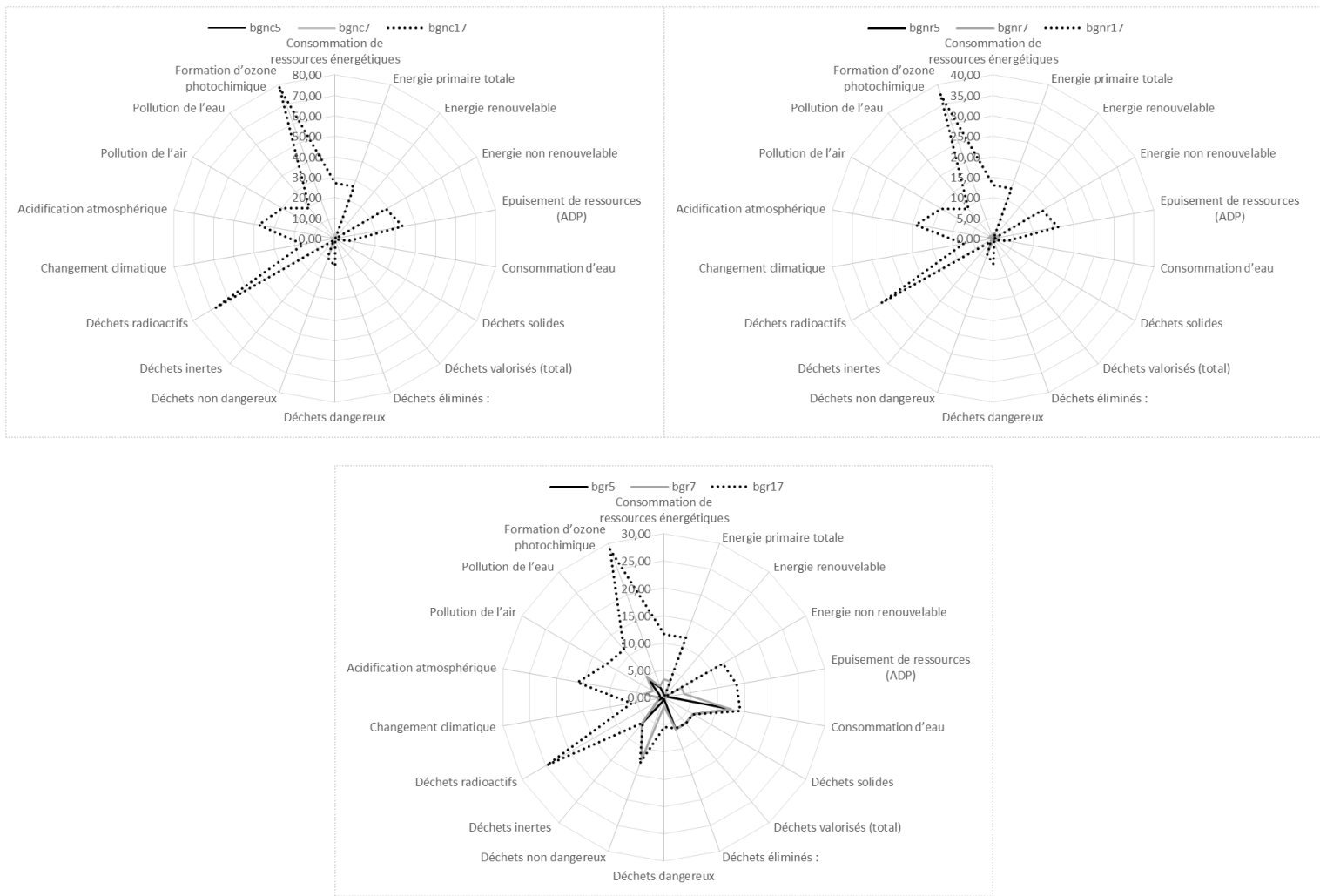


Figure 117 : Impacts environnementaux relatifs –BGNC, BGNR et BGR (ref série 4)

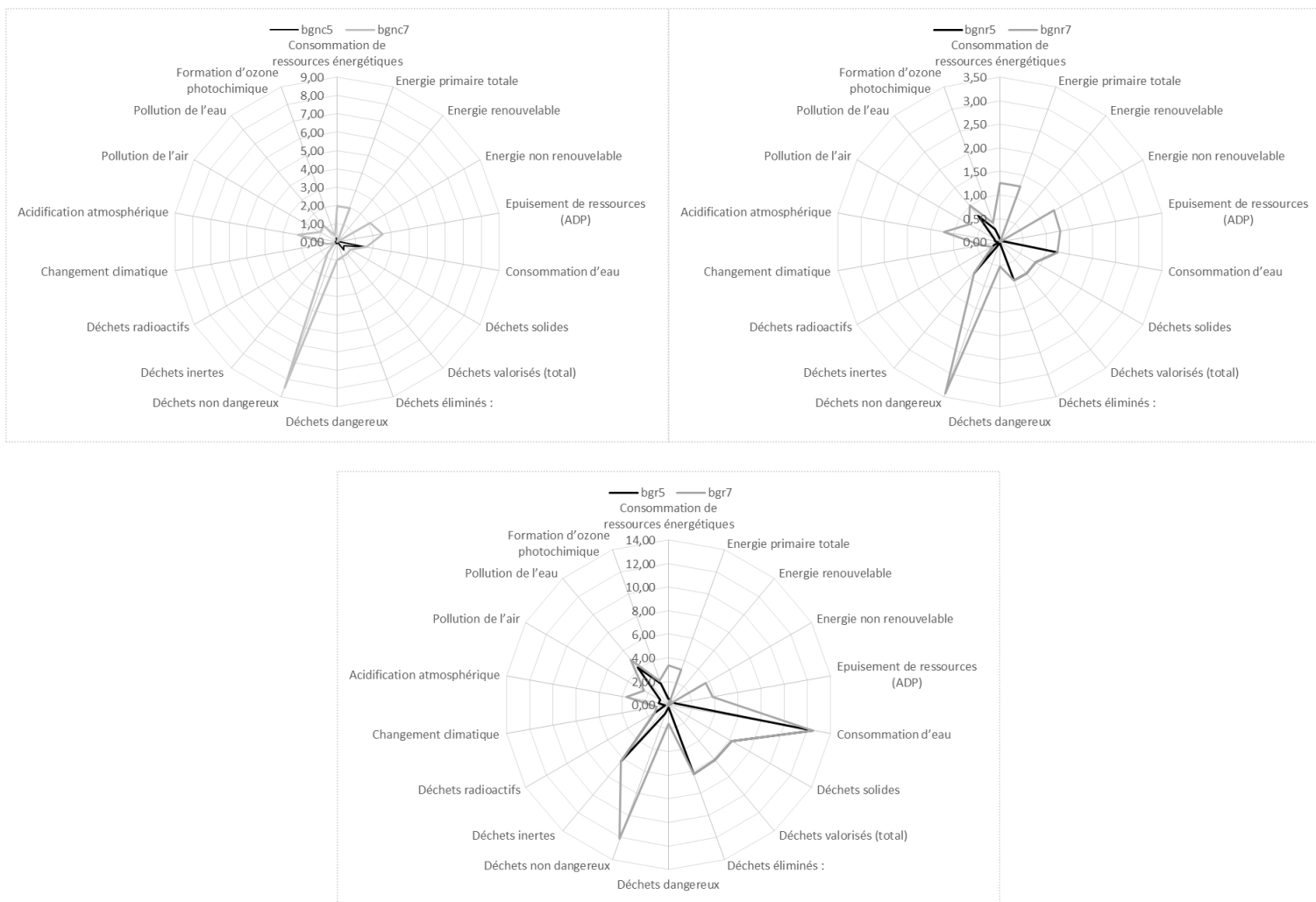


Figure 118 : Impacts environnementaux relatifs –BGNC, BGNR et BGR (ref série 4 ; sans série 17)

L'ajout d'eau d'absorption augmente les impacts consommation d'eau (comme attendu) et pollution de l'air (DND non significatif) d'amplitude plus marquée pour le BGR.

L'ajout d'adjuvant (série 7) accroît les impacts liés à son processus de fabrication tel que consommation des ressources, énergies, déchets valorisés.

L'ampleur de cette augmentation est fonction du dosage en adjuvant utilisé dans le mélange.

Le BGR présente dans l'ensemble des impacts environnementaux plus bas que le BGNR ou le BGNC. Cependant la dépendance aux distances de transport est très forte. C'est pourquoi pour que l'utilisation des GR dans les bétons trouve sa justification environnementale, il est important de produire ces bétons proches des zones de production des plateformes de recyclage.

Cette étude d'analyse du cycle de vie des bétons propose une ouverture pour l'étude des bétons de granulats recyclés. Elle devra être poursuivie avec modification des paramètres en amont (détermination des ACV des granulats non générique) et en aval (choix des solutions de réalisation : BPE, préfabrication,...), ce qui sera fait dans le cadre du Projet National Recybéton.

Les études recensées dans la bibliographie sont en accord avec les résultats présentés ici : l'utilisation de sable et/ou de granulats recyclés réduit les impacts environnementaux des bétons. Seules les catégories d'impact « acidification atmosphérique », du fait de l'utilisation d'adjuvant, et « déchets solides », du fait d'une valorisation plus conséquente pour le béton naturel, sont moins favorables aux bétons de granulats recyclés.

3 Perspectives de recherches sur les BGR et leurs méthodes de formulation

Dans le cadre de cette étude, plusieurs pistes de recherches ont été initiées concernant l'influence des spécificités des GRB sur les propriétés des GRB et les méthodes de formulation associées. Leur approfondissement serait intéressant, nous proposons donc ci-après de poursuivre certaines recherches.

L'analyse de la morphologie des granulats par stéréophotographie (en 3 dimensions) compléterait celle proposée ici en 2D et fournirait, entre autres, une valeur exacte de la surface spécifique.

La recherche du squelette granulaire optimal pourrait se baser sur des courbes granulométriques, d'une part complétées par la teneur en éléments fins, et d'autre part calculées en volume. La courbe idéale quant à elle pourrait intégrer la géométrie réelle des granulats (par une correction qui tienne compte du critère de circularité différent), le coefficient d'uniformité et l'évolution du squelette au cours du malaxage.

La qualification des fines recyclées devrait être précisée par les normes actuelles, tant au niveau de leur appellation en rapport avec leur dimension maximale considérée que de leur possibilité d'utilisation en tant qu'addition. Dans ce cas, leur adjuvantation spécifique devra être étudiée, indépendamment de celle du ciment, puis en présence de celui-ci.

La notion d'eau efficace associée à celle d'eau d'absorption, telles que prescrites dans la norme actuelle, pourrait être corrigée pour prendre en compte la désorption des granulats par le ciment. Pour cela une estimation de cette quantité d'eau désorbée par une étude des cycles absorption/désorption/réabsorption, en présence de ciment et/ou d'adjuvant, serait nécessaire.

L'estimation de la teneur en mortier mériterait d'être approfondie à deux niveaux. Premièrement par une uniformisation de l'appellation : mortier accolé, mortier résiduel, pâte résiduelle sont des termes à choisir et dont la définition devrait être commune. Deuxièmement par un contrôle post essai de l'efficacité du traitement tel que nous l'avons initié.

Une fois l'ensemble de ces points éclaircis, les modèles analytiques existants pourraient alors être optimisés par le biais de coefficients correcteurs représentatifs des particularités des GRB évoqués.

Enfin, dans le but de concevoir des bétons plus éco-respectueux, la prise en compte de leur impact environnemental par tout ou partie des indicateurs d'une ACV serait un objectif pertinent à ajouter à ceux fixés par les prescripteurs aujourd'hui.

Conclusion générale

A l'issue de ce travail de recherche dont les objectifs étaient multiples, aussi bien scientifiques que techniques et industriels, les nombreuses données expérimentales recueillies tant sur les GRB (Granulats Recyclés de Bétons) que sur les BGR (Bétons de Granulats Recyclés) ont d'une part, confirmé certains résultats observés lors de travaux antérieurs sur le sujet, et d'autre part, apporté des résultats nouveaux et complémentaires à ceux connus.

Le programme expérimental a été mené de façon à identifier les caractéristiques particulières des GRB, et parmi ces caractéristiques, celles dont l'influence sur les BGR composés à 100% de GRB est significative.

L'identification de ces caractéristiques particulières des GRB a tout d'abord conduit à adapter certains protocoles expérimentaux. Les adaptations les plus importantes identifiées concernent le séchage des granulats, l'évaluation de la distribution granulométrique et la détermination du coefficient d'absorption. La température de séchage à l'étuve des GRB doit être abaissée à 65°C pour éviter toute détérioration et la technique d'obtention de l'état saturé surface sèche modifié pour ne pas arracher du mortier accolé ou perdre des fines. La distribution granulométrique doit être déterminée par association d'une analyse granulométrique réalisée par tamisage à sec et d'une analyse granulométrique sur éléments fins obtenue par exemple par analyse laser afin de garantir que tous les éléments fins présents dans les GRB soient réellement comptabilisés. Il a été montré que le coefficient d'absorption, pour être représentatif de la capacité totale d'absorption du granulat, doit être déterminé après une durée d'immersion de plus de 30h dans le cas des GRB.

De plus, de nouveaux protocoles qui contribuent à une caractérisation des spécificités de GRB ont été proposés.

La détermination par analyse d'image de critères morphologiques tels que la circularité ou la convexité puis, son utilisation pour estimer au plus juste les surfaces spécifiques des grains dont la valeur conditionne les paramètres de certaines méthodes de formulation telle la méthode MBE, est nécessaire à l'obtention de compositions respectant les objectifs attendus.

Le suivi de la cinétique d'absorption d'eau des granulats nécessite une agitation en cours d'essai qui garantisse l'accessibilité à l'eau des espaces inter granulaires. Il contribue à la compréhension des phénomènes mis en jeu lors du malaxage des constituants des GRB et à la redéfinition des notions d'eau efficace et d'eau absorbée. Il a ainsi été avancé que l'eau d'absorption prise en compte dans le dosage de l'eau des compositions de bétons n'était pas dans les faits absorbée dans sa totalité. Des phénomènes de désorption ont été identifiés,

celle valeur ayant été estimée proche de 10% de l'eau d'absorption. Ainsi, la mise au point d'un protocole fiable de désorption de ces granulats recyclés compléterait avantageusement cette analyse.

Il a aussi été montré qu'une étude de la réactivité à l'eau des éléments fins ou plus grossiers doit être envisagée. Les dégagements de chaleur observés lors de la mise en présence d'eau de certains GRB peuvent contribuer à une réduction de l'ouvrabilité et une accélération de la cinétique de prise.

La détermination de la teneur en mortier accolé liée à plusieurs propriétés des GRB réalisée par une méthode unique, qu'elle soit chimique ou mécanique ne donne pas satisfaction. Seule l'association de deux méthodes, par exemple thermique puis mécanique, suivi d'un contrôle de la qualité des granulats pour garantir que tout le mortier et seulement le mortier résiduel ait été ôté, permettrait d'obtenir une valeur fiable de cette teneur.

Une fois ces protocoles validés et/ou proposés, des interactions entre les propriétés des granulats ont été identifiées et analysées. Après la détermination de la relation entre la porosité du granulat et son absorption, l'analyse des relations entre chacune des propriétés et l'absorption a montré que le module de finesse des sables et la circularité et la convexité des granulats étaient fortement corrélés à l'absorption. A contrario, la résistance à l'usure et à la fragmentation ainsi que la teneur en fines ne dépendent pas uniquement de ce coefficient d'absorption car la corrélation n'est pas forte.

L'identification des propriétés discriminantes pour les GRB a donc été faite et il en ressort que les GRB, en comparaison des GN, présentent des absorptions et temps de saturation supérieurs, des masses volumiques inférieures, des distributions granulaires du sable plus étalées, des teneurs en fines plus élevées, des circularités et convexités plus faibles et des résistances à l'usure et à la fragmentation réduites.

L'étude de l'influence du malaxage sur l'évolution du squelette granulaire a montré que celui-ci, dans le cas des GRB, évoluait, ce qui a conditionné le choix de la méthode de formulation et de mise en œuvre qui ont été faites pour les GRB. La recherche d'un empilement granulaire optimal n'a donc pas été le critère déterminant pour le choix de la détermination du squelette granulaire puisque le malaxage le modifie. De plus, le malaxage a été réalisé sur matériau pré-humidifié par leur eau de saturation pour limiter cette détérioration du squelette.

La comparaison des caractéristiques des BGNC et des BGR en présence ou non d'adjuvants a mis en évidence que les BGR présentent des maintiens d'ouvrabilité et des résistances mécaniques réduits comparés aux BGNC. L'utilisation de super plastifiant, notamment de polycarboxylates, réduit cet écart pour l'affaissement initial à 5 minutes.

Des modèles analytiques de prédiction des résistances mécaniques (Bolomey par exemple) peuvent être appliqués, mais la définition des valeurs telles que le coefficient granulaire ou le

dosage en eau efficace doivent être modifiées pour tenir compte des spécificités identifiées précédemment. La résistance du granulat, sa teneur en mortier et sa morphologie contribuent à diminuer la valeur de ce coefficient granulaire (G ou Kb). La durée nécessaire à l'obtention d'un état de saturation pour le GRB et la désorption probable au cours du malaxage indiquent un maximum de 90% de l'eau peut être considérée comme absorbée et conservée par le granulat, le supplément d'eau est présent dans la pâte et doit être comptabilisé dans l'eau efficace (si la totalité est introduite).

La réalisation de BGR pour lesquels plusieurs squelettes granulaires ont été proposés a montré que la constitution du squelette granulaire des BGR doit intégrer non seulement les proportions relatives de sables, gravillons et graviers, mais également la proportion de fines dans le squelette granulaire du sable. La conservation des fines mais dans une teneur (déterminée par analyse laser) proche de 10% conditionne de bonnes propriétés à l'état frais et durci. Les proportions de sables, gravillons et graviers qui conduisent à l'obtention de propriétés satisfaisantes doivent tenir compte du squelette spécifique du sable dont la teneur dans le squelette du BGR doit être moindre que celle proposée par des méthodes comme celle de Dreux Gorisse. Le critère du module de finesse ne semble pas être le plus pertinent ou le seul à devoir être pris en compte pour déterminer ce squelette.

Plusieurs solutions de modes de mise en œuvre et de préparation des granulats en amont ont été proposées. Même s'il ressort que la pré-humidification des granulats est nécessaire, le taux de pré-humidification, la durée de cette humidification et l'ordre d'incorporation des constituants n'ont pas été totalement optimisés.

Enfin, la méthode MBE a été étudiée et des propositions de corrections en sable ont été proposées et validées.

Ce projet très ambitieux a nécessité beaucoup de mesures expérimentales comme en témoigne le dossier en annexe. En effet, l'étude des bétons de granulats recyclés de béton nécessitait au préalable l'étude de ces granulats très complexes puisque d'origines diverses. Ainsi, dans le but de contribuer à lever des verrous aussi bien techniques que scientifiques, beaucoup de conclusions et recommandations ont été apportées. Il n'en reste pas moins que des travaux complémentaires sont proposés en perspectives, notamment concernant les analyses de cycle de vie afin de contribuer à améliorer les connaissances de tels matériaux ainsi que leurs qualités environnementales.

Table des figures

Figure 1 : compositions des ciments courants (Roux, 2008)	20
Figure 2 : Evolution de l'affaissement en fonction de la quantité d'eau (Laboratoire central des ponts et chaussées (France), 2001).....	21
Figure 3 : Evolution de la résistance mécanique en fonction de la variation de la quantité d'eau introduite dans un béton (Nikbin et al., 2014).....	22
Figure 4 : Evolution de la teneur en air entraîné et piégé en fonction du diamètre maximal du granulat (Collerparadi et al., 2007).	24
Figure 5 : gel craquelé silico-calco-alkalin dans un béton dégradé par la réaction alcali silice (Arliguie et al., 2007)	26
Figure 6 : relation entre la demande en eau des fillers calcaires et leur surface spécifique BET (Diederich, 2010).....	27
Figure 7 : Compacité d'un squelette granulaire en fonction de la granularité et des corrections effectuées (Bernier, 2004).....	29
Figure 8 : Logigramme générique de la formulation des bétons	29
Figure 9 : Corrélations entre le rapport C/E, le dosage en ciment et l'ouvrabilité (Dreux, 1990)	35
Figure 10 Passage du béton au MBE selon Dierkens (Dierkens, 2005)	37
Figure 11 : Gestion des déchets du Génie Civil, décapage des routes, déconstruction d'ouvrages (Braymand et al., 2014).....	40
Figure 12 : Constituants des granulats recyclés	42
Figure 13 : Constitution des granulats recyclés.....	43
Figure 14 : Teneurs en mortiers	44
Figure 15 : Distribution granulométrique de sables (S) et gravillons (Gr) naturels (N) et recyclés (R) (Evangelista and de Brito, 2007) ; (Corinaldesi and Moriconi, 2009).....	45
<i>Figure 16: Influence de teneur en mortier sur les valeurs de masses volumiques (Mefteh et al., 2013) ; (Mefteh and Arabi, 2011)</i>	51
Figure 17 : Influence de la teneur en mortier sur le coefficient d'absorption (Mefteh et al., 2013) ; (Mefteh and Arabi, 2011)	51
Figure 18: Absorption d'eau des granulats en fonction du temps de saturation, Mefteh (Mefteh et al., 2013) ; (Mefteh and Arabi, 2011)	52
Figure 19 : Relation entre le mortier accolé et les coefficients Los Angeles selon De Juan (de Juan and Gutiérrez, 2009)	53
Figure 20 : L'influence du taux de substitution des granulats recyclés à l'état sec, prémouillés et saturés sur la maniabilité (Mefteh et al., 2013) ; (Mefteh and Arabi, 2011).....	63
Figure 21 : L'influence du taux de substitution des granulats recyclés à l'état séché à l'air, séché à l'étuve et saturé surfaces sèches sur la maniabilité (Poon et al., 2004)	64
Figure 22 : mesure de retrait effectué par Québaud (Québaud et al., 1998) (A) et Whiting (Whiting et al., 2012) (B).....	67

Figure 23 : Influence de l'emploi des superplastifiants sur les propriétés mécaniques des BGR selon Pereira et al (Pereira et al., 2012a)	71
Figure 24 Détermination visuelle de l'état saturé surface sèche	85
Figure 25 Dispositif de séchage utilisé pour les sables.....	85
Figure 26 : méthode du tube absorbant.....	86
Figure 27 Pesée hydrostatique	86
Figure 28. Récipients pour les pesées hydrostatiques	87
Figure 29 : Prise en compte du volume d'un grain dans la détermination de la masse volumique réelle et absolue selon Dupain et al.,(Dupain and Saint-Arroman, 2009)	88
Figure 30 : Pycnomètre pour détermination des masses volumiques	88
Figure 31 Dispersion des analyses granulométriques pour les lots GNC et GR4 sur les classes livrées	96
Figure 32 courbe granulométriques classes 0/4-4/8-8/16 mm – coupures à 8 et 16 mm	97
Figure 33 Granulométrie laser, Fraction 0/100 μ m	98
Figure 34 Granulométrie laser, Fraction 0/500 μ m	98
Figure 35 Granulométrie 0-500 μ m des sables 0/4 mm	99
Figure 36 Granulométrie 0-100 μ m	99
Figure 37 : Module de finesse selon les normes XP P 18 540 et NF EN 12 620	100
Figure 38 Coefficients de courbure et d'uniformité.....	102
Figure 39 Coefficients de courbure et d'uniformité modifiés par d10 laser.....	103
Figure 40 Surfaces spécifiques Blaine des éléments fins.....	104
Figure 41 Etude statistique aire gravillon GNR	104
Figure 42 Etude statistique aire gravillon GNC	105
Figure 43 Etude statistique aire gravillon GR4.....	105
Figure 44 Etude statistique aire gravillons GNR, GNC, GR4.....	106
Figure 45 : Granulat d'étude – Variabilité dimensionnelle.....	107
Figure 46 Longueurs, largeurs et épaisseurs par mesure au pied à coulisse	108
Figure 47 Diamètres de Féret maximal et minimal par analyse d'image	109
Figure 48 : Tortuosité d'un grain	110
Figure 49 : Granulats d'étude – caractéristiques géométriques	111
Figure 50 Rapports Longueur/largeur par mesure au pied à coulisse.....	112
Figure 51 Critères allongement et tortuosité par analyse d'images	113
Figure 52 : Granulats d'étude - périmètre	114
Figure 53 Aire et périmètre par analyse d'images	115
Figure 54 : convexité d'un granulat.....	116
Figure 55 Critères de circularité et convexité selon type de granulat.	117
Figure 56 Circularité et convexité par analyse d'images	118
Figure 57 : Masses volumiques apparentes - Sables, Gravillons, Gravier	119
Figure 58 Coefficients d'absorption	120
Figure 59 Suivi de l'absorption des granulats naturels et recyclés.....	121

Figure 60 Masse volumique réelle après séchage	122
Figure 61 Masses volumiques réelles saturées surface sèches	122
Figure 62 Masses volumiques absolues.....	122
Figure 63 : Masse volumique absolue des fractions 0/100 ; 0/315 et 0/500 μm	123
Figure 64 Suivi de la désorption des gravillons	124
Figure 65 Suivi de la désorption des graviers.....	124
Figure 66 et : Coefficients Los Angeles et Micro-Deval.....	126
Figure 67 : Evolution du squelette granulaire après malaxage des GNC et GR4.....	128
Figure 68 Suivi du dégagement de chaleur des granulats en présence d'eau	130
Figure 69 : Résistances mécaniques à 48 heures des pâtes de ciment	131
Figure 70 : Indices d'activité « i_{28} »	132
Figure 71 : proportion massique de mortier accolé obtenue par comparaison pesées	134
.....	
Figure 72 Validité des protocoles normalisés et usuels de caractérisation des granulats	140
.....	
Figure 73 corrélations masses volumiques vs coefficient d'absorption.....	141
Figure 74 Relation porosité vs absorption selon Équation 13	141
Figure 75 Relations entre propriétés et coefficient d'absorption	142
Figure 76 Corrélation entre estimations des diamètres moyens et des périmètres de particules.....	144
Figure 77 Ecart d'estimation des surfaces spécifiques	144
Figure 78 : Malaxage – Evolution du squelette granulaire	151
Figure 79: Fitage du squelette granulaire du béton de granulats recyclés sur celui de granulat naturels concassés.....	152
Figure 80: Superposition des squelettes granulaires selon les différentes coupes	153
Figure 81 : Mesure de la teneur en air avec un aéromètre à mortier	158
Figure 82 : Mesure de l'affaissement des bétons au cône d'Abrams	158
Figure 83 : Mesure de l'affaissement et l'étalement des mortiers au mini cône	159
Figure 84 : Presse hydraulique pour les essais mécaniques sur bétons	160
Figure 85 : Evolution de l'ouvrabilité des bétons non adjuvantés.....	161
Figure 86 : Evolution des résistances mécaniques des bétons et des pertes de masse.....	162
Figure 87 : Ouvrabilité des bétons à 5 et 90 minutes – screening complet pour BGR	164
Figure 88 : Evolution de l'ouvrabilité des BGNC et BGR – screening identique BGBR et BGNC	164
Figure 89 : Evolution de l'ouvrabilité des BGR – screening complet	165
Figure 90 : Perte d'ouvrabilité des bétons par rapport à la valeur initiale à 5 min	165
Figure 91 : Résistance des bétons à 1 jour.....	166
Figure 92 : Résistance des bétons à 28 et 90 jours.....	167
Figure 93 : Evolution de la résistance des BGNC et BGR	167
Figure 94 : -Masse volumique moyenne des BGNC et BGR.....	169

Figure 95 : -perte de masses volumique par éprouvette à l'état durci des BGNC et BGR.....	169
Figure 96 : Caractéristiques à l'état durci des BGR – screening complet.....	170
Figure 97 : Ouvrabilité et de masses volumique à l'état frais – BGR squelettes granulaires modifiés.....	172
Figure 98 : Résistances et masses volumiques à l'état durci BGR squelettes granulaires modifiés.....	172
Figure 99 Evolution d'ouvrabilité des bétons réalisés avec l'adjuvant 014 dont les squelettes ont été modifiés	174
Figure 100 : corrélation béton et MBE non adjuvanté et sans correction en sable.....	176
Figure 101 Influence de la correction en sable sur la corrélation B/MBE sans et avec adjuvant	181
Figure 102 Corrélations B/MBE adjuvantés GNC et GR, toutes échéances.....	182
Figure 103 Corrélations B/MBE adjuvantés GNC 5 et 90 min.....	182
Figure 104 Corrélations B/MBE adjuvantés GR 5 et 90 min	182
Figure 105 Corrélations gains ouvrabilité B/MBE adjuvantés GR 5 et 90 min.....	183
Figure 106 Corrélations résistances mécaniques B/MBE.....	184
Figure 107 Perte de masse des MBE GR et GNC.....	185
Figure 108 : Affaissement des BGNC, BGNR et BGR.....	186
Figure 109 Caractéristiques des BGR dont la fraction sableuse a été modifiée	188
Figure 110 Caractéristiques des BGR dont le dosage en ciment a été modifié	190
Figure 111 Caractéristiques des BGR dont les conditions de mise en œuvre ont été modifiées.....	192
Figure 112 : Corrélation entre les valeurs d'affaissement des Bétons et MBE adjuvanté avec correction en sable	203
Figure 113 Analyse du Cycle de Vie (Braymand, 2015b) ; (S Braymand, 2014) ; (Braymand, 2013).....	204
Figure 114 Contenu d'une FDES (Braymand, 2015b) ; (S Braymand, 2014) ; (Braymand, 2013).....	204
Figure 115 Inventaire de Cycle de Vie : collecte de données (Braymand, 2015b) ; (S Braymand, 2014) ; (Braymand, 2013).....	204
Figure 116: Impacts environnementaux relatifs - Série 4, 5, 7 et 17 (ref BGNC).....	210
Figure 117 : Impacts environnementaux relatifs –BGNC, BGNR et BGR (ref série 4).....	212
Figure 118 : Impacts environnementaux relatifs –BGNC, BGNR et BGR (ref série 4 ; sans série 17).....	213

Table des tableaux

Tableau 1 : Données des déchets des BTP en France en 2004 (Ifen, 2008)	16
Tableau 2: Estimation des teneurs en mortiers.....	44
Tableau 3 : classification des sables fonction du module de finesse (NF EN 12620) (Afnor, Norme NF EN 12620, 2003)	46
Tableau 4 : Modules de finesse selon la NF EN 12 620	46
Tableau 5 : Surface spécifique des fines de granulats recyclés.....	47
Tableau 6 : Equivalent de sable et Bleu de méthylène	48
Tableau 7 : Porosité des granulats.....	49
Tableau 8 : Synthèse des résultats des masses volumiques ρ_{rd} , ρ_{ssd} , ρ_a et coefficients d'absorption WA_{24} des granulats recyclés et naturels	50
Tableau 9 : Suivi de l'absorption des granulats recyclés.....	52
Tableau 10 : Tableau récapitulatif des données de résistance à la fragmentation.....	54
Tableau 11 : Tableau des données de résistance à la fragmentation sur les granulats	54
Tableau 12 : Variation de la résistance à la fragmentation des granulats recyclés en fonction de la résistance du béton parent	54
Tableau 13 : Tableau récapitulatif des données de Micro Deval	55
Tableau 14 : Analyse chimique sur des granulats recyclés (Evangelista and de Brito, 2014) ; (Thomas et al., n.d.).....	56
Tableau 15 : Influence du taux de préhumidification sur l'ouvrabilité initiale en fonction des taux de substitutions (Mefteh et al., 2013) ; (Meftah and Arabi, 2011) ; (Poon et al., 2004)	62
Tableau 16 : Teneurs en air obtenues sur des bétons (Brito and Saikia, 2013) ; (Dao, 2012).....	65
Tableau 17 : Caractéristiques obtenues sur des bétons réalisés par Buyle-Bodin et al (Buyle-Bodin,F and Hadjieva-Zaharieva, 2002)	68
Tableau 18 : Composition du béton des granulats GR 5 et GR6 (Sandrine Braymand et al., 2012b) ;(Braymand et al., 2013).....	78
Tableau 19: Composition du mortier ayant servi à l'obtention des granulats GR 7	78
Tableau 20 : Provenance des granulats.....	78
Tableau 21 : Coupures granulaires étudiées.....	79
Tableau 22: calcul des modules de finesse	80
Tableau 23 Récapitulatif des essais effectués - granulométrie laser	81
Tableau 24: Classe granulaires étudiées par analyse d'image	82
Tableau 25 : Récapitulatif des lots testés pour les essais de prise.....	92
Tableau 26 : Récapitulatif des lots testés pour les essais au Langavant.....	92
Tableau 27: Teneurs en éléments fins des sables.....	97
Tableau 28 passants à 500 μm (%) des sables 0/4 mm.....	98
Tableau 29 passants à 100 μm (%) des sables 0/4 mm.....	99

Tableau 30 passants à 63 μm (%) des sables 0/4 mm.....	99
Tableau 31 : Classement des sables selon le module de finesse NF EN 12620 (Afnor, Norme NF EN 12620, 2003).....	101
Tableau 32 : Classement des sables selon le passant au tamis de 500 μm NF EN 12620 (Afnor, Norme NF EN 12620, 2003).....	101
Tableau 33: Table des masses volumiques apparentes	120
Tableau 34 Coefficients d'absorption %	120
Tableau 35 : Coefficients Los Angeles et Micro-Deval	126
Tableau 36 : Coefficient LOS Angeles normalisés, d'après NF P 18-545 (Afnor, NF P 18-545, 2011)	126
Tableau 37 : Coefficient Micro-Deval d'après NF EN 12620 (Afnor, Norme NF EN 12620, 2003).....	127
Tableau 38 : Proportion des différents constituants des granulats recyclés.....	128
Tableau 39 : Catégories des constituants principaux et secondaires des granulats recyclés.....	129
Tableau 40 : Propreté des sables - Ecs et MB	129
Tableau 41 : Propreté des sables - spécification normative d'après (Afnor, Norme NF EN 933-8, 1999).....	129
Tableau 42 Mesure de la prise sur fraction 0-500 μm	130
Tableau 43 : Quantité de mortier accolé - essai à l'acide chlorhydrique.....	133
Tableau 44 Efficacité du traitement Micro Deval.....	135
Tableau 45 : Quantité de mortier accolé - Essai Micro-Deval granulat GR4- 10/14 mm	137
Tableau 46: Compositions et propriétés du ciment utilisé	148
Tableau 47 : Caractéristiques des adjuvants utilisés.....	149
Tableau 48 : squelette granulaire du béton de référence de granulats naturels	151
Tableau 49 : Composition théorique de bétons de granulats naturels concassés pour 1 m^3	152
Tableau 50: Résultats du squelette granulaire superposé.....	153
Tableau 51: Composition théorique de bétons de granulats recyclés en kg pour 1 m^3	153
Tableau 52: Résultats des valeurs de corrélations obtenus pour chaque granulométrie	154
Tableau 53: Proportions des fractions intermédiaires du sable	154
Tableau 54 : squelette granulaire recyclé Dreux 0,75.....	154
Tableau 55 : Composition de MBE de granulats naturel sans adjuvant, E/C=0,65.....	155
Tableau 56 : Composition de MBE de granulats recyclés sans adjuvant, E/C=0,65 ...	155
Tableau 57 Complément d'informations sur les plages de dosages utilisés	156
Tableau 58 : mode de mise en œuvre des bétons et moment d'introduction de l'adjuvant	157
Tableau 59: Classes de consistance – NF EN 12 350-2[9]	158

Tableau 60 Récapitulatif des résultats obtenus sur les adjuvants sélectionnés	171
Tableau 61: Résultats du squelette granulaire superposé.....	174
Tableau 62 Résultats de résistance mécanique à 24 heures sur BGR formulé selon Dreux Gorisse.....	174
Tableau 63: Valeurs des coefficients granulaires Kb (Dreux and Festa, 1998).....	178
Tableau 64 : Valeur de Kv.....	178
Tableau 65 : squelette granulaire du béton de granulats naturels roulés.....	186
Tableau 66 : Composition théorique de bétons de granulats naturels roulés pour 1 m3	186
Tableau 67: Squelette granulaire composé des granulats recyclés et de sable naturel concassé.....	187
Tableau 68: Squelette granulaire composé des granulats recyclés de sable naturel roulé.....	187
Tableau 69: Squelette granulaire des granulats recyclés sans éléments fins.....	187
Tableau 70 : Fiche de béton de granulats naturels concassés-production.....	208
Tableau 71 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGR 7	209

Table des équations

Équation 1	34
Équation 2: Coefficient d'absorption d'eau	83
Équation 3: Coefficient d'absorption d'eau déterminé par pesée hydrostatique.....	87
Équation 4: Masse volumique absolue	88
Équation 5: Masse volumique réelle saturée à surface sèche	88
Équation 6: Masse volumique réelle après séchage à l'étuve.....	88
Équation 7 : Calcul de la désorption instantanée.....	89
Équation 8 : Coefficient Micro deval (Afnor, Norme NF EN 1097-1, 2011)	90
Équation 9 : Coefficient Los Angeles (Afnor, Norme NF EN 1097-2, 2010).....	90
Équation 10 : Equivalent de sable.....	91
Équation 11	136
Équation 12	140
Équation 13 relation porosité vs absorption	141
Équation 14	177
Équation 15.....	178
Équation 16.....	179

Bibliographie

- Abbas, A., Fathifazl, G., Isgor, O.B., Razaqpur, A.G., Fournier, B., Foo, S., 2009. Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method. *Cem. Concr. Compos.* 31, 555–563. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.02.012
- ADEME, FFB, 2013. Mieux gérer les déchets de chantier de bâtiment.
- Afnor, NF EN 196-9, 2010. Méthodes d'essais des ciments, Partie 9 : Chaleur d'hydratation – Méthode semi-adiabatique p 10.
- Afnor, NF P 18-508, 1995. Additions pour béton hydraulique: Additions calcaires spécifications et critères de conformité p 24.
- Afnor, NF P 18-509, 1998. Additions pour béton hydraulique: Additions Siliceuses spécifications et critères de conformité p 12.
- Afnor, NF P 18-545, 2011. Granulats: Elements de définition, conformité et codification. Sept. 2011 p 74.
- Afnor, Norme NF EN 12 350-2, 2012. Essais pour les bétons frais : Essai d'affaissement p 13.
- Afnor, Norme NF EN 196-3, 1995. Méthodes d'essais des ciments. Partie 3: Détermination du temps de prise et de la stabilité p 12.
- Afnor, Norme NF EN 196 6, 1990. Essais pour déterminer la finesse. Norme européenne NF p 20.
- Afnor, Norme NF EN 197-1, 2012. Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants p 36.
- Afnor, Norme NF EN 206-1, 2014. Béton : Spécification, performances, production et conformité (Indice de classement : P18-325) 99.
- Afnor, Norme NF EN 206-1, 2004. Béton : Spécification, performances, production et conformité 95.
- Afnor, Norme NF EN 206-1/CN, 2012. Béton-Partie 1 : Spécification, performance, production et conformité- Complément national à la norme NF EN 206-1 (Indice de classement : P18-325-1/CN) 108.
- Afnor, Norme NF EN 932-1, 1996. Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats: Méthodes d'échantillonnage. Norme européenne NF p 32.
- Afnor, Norme NF EN 933-1, 1997. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats: Détermination de la granularité-Analyse granulométrique par tamisage p 13.
- Afnor, Norme, NF EN 933-3, 1997. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats : détermination de la forme des granulats - coefficient d'aplatissement 1–16.
- Afnor, Norme NF EN 933-8, 1999. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats: évaluation des fines - Equivalent de sable p 24.
- Afnor, Norme NF EN 933-9, 2009. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats : Qualification des fines - Essai au bleu de méthylène p 15.
- Afnor, Norme NF EN 933-11, 2009. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats 11.
- Afnor, Norme NF EN 1097-1, 2011. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques de granulats: méthodes pour la détermination de la résistance à l'usure (micro-deval) p 14.

- Afnor, Norme NF EN 1097-2, 2010. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques de granulats: méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation p 34.
- Afnor, Norme NF EN 1097-5, 2008. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats : Détermination de la teneur en eau en étuve ventilée 1–10.
- Afnor, Norme NF EN 1097-6, 2001. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats: détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau p 34.
- Afnor, Norme NF EN 1097-7, 2008. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats : Détermination de la masse volumique absolue du filler p 13.
- Afnor, Norme NF EN 1744-1, 2010. Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats p 57.
- Afnor, Norme NF EN 12620, 2003. Granulats pour béton 1–47.
- Afnor, Norme NF EN 13055-1, 2002. Granulats légers: Granulats légers pour bétons et mortiers 38.
- Afnor, Norme NF X 31-503, 1992. Qualité des sols- Méthodes physiques - Mesure de la masse volumique apparente-Méthode au sable p 10.
- Afnor, Norme NF XP P 18-540, 1997. Granulats Définitions,conformité,spécifications p 36.
- Afnor, Pr NF EN 12620, 2011. Projet de norme Granulats pour béton p 104.
- Agrela, F., Alaejos, P., De Juan, M.S., 2013. 12 - Properties of concrete with recycled aggregates, in: Brito, F.P.-T.W.Y.T.A.L.D. de (Ed.), Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste. Woodhead Publishing, pp. 304–329.
- Ajdukiewicz, A., Kliszczewicz, A., 2002. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. Cem. Concr. Compos. 24, 269–279. doi:0958-9465/02/\$
- Akçaoğlu, T., Tokyay, M., Çelik, T., 2002. Effect of coarse aggregate size on interfacial cracking under uniaxial compression. Mater. Lett. 57, 828–833. doi:10.1016/S0167-577X(02)00881-9
- Arandigoyen, M., Bicer-Simsir, B., Alvarez, J.I., Lange, D.A., 2006. Variation of microstructure with carbonation in lime and blended pastes. Appl. Surf. Sci. 252, 7562–7571. doi:10.1016/j.apsusc.2005.09.007
- Arliguie, G., Hornain, H., Association française de génie civil, Laboratoire Matériaux et durabilité des constructions (Toulouse) (Eds.), 2007. GranDuBé: grandeurs associées à la durabilité des bétons. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris.
- Association française de normalisation, 2012. Adjuvants du béton: recueil, normes. AFNOR, La Plaine-Saint-Denis.
- Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Baron, J., Ollivier, J.-P., 1996. Les bétons: bases et données pour leur formulation. Eyrolles, Paris.
- Barbudo, A., de Brito, J., Evangelista, L., Bravo, M., Agrela, F., 2013. Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete. J. Clean. Prod. 59, 93–98. doi:10.1016/j.jclepro.2013.06.022
- Baroghel-Bouny, V., Chaussadent, T., Croquette, G., Divet, L., Gawsewitch, J., Godin Jean, Henry Dominique, Platret, G., Vilain, G., 2002. Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons. Méthodes de mesure et d'essai de laboratoire. Laboratoire central des ponts et chaussées IST, Paris.
- Baron, J., Lesage, R., 1976. La composition du béton hydraulique du laboratoire au chantier.

- Bernier, G., 2004. Formulation des bétons. Tech. Ing. Béton Dans Constr. Défin. Qualif. base documentaire : TIB221DUO.
- Bernier, G., 1983. Le recyclage de béton sous forme de granulats (Thèse 3ième cycle Génie Mécanique). Pierre et Marie Curie, Paris . p.306.
- Bessa-badreddine, A., 2004. Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilités des mortiers (Thèse de Doctorat de Génie Civil). Université de Cergy-pontoise.
- Bolomey, J., 1935. Granulation et prévision de la résistance probable des bétons, Travaux.
- Bouny, V.B., 1994. Caractéristiques microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances (Thèse de Doctorat de Génie Civil). Ecole nationale des ponts et chaussées 21 Juin 1994 p.553.
- Braymand, S., 2015a. La gestion des déchets respectueux de l'environnement : les chantiers verts : cours.
- Braymand, S., 2015b. QSE-Licence professionnelle Génie Civil et Construction-Energies et Confort.
- Braymand, S., 2014. Etude environnementale et matériaux alternatifs utilisés en travaux public.
- Braymand, S., 2014. Impact environnemental et matériaux.
- Braymand, S., 2013. Impact environnemental des matériaux.
- Braymand, S., 2012. Study of rheological and mechanical properties of recycled brick aggregate concrete.
- Braymand, S., 2010. Influence de l'utilisation de granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques et physiques des bétons.
- Braymand, S., Feugeas, F., Serres, N., Kunwufine, D., Munzer, C., Haniche, R., 2013. Bétons de granulats recyclés (et aux laitiers de hauts fourneaux).
- Braymand, S., François, P., Feugeas, F., Fond, C., 2015a. Rheological properties of recycled aggregate concrete using superplasticizers. JCEA Sous Presse 15.
- Braymand, S., François, P., Feugeas, F., Fond, C., 2015b. Rheological properties of recycled aggregate concrete using superplasticizers. JCEA Sous Presse 15.
- Braymand, S., François, P., Feugeas, F., Fond, C., 2012a. Rheological properties of recycled aggregate concrete using superplasticizers, in: Tenth International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. Prague (Czech republic), p. 15.
- Braymand, S., François, P., Grondin, A., Feugeas, F., Fond, C., 2012b. Propriétés rhéologiques, physiques et mécaniques des bétons de granulats recyclés. Presented at the XXXe Rencontres AUGC-IBPSA, Chambéry, Savoie, p. 10.P.
- Braymand, S., Grandgeorge, J., Eich, D., Fond, C., 2011. Valorisation des déchets de chantier dans les bétons.
- Braymand, S., Grondin, A., François, P., Feugeas, F., 2012. Rheological properties of recycled aggregate concrete using superplasticizers, in: Twelfth International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues. Prague (Czech republic), p. 15.
- Braymand, S., Roux, S., Kunwufine, D., Mihalcea, C., Feugeas, F., Fond, C., 2014. Les granulats recyclés de bétons: un matériau à fort potentiel de valorisation dans les bétons, in: Matériaux 2014. Montpellier (France), p. 10.
- Brito, J. de, Saikia, N., 2013. Recycled aggregate in concrete use of industrial, construction and demolition waste. Springer, London; New York.

- Buck A.D., 1977. Recycled concrete as a source of aggregate. *ACI J* (74–22): 212–9.
- Bur, N., n.d. Etude des caractéristiques physico-chimiques de nouveaux bétons éco-respectueux pour leur résistance à l'environnement dans le cadre du développement durable (Thèse). Université de Strasbourg 5 Septembre 2012., p.225, INSA de Strasbourg.
- Bur, N., Roux, S., Delmas, L., Géraud, Y., Feugeas, F., 2009. Porosité des mortiers et bioréceptivité. *Matér. Tech.* 98, 31–40. doi:10.1051/mattech/2009047
- Butler, L., West, J.S., Tighe, S.L., 2013. Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength. *Constr. Build. Mater.* 47, 1292–1301. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.074
- Butler, L., West, J.S., Tighe, S.L., 2011. The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. *Cem. Concr. Res.* 41, 1037–1049. doi:10.1016/j.cemconres.2011.06.004
- Buyle-Bodin, F., Hadjieva-Zaharieva, 2002. Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete. *Mater. Struct.* 35, 504–509.
- Cerema, 2014. Graves de valorisation Graves de déconstruction.
- Chaid, R., Jauberthie, R., Boukhalel, A., 2010. Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons. *Leban. Sci. J.* 11, 99–103.
- Charonnat, Y., 2011. Etude de faisabilité pour un Projet National de R&D sur le recyclage complet des bétons.
- CIMBéton, Ecole Française du béton, 2005. Les constituants des bétons et des mortiers.
- Colina, H., 2010. Etude d'opportunité pour un Projet National de R&D sur le recyclage complet des bétons.
- Collepardi, M., 2010. The new concrete. Grafiche Tintoretto, Castrette di Villorba (Treviso).
- Collepardi, M., Collepardi, S., Troli, R., 2007. Concrete mix Design. vicolo Verdi 45/47, 2007, Italy.
- Corinaldesi, V., Moriconi, G., 2009. Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 23, 2869–2876. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004
- Curtil, L., Habita, M.F., 1994. Study of alkali-aggregate reaction on concrete prisms. *Cem. Concr. Res.* 24, 473–478.
- Cyr, M., 1999. Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires. L'INSA de Toulouse et L'Université de SHERBROOKE.
- Dao, D.-T., 2012. (Multi-) recyclage du béton hydraulique (Thèse de Doctorat de Génie Civil). Ecole centrale de Nantes, Nantes, 2012, 312 p.
- De Boer, G.B.J., de Weerd, C., Thoenes, D., Goossens, H.W.J., 1987. Laser Diffraction Spectrometry: Fraunhofer Diffraction Versus Mie Scattering. *Part. Part. Syst. Charact.* 4, 14–19. doi:10.1002/ppsc.19870040104
- De Juan, M.S., Gutiérrez, P.A., 2009. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.* 23, 872–877. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012
- De Juan, M.S., Gutiérrez, P.A., 2004. Influence of recycled aggregate quality on concrete properties, in: International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures. 545-553, Barcelona, Spain.
- De Larrard, F., 2000. Structures granulaires et formulation des bétons. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes.

- Dhir, R.K., McCarthy, M.J., Halliday, J.E., Tang, M.C., 2005. ASR Testing on Recycled Aggregates - - Guidance on Alkali Limits and Reactivity, DTI/WRAP Aggregates Research Programme STBF 13/14C. The Waste & Resources Action Programme.
- Dhir, R.K., plaine, K.A., 2007. Performance Related Approach to Use of Recycled Aggregates, DTI/WRAP Aggregates Research Programme STBF 13/14C. The Waste & Resources Action Programme.
- Dhir, R.K., Plaine, K.A., 2004. Suitability and practicality of using coarse RCA in normal and high-strength concrete, in: n: 1st International Conference on Sustainable Construction: Waste Management. Singapore, pp. 108 –123.
- Dhir, R.K., plaine, K.A., 2003. Demonstration project utilising coarse recycled aggregate, CTU/2403 Technical report. Final report to department of trade and industry. University of Dundee.
- Dhir, R.K., plaine, K.A., Halliday, J., 2008. Facilitating the wider use of coarse and fine recycled aggregates from washing plants, Final report. WRAP Project N. AGG 105-003. Dundee: University of Dundee.
- Diederich, P., 2010. Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton (Thèse de Doctorat de Génie Civil). Université de Toulouse, Toulouse.
- Dierkens, M., 2005. Mesures rhéologiques et modélisation de matériaux en cours de prise (Thèse de Doctorat de Génie Civil). INSA de Lyon, 2005, 281p.
- Directive 2008/98/CE du parlement européen et du conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives (Journal officiel de l'Union Européenne No. L312/3), 2008.
- Djerbi Tegguer, A., 2012. Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach. *Constr. Build. Mater.* 27, 112–116. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.018
- Dreal, A., 2012. Schéma départemental des carrières du Bas-Rhin (No. 09). Préfecture, Bas-Rhin.
- Dreux, G., 1990. Nouveau guide du béton. Edition Eyrolles, Paris,1990.
- Dreux, G., 1982. Compositions des bétons. Tech. Ing.
- Dreux, G., Festa, J., 1998. Nouveau guide du béton et de ses constituants. Eyrolles, Paris.
- Dreux, G., Festa, J., 1995. Nouveau guide du béton: composants et propriétés, composition et dosage, fabrication, transport et mise en oeuvre, contrôle et normalisation. Eyrolles, Paris.
- Dupain, R., Saint-Arroman, J.-C., 2009. Granulats, sols, ciments et bétons: caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire : terminale STI génie civil, BTS bâtiment, BTS travaux publics, DUT génie civil, master pro géosciences génie civil, écoles d'ingénieurs. Casteilla, Paris.
- Escadeillas, G., 2010. Hydratation, Structuration des matériaux cimentaires. Cours UPS-INSA Toulouse.
- Escadeillas, G., 1988. Les ciments aux fillers calcaires : contribution à leur optimisation par l'étude des propriétés mécaniques et physiques des bétons fillerisés.
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., Barra, M., 2007. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Res.* 37, 735–742. doi:10.1016/j.cemconres.2007.02.002

- Evangelista, L., Brito, J. de, 2009. State-of-the-art on the use of fine recycled aggregates in concrete production, in: 2nd International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment. Sao Paulo, Brazil, pp. 175–183.
- Evangelista, L., de Brito, J., 2014. Concrete with fine recycled aggregates: a review. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 18, 129–172. doi:10.1080/19648189.2013.851038
- Evangelista, L., de Brito, J., 2007. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cem. Concr. Compos.* 29, 397–401. doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004
- Florea, M.V.A., Ning, Z., Brouwers, H.J.H., 2014. Activation of liberated concrete fines and their application in mortars. *Constr. Build. Mater.* 50, 1–12. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.09.012
- François de Larrard, 2000. Structures granulaires et formulation des bétons (Ouvrage No. OA 34), Etudes et Recherches des Laboratoires des ponts et chaussées. ENPC, Nantes.
- Fumoto, T., Yamada, M., 2002. Influence of quality of recycled Fine aggregate on properties of concrete. *Mem Fac Eng* 43, pp.97–103.
- Galvín, A.P., Agrela, F., Ayuso, J., Beltrán, M.G., Barbudo, A., 2014. Leaching assessment of concrete made of recycled coarse aggregate: Physical and environmental characterisation of aggregates and hardened concrete. *Waste Manag.* 34, 1693–1704. doi:10.1016/j.wasman.2014.05.001
- García-González, J., Rodríguez-Robles, D., Juan-Valdés, A., Morán-del Pozo, J., Guerra-Romero, M., 2014. Pre-Saturation Technique of the Recycled Aggregates: Solution to the Water Absorption Drawback in the Recycled Concrete Manufacture. *Materials* 7, 6224–6236. doi:10.3390/ma7096224
- Gómez-Soberón, J.M., 2002. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. *Cem. Concr. Res.* 32, 1301–1311. doi:10.1016/S0008-8846(02)00795-0
- González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F., 2008. Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. *Materials and mechanical properties. Build. Environ.* 43, 429–437. doi:10.1016/j.buildenv.2007.01.008
- González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F., Eiras-López, J., Seara-Paz, S., 2011. Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete. *Mater. Struct.* 44, 1759–1771. doi:10.1617/s11527-011-9736-7
- Guillemain, G., Ramahandry, M., 2014. Détermination of the mortar amount in recycled concrete (Technological research program No. 1). Strasbourg, p. p.1-9.
- Hadjieva-Zaharieva, R., 1998. Duabilité des bétons à base de granulats recyclés (Thèse de Doctorat de Génie Civil). Université d'Artois, Artois, France.
- Hafid, H., 2012. Influence des paramètres morphologiques des granulats sur le comportement rhéologique des bétons frais : étude sur systèmes modèles (Thèse de Doctorat de Génie Civil). Université Paris-Est, Paris.
- Hansen, T.C., 1986. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. *Mater. Struct.* 19, 201–246.
- Hendriks, C.F., Janssen, G.M.T., Vázquez, E., RILEM TC 198-URM, 2005. Use of recycled materials. RILEM, Bagnaux.
- Henry, M., Pardo, G., Nishimura, T., Kato, Y., 2011. Balancing durability and environmental impact in concrete combining low-grade recycled aggregates and mineral admixtures. *Resour. Conserv. Recycl.* 55, 1060–1069. doi:10.1016/j.resconrec.2011.05.020

- Hoerd, F., 2013. Etude des phénomènes d'endommagement régissant les matériaux recyclés à matrice cimentaire (Master recherche). Icube, Strasbourg.
- Ifen, 2008. Les quantités de déchets produits et éliminés en France en 2004.
- Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil (France), 2004. Résultats et recommandations du projet national Calibé: la maîtrise de la qualité des bétons. Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, Paris.
- International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, 1992. Recycling of demolished concrete and masonry: report of Technical Committee 37-DRC, Demolition and Reuse of Concrete, 1st ed. ed, RILEM report. E & FN Spon, London ; New York.
- Katz, A., 2003. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cem. Concr. Res.* 33, 703–711. doi:10.1016/S0008-8846(02)01033-5
- Ke, Y., 2008. Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers : expérimentation et modélisation (Thèse de Doctorat de Génie Civil). Université de Cergy-Pontoise. p 300.
- Kılıç, A., Atiş, C.D., Teymen, A., Karahan, O., Özcan, F., Bilim, C., Özdemir, M., 2008. The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete. *Cem. Concr. Compos.* 30, 290–296. doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.05.011
- Kwan, A.K.H., 2000. use of condensed silica fume for making high-strength, self-consolidated concrete. *Can. J. Civ. Engeneering* 27, 620–627.
- Laboratoire central des ponts et chaussées (France), 2001. La maîtrise de l'eau dans le béton hydraulique. LCPC, Paris.
- Lagerblad, B., Gram, H.-E., Westerholm, M., 2014. Evaluation of the quality of fine materials and filler from crushed rocks in concrete production. *Constr. Build. Mater.* 67, 121–126. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.10.029
- Larrard, F., Buil, M., 1987. Granularité et compacité dans les matériaux de génie civil. *Mater. Struct.* 20, 117–126. doi:10.1007/BF02472747
- Legifrance.gov.fr, 2015. Code de l'environnement [WWW Document]. http://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?sessionId=6EA168DDA420700CF4F1456278B52FD2.tpdjo02v_1?cidTexte=LEGITEXT000006074220&dateTexte=20090210.
- Limbachiya, M.C., Marrocchino, E., Koulouris, A., 2007. Chemical–mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate. *Waste Manag.* 27, 201–208. doi:10.1016/j.wasman.2006.01.005
- Limbachiya, M., Meddah, M.S., Ouchagour, Y., 2012. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. *Constr. Build. Mater.* 27, 439–449. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.023
- López-Gayarre, F., Serna, P., Domingo-Cabo, A., Serrano-López, M.A., López-Colina, C., 2009. Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste Manag.* 29, 3022–3028. doi:10.1016/j.wasman.2009.07.010
- Maes, P., 2004. Gestion des déchets de chantier: guide méthodologique. Afnor, Saint-Denis La Plaine.
- Mahmoud, S., 2005. Classification of Recycled Sands and their Applications as Fine Aggregates for Concrete and Bituminous Mixtures (Thèse). Kassel university, Allemagne.
- Marta Sanchez de Juan, Pilar Aloejos Gutiérrez, 2004. Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, in: International RILEM Conference on

- the use of recycled materials in buildings and structure. RILEM, Barcelona, Spain, pp. 536–544.
- Martín-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A., Valverde-Espinosa, I., 2011. Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. *Constr. Build. Mater.* 25, 742–748. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.07.012
- Mas, B., Cladera, A., Bestard, J., Muntaner, D., López, C.E., Piña, S., Prades, J., 2012a. Concrete with mixed recycled aggregates: Influence of the type of cement. *Constr. Build. Mater.* 34, 430–441. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.092
- Mas, B., Cladera, A., Olmo, T. del, Pitarch, F., 2012b. Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use. *Constr. Build. Mater.* 27, 612–622. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.073
- Maximilien, S., 1995. Contribution à l'étude du comportement rhéologique des bétons fluides. INSA de Lyon, 1995, 217p, Lyon.
- Meftah, H., Arabi, N., 2011. Les granulats recyclés humidifiés : comportements des bétons frais et durcis, in: XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, p. 10.
- Meftah, H., Kebaili, O., Oucief, H., Berredjem, L., Arabi, N., 2013. Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. *J. Clean. Prod.* 54, 282–288. doi:10.1016/j.jclepro.2013.05.009
- Ministère de l'écologie et du développement, 2004. Guide de bonnes pratiques relatif aux installations de stockage des déchets inertes issus des BTP.
- Mohamed, I., Ronel, S., Curtil, L., 2007a. Influence of composite materials confinement on alkali-aggregate mechanical behaviour. *Mater. Struct.* 39, 479–490. doi:10.1007/s11527-005-9019-2
- Mohamed, I., Ronel, S., Curtil, L., 2007b. Influence of composite materials confinement on alkali-aggregate mechanical behaviour. *Mater. Struct.* 39, 479–490. doi:10.1007/s11527-005-9019-2
- Morandea, A., 2013. Carbonatation atmosphérique des systèmes cimentaires à faible teneur en portlandite (Thèse de Doctorat de Génie Civil). Université Paris-Est, Paris.
- Morel-Braymand, S., 1999. Elaboration d'un procédé de solidification /stabilisation de refiom (Thèse). INSA, Lyon.
- Mukai T., et al, 1979. Study on reuse of waste concrete for aggregate of concrete, in: *Energy and Resource Conservation in Concrete Technology'' Japan-US Cooperative Science Programme*. San Francisco.
- Navarro, A., Blanchard, J.-M., Bouster, C., Gourdon, R., Manfé, C., Maraval, S., Mathurin, D., Méhu, J., Murat, M., Naquin, P., Perrodin, Y., Revin, P., Rousseaux, P., Véron, J., 1993. *Gestion et traitement des déchets*.
- Nelfia, L., Mahieux, P.-Y., Turcry, P., amine, Y., Amiri, O., 2013. Incorporation de fines de béton de démolition dans la fabrication de mortier par substitution du ciment, in: 31èmes Rencontres Universitaires de l'AUGC. Cachan, p. 10.
- Neville, A.M., 2000. *Properties of concrete*. Longman, Harlow, p. 844p.
- Neville, A.N., Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton, 2000. *Propriétés des bétons*. Eyrolles, Paris.
- NF EN 12 350-2, 2012. Essais pour les bétons frais : Essai d'affaissement p. 1–13.
- NF EN 12 350-6, 1999. Essais pour béton frais: masse volumique. Déc. 1999 P.10.
- NF EN 413-2, 2006. Ciment à maçonner: Partie 2 Méthodes d'essai p16.

- Nguyen, T.D., 2013. Etude de la zone d'interphase " granulats calcaires ´ poreux-pâte de ciment" : Influence des propriétés physico-mécaniques des granulats; Conséquence sur les propriétés mécaniques du mortier. (Thèse). École Nationale Supérieure des Mines, Saint-Étienne.
- Nikbin, I.M., Beygi, M.H.A., Kazemi, M.T., Amiri, J.V., Rabbanifar, S., Rahmani, E., Rahimi, S., 2014. A comprehensive investigation into the effect of water to cement ratio and powder content on mechanical properties of self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.* 57, 69 – 80. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.098>
- Osta, R., 2011. Connaissance du béton matériau, mise en oeuvre, pathologies. CATED, Elancourt.
- Padmini, A.K., Ramamurthy, K., Mathews, M.S., 2009. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 23, 829–836. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.03.006
- Parekh, D.N., Modhera, C.D., 2011. Assessment of recycled aggregate concrete. *J. Eng. Res. Stud.* E-ISSN 976, 7916.
- Pereira, P., Evangelista, L., de Brito, J., 2012a. The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.* 28, 722–729. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.050
- Pereira, P., Evangelista, L., de Brito, J., 2012b. The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cem. Concr. Compos.* 34, 1044–1052. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.06.009
- Pilon, I., Laquerre, M., 1999. Guide d'information sur le recyclage des matériaux secs.
- Poon, C.S., Kou S.C., Lam L., 2006. Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. *Mater. Struct.* 40, 981 – 988. doi:10.1617/s11527-006-9192-y
- Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L., Fok, H., Kou, S.C., 2004. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cem. Concr. Res.* 34, 31–36. doi:10.1016/S0008-8846(03)00186-8
- Potier, J.M., 2015. BETie: Béton et impacts environnementaux [WWW Document]. http://www.snbpe.org//developpement_durable/calcullette.
- Québaud, M., Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., 1998. Le comportement des bétons incluant des granulats recyclés. *Rev. Fr. Génie Civ.* 2, 969–984. doi:10.1080/12795119.1998.9692222
- Rahman, Hasrudin Hamdam, Ahmad Mujahid Ahmad Zaidi, 2009. Assessment of recycled Aggregate Concrete. *Mod. Appl. Sci.* 3, 1– 8.
- Rao, A., Jha, K.N., Misra, S., 2007. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resour. Conserv. Recycl.* 50, 71–81. doi:10.1016/j.resconrec.2006.05.010
- Rasband, S., 2014. Image J [WWW Document]. <http://imagej.nih.gov/ij/>. URL (accessed 4.20.15).
- Rodrigues, F., Carvalho, M.T., Evangelista, L., de Brito, J., 2013. Physical–chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *J. Clean. Prod.* 52, 438–445. doi:10.1016/j.jclepro.2013.02.023
- Rodrigues, F., Evangelista, L., de Brito, J., 2013. A new method to determine the density and water absorption of fine recycled aggregates. *Mater. Res.* 5, 1045–1051.
- Roux, S., 2008. Evaluation des risques de biodégradation des bétons en contact avec une eau douce naturelle (Thèse). Université Louis Pasteur, Strasbourg.

- Sagoe-Crentsil, K.K., Brown, T., Taylor, A.H., 2001. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cem. Concr. Res.* 31, 707–712. doi:10.1016/S0008-8846(00)00476-2
- Salas, A., Roesler, J.R., Lange, D., 2010. Batching Effects on Properties of Recycled Concrete Aggregates for Airfield Rigid Pavements.
- Schwartzentruber, A., Catherine, C., 2000. La méthode du mortier de béton équivalent (MBE)- Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés. *Matér. Constr.* 33, pp 475–482.
- Serres, N., Braymand, S., Feugeas, F., 2014. Evaluation environnementale de bétons de granulats recyclés de béton et de béton de granulats recyclés de terre cuite à partir d'analyses de cycle de vie, in: *Matériaux 2014*. Montpellier (France), p. 10.
- Shehata, M.H., Christidis, C., Mikhael, W., Rogers, C., Lachemi, M., 2010. Reactivity of reclaimed concrete aggregate produced from concrete affected by alkali-silica reaction. *Cem. Concr. Res.* 40, 575–582. doi:10.1016/j.cemconres.2009.08.008
- Shui, Z., Xuan, D., Wan, H., Cao, B., 2008. Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment. *Constr. Build. Mater.* 22, 1723–1729. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.05.012
- Silva, R.V., de Brito, J., Dhir, R.K., 2014. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Constr. Build. Mater.* 65, 201–217. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117
- Sri Ravindrarajah, R., Tam, C.T., 1987a. Recycling concrete as fine aggregate in concrete. *Int. J. Cem. Compos. Lightweight Concr.* 9, 235–241. doi:10.1016/0262-5075(87)90007-8
- Sri Ravindrarajah, R., Tam, C.T., 1987b. Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete. *Mag. Concr. Res.* 39.
- Tam, C.M., Tam, V.W.Y., Ng, K.M., 2012. Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong. *Constr. Build. Mater.* 26, 79–89. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.05.006
- Tam, V.W.Y., Gao, X.F., Tam, C.M., Chan, C.H., 2008. New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Constr. Build. Mater.* 22, 364–369. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.08.009
- Thomas, C., Cimentada, A., Polanco, J.A., Setién, J., Méndez, D., Rico, J., n.d. Influence of recycled aggregates containing sulphur on properties of recycled aggregate mortar and concrete. *Compos. Part B Eng.* doi:10.1016/j.compositesb.2012.05.019
- Topçu, İ.B., 1997. Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete. *Cem. Concr. Res.* 27, 1817–1823. doi:10.1016/S0008-8846(97)00190-7
- Topçu, İ.B., Şengel, S., 2004. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cem. Concr. Res.* 34, 1307–1312. doi:10.1016/j.cemconres.2003.12.019
- Torben, C.H., Hendriks, N., 1983. strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concr. Int.* 5, 79–83.
- Tošić, N., Marinković, S., Dašić, T., Stanić, M., 2015. Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use. *J. Clean. Prod.* 87, 766–776. doi:10.1016/j.jclepro.2014.10.070
- Ulsen, C., Kahn, H., Hawlitschek, G., Masini, E.A., Angulo, S.C., John, V.M., 2013. Production of recycled sand from construction and demolition waste. *Constr. Build. Mater.* 40, 1168–1173. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.004
- UNICEM, UNPG, 2013. L'industrie française des granulats.

- Vichot, A., Ollivier, J.-P., Association technique de l'industrie des liants hydrauliques (France), 2008. La Durabilité des bétons: bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement. Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, Paris.
- Voynet, D., Gayssot, J.-C., Besson, L., 2000. Circulaire du 15 février 2000 relative à la planification de la gestion des déchets de chantier du bâtiment et des travaux publics (BTP).
- Wedding, P., Rasheeduzzafar, Khan, A., 1984. Recycled Concrete—A Source for New Aggregate. *Cem. Concr. Aggreg.* 6, 17. doi:10.1520/CCA10349J
- Westerholm, mikael, 2006. rheology of the mortar phase of concrete with crushed aggregate (Thèse). univesity of technology of lulea.
- Whiting, B., McCarthy, T., Lume, E., 2012. Drying Shrinkage of concrete made from recycled concrete aggregate, in: 22nd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials. Wollongong (Australia), p. 9.
- Yaprak, H., Yilmaz aruntas, H., Demir, I., Simsek, O., Durmus, G., 2011. Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties. *Int. J. Phys. Sci.* 2455–2461.
- Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., Skoczylas, F., Wirquin, E., 2003. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Compos.* 25, 223–232. doi:10.1016/S0958-9465(02)00010-0
- Zdiri, M., 2008. Etude de formulation et de comportement mécanique des bétons compactés au rouleau (BCR): Applications routières - Cas des matériaux de gisements locaux (Thèse de Doctorat de Génie Civil). Université de Tunis EI Manar (Tunisie) et Université d'Artois (France), Tunisie et France.
- Zhang, M.H., Gjorv, O., 1990. pozzolanic reactivity of light weight aggregates. *Cem. Concr. Res.* 20, 884–890.
- Zhao, Z., 2014a. Valorisation des sables de béton recyclé pour la fabrication des mortiers (Thèse de Doctorat de Génie Civil). Ecole des mines de Douai et l'université Lille 1, Douai et Lille.
- Zhao, Z., 2014b. Valorisation des sables de béton recyclé pour la fabrication des mortiers (Thèse de Doctorat de Génie Civil). Ecole des mines de Douai et l'université Lille 1, Douai et Lille.
- Zhao, Z., Remond, S., Damidot, D., Xu, W., 2015. Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. *Constr. Build. Mater.* 81, 179–186. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.02.037
- Zhao, Z., Wang, S., Lu, L., Gong, C., 2013. Evaluation of pre-coated recycled aggregate for concrete and mortar. *Constr. Build. Mater.* 43, 191–196. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.01.032

Annexes

ANNEXE.0	Grandes familles et modes d'actions des superplastifiants	2
ANNEXE.1	Chronologie de l'évolution des normes avec leur contenu (codification/exigences/taux de substitution) se réfèrent aux granulats recyclés	6
ANNEXE.2	Tableaux de synthèses des résultats sur BGR issus de la bibliographie	13
ANNEXE.3	Caractéristiques de l'appareil photo et du logiciel de traitement d'images	39
ANNEXE.4	Synthèse des paramètres des essais d'absorption/cinétique/masse volumique.....	46
ANNEXE.5	Liste des essais réalisés pour les différentes fractions et selon un protocole normalisé ou « amélioré ».....	50
ANNEXE.6	Détermination des coefficients de courbure Cc et d'uniformité Cu.....	54
ANNEXE.7	Courbes de Gauss selon le type de granulats et la méthode de mesure employée.....	55
ANNEXE.8	Tableaux récapitulatifs des résultats de coefficients d'absorption d'eau et de masses volumiques obtenues à l'issu des différentes méthodes.....	68
ANNEXE.9	Tableaux récapitulatifs des compositions de bétons et de mortier de béton équivalent 71	
ANNEXE.10	Représentation graphique des résultats obtenus sur bétons et mortier de béton équivalent	82
ANNEXE.11	Résultats complets des Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires « FDES » des bétons	107
	Références bibliographiques.....	114

ANNEXE.0 Grandes familles et modes d'actions des superplastifiants

A.0.1 Définition et rôle

Ces superplastifiants sont utilisés soit pour leur fonction fluidifiant, soit pour leur fonction réductrice d'eau (ils sont alors appelés réducteurs d'eau ou haut réducteurs d'eau).

Dans le premier cas, une amélioration de l'ouvrabilité est recherchée à dosage en eau constant avec conservation des propriétés mécaniques.

Dans le second cas, une amélioration des propriétés mécaniques est recherchée par diminution du dosage en eau avec conservation de l'ouvrabilité (*Figure 1*).

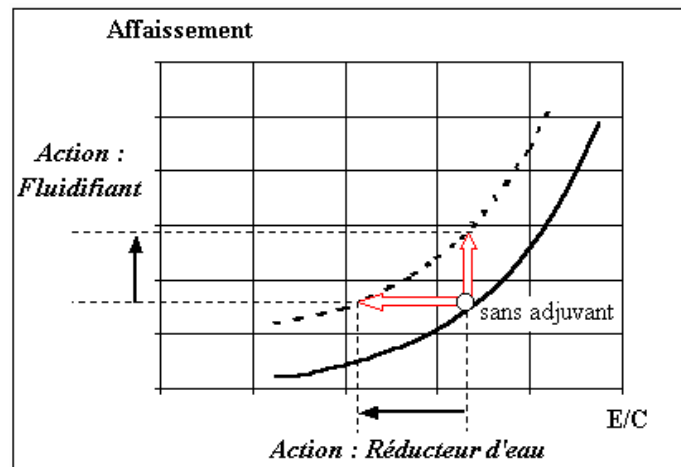


Figure 1 : Influence du fluidifiant soit sur l'ouvrabilité soit sur le rapport E/C soit sur les deux à la fois (Escadeillas, 2010)

A.0.2 Grandes familles de superplastifiants

Selon Spiratos et al (Pagé and Spiratos, 2000), les superplastifiants sont repartis en trois grands groupes

A.0.2.1 Les polymères sulfonates

Ce sont les groupes le plus utilisés dans la formulation des bétons. Ils sont constitués de deux grandes familles :

- o Les polynaphtalènes sulfonates ou polycondensats de naphtalène formaldéhyde sulfoné (PNS)

“Ces superplastifiants introduits dans le marché dans les années 60, ils sont largement utilisés à nos jours” (Spiratos, 2003). Ils sont très efficaces en termes de réduction d'eau. “Ce fut le premier type de haut réducteur d'eau synthétisé utilisé dans la formulation des bétons” (Pagé and Spiratos, 2000). Sa structure est constituée des polymères linéaires avec des groupes sulfonates en sa position^o. “Leur efficacité dépend de la nature du ciment utilisé et de nombreux problème d'incompatibilité” (Spiratos, 2003)

- o Les polycondensats de mélanine formaldéhyde sulfonée ou les polymélanines sulfonates (PMS)

Ils sont largement utilisés dans la formulation des bétons et sont apparus dans les années 70 (Spiratos, 2003). Ils présentent la même efficacité que les PNS, néanmoins, leur maintien de consistance dans le temps est meilleur comparé au PNS. Ils confèrent des meilleures résistances aux jeunes âges des bétons en retardant très peu la prise du ciment''

A.0.2.2 Les polymères carbonatés

Les polymères carbonatés peuvent être aussi des puissants dispersants. Dans les années 80, afin d'améliorer les performances des bétons à l'état frais et durci en réduisant la porosité et en augmentant leur DPU, "une nouvelle molécule à vue le jour au Japon" (Spiratos, 2003). "La plupart dérive de la combinaison des monomères acryliques et méthacryliques ou maléique" (Pagé and Spiratos, 2000). "Ce sont des copolymères peignes qui possèdent une chaîne principale anionique formée de groupe carboxyle sur laquelle est greffée les chaînes latérales d'oxyde de polyéthylène (PEO) ou de glycol de polyéthylène (PEG) ". Les chaînes latérales sont connectées à la principales au travers des liaisons ester ; amide ou éther. Le groupe carboxylique est beaucoup plus faible que le groupe sulfonique ; de ce fait l'effet dispersant est dominé par la répulsion stérique causée par le mouvement des chaînes latérales.

A.0.2.3 Les polymères synthétiques avec une fonctionnalité mixte

Toujours dans le but d'améliorer les performances des superplastifiants vis-à-vis de son influence sur les performances à l'état frais et durci des bétons, des nouveaux polymères synthétisés par réaction entre les monomères ayant des fonctions désirés. Des paramètres suivants peuvent être modifiés :

- o "La chimie de la chaîne principale (type d'acide) ;
- o La longueur de la chaîne principale (degré de polymérisation) ;
- o Le nombre de groupes anioniques (groupes carboxyliques) ;
- o Le nombre de chaînes latérales ;
- o La longueur de chaîne latérale ;
- o Le type de lien entre la chaîne principale et la chaîne latérale ;
- o La densité de la charge totale du polymère." (Spiratos, 2003)

A.0.3 Modes d'actions des superplastifiants

Les superplastifiants interviennent de deux grandes façons :

A.0.3.1 Forces électrostatiques

Lorsque le ciment est mis en contact avec de l'eau, il produit une importante quantité d'ions calcium dans la solution interstitielle. De ce fait, ils sont chargés positivement (Escadeillas, 2010). Les superplastifiants ajoutés dans la solution sont constitués de polymères anioniques. Ils vont par attraction se fixer sur la surface des grains de ciments et par la suite lui conférer des charges négatives en surfaces. Etant de même charge, les grains de ciment vont se repousser par effet électrostatique (Maximilien, 1995), (Foissy and Pierre, 1990). Selon Cyr en 1999, les forces électrostatiques des particules en suspension résultent de la présence d'ions adsorbés à leur surface. Dans un liquide, ces ions donnent lieu à la formation d'une structure en double couche, composée d'une couche compacte et d'une couche diffuse (**Figure 2**). Lorsqu'on rapproche deux particules, une force de répulsion apparaît lorsque les couches diffuses qui les entourent commencent à s'interpénétrer (CYR, 1999).

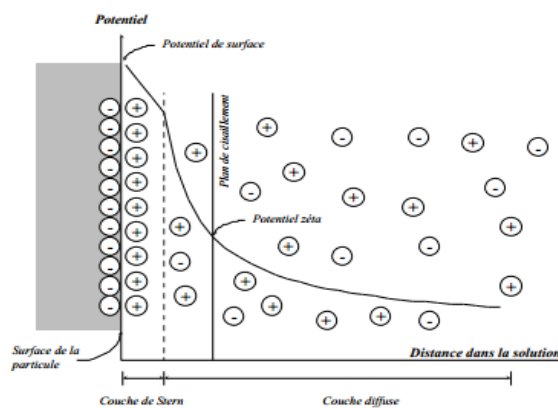


Figure 2 : Schématisation de la double couche ionique et évolution du potentiel électrostatique en fonction de la distance entre la surface de la particule et la surface interstitielle (CYR, 1999)

Comme conséquence, nous observons :

- **Diminution des forces de Van des Waals**

Par adsorption des superplastifiants sur les particules de ciment, les grains de ciment sont maintenus à des distances relativement assez éloignés. Par conséquent, on observe une diminution des forces de Van der Waals.

A.0.3.2 Encombrements stériques

Les forces stériques sont liées à l'adsorption de polymères. Le polymère adsorbé, dont une représentation simplifiée est donnée **Figure 3**, remplit l'espace autour de la particule et agit comme une barrière physique.

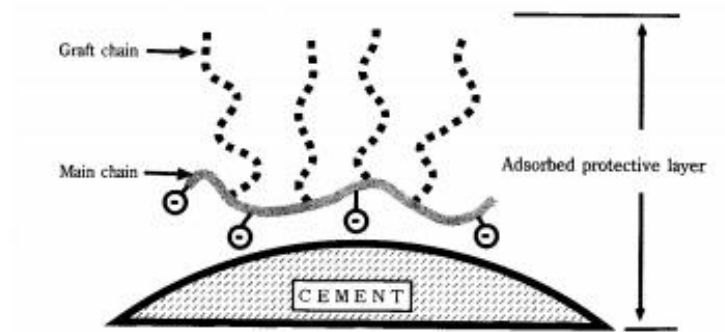


Figure 3 : Représentation schématique d'un polymère dispersant les grains de ciment par effet stérique (d'après Kinoshita et al (1997) dans Martin Cyr, 1999) (Cyr, 1999)

ANNEXE.1 Chronologie de l'évolution des normes avec leur contenu (codification/exigences/taux de substitution) se réfèrent aux granulats recyclés

A.1.1 EN 206 -1 2004(Afnor, Norme NF EN 206-1, 2004)

Extrait : « Les dispositions pour les granulats recyclés ne sont pas encore incluses dans ces normes. Jusqu'à ce que ces dispositions soient données dans des spécifications techniques européennes, il convient que l'aptitude à l'emploi soit établie selon la note du 5.1.1.soit : »

« En l'absence de norme européenne pour un constituant particulier faisant spécifiquement référence à l'utilisation de ce constituant dans du béton conforme à l'EN 206-1, ou lorsqu'une norme européenne existante ne traite pas d'un produit particulier ou lorsque le constituant diffère significativement de la norme européenne, l'aptitude à l'emploi peut être établie :

- par un agrément technique européen faisant spécifiquement référence à l'utilisation du constituant dans du béton conforme à l'EN 206-1 ;
- par des normes nationales correspondantes ou des dispositions en vigueur là où le béton est utilisé, faisant spécifiquement référence à l'utilisation du constituant dans du béton conforme à l'EN 206-1. »

A.1.2 EN 206-1 /CN décembre 2012 (Afnor, Norme NF EN 206-1/CN, 2012)

Extrait Cette norme « reproduit la norme européenne EN 206-1:2000 en incluant, après leur mise à jour, les dispositions nationales qui figuraient dans le 2ème retraitage de la norme NF EN 206-1 d'avril 2004. »

Extrait : NA.5.1.3 Granulats

« En référence à la note de 5.1.1, l'aptitude générale à l'emploi est établie en France pour les granulats conformes aux normes NF EN 12620 ou NF EN 13055-1 (pour les granulats légers) et à la norme NF P 18-545, qui les complète, sous réserve de respecter les exigences suivantes :

Les granulats recyclés doivent être conformes aux spécifications des normes NF EN 12620 et NF P 18-545, complétées par les dispositions suivantes.

Ils ne peuvent être utilisés pour la réalisation de bétons précontraints. »

A.1.2.1 Classification des GR

Extrait « Il est défini 3 types de gravillons recyclés à partir de leurs classifications et de leurs fréquences d'essais associées ((Classification Recyclé B, C ou D)):

- Type 1 : toutes les caractéristiques définies ci-après sont CRB ;
- Type 2 : toutes les caractéristiques définies ci-après sont CRB ou CRC ;
- Type 3 : toutes les caractéristiques définies ci-après sont CRB ou CRC ou CRD. »

Code	Constituants principaux catégorie NF EN 12620	Constituants secondaires				Types de fréquence d'essai ¹⁾	
		Catégories NF EN 12620				Temporelle	Quantitative
CR _B	Rcu ₉₅	Rb ₁₀₋	Ra ₁₋	XRg _{0,5}	FL _{0,2-}	2/mois	1/2000 tonnes
CR _C	Rcu ₉₀	Rb ₁₀₋	Ra ₁₋	XRg ₁₋	FL ₂₋		
CR _D	Rcu ₇₀	Rb ₃₀₋	Ra ₁₀₋	XRg ₂₋	FL ₂₋		

¹⁾ Tout lot de granulats recyclés et dont la production est inférieure aux fréquences d'essais du Tableau NA.2 doit faire l'objet d'un essai minimum de classification des constituants. La notion de lot est définie par la norme NF P 18-545.

Tableau 1 : Constituants des gravillons recyclés selon EN 206-1/CN 2012 (Afnor, Norme NF EN 206-1/CN, 2012)

Remarque :

La codification française selon la norme EN 2061/CN pour les granulats à béton (CR_x) est directement corrélée à la classification définie selon la norme NF EN 12 620 qui précise les proportions de constituants principaux et secondaires. La norme NFP 18 545 est-elle utilisée pour les granulats pour chaussées (Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction des chaussées) la codification pour ces derniers diffèrent que suit :

Code	Constituants	Catégorie NF EN 13242 (1)
a, b, c et d	Principaux	Rcu _{g70} ou Rcu _{g90} ou Ra ₈₀
	Secondaires	Rg ₂₋ ou Rg ₅₋ ou Rg _{NR} X ₁₋ FL ₅₋

(1) Pour GNT ou GTLH essentiellement.

Tableau 2 : Codification des gravillons recyclés selon NFP 18 545 pour les granulats pour chaussées (Afnor, NF P 18-545, 2011)

La classification correspondante à la désignation des constituants secondaires définie dans le tableau ci-dessus (Tableau 1 (Afnor, Norme NF EN 206-1/CN, 2012)), est établie dans la norme NF EN 12620 de 2002 (Afnor, Norme NF EN 12620, 2003), en application de la norme En 933-11 « Essais de classification des constituants de granulats recyclés ». cf tableau ci-dessous (Tableau 2)

Extrait : [A1] Classification des gravillons recyclés
« La proportion de constituants de gravillons recyclés doit être déterminée conformément au prEN 933-11 et déclarée conformément à la catégorie correspondante spécifiée dans le Tableau 2»

Constituants	Teneur Pourcentage en masse	Catégories
Rc	≥ 90	<i>Rc</i> ₉₀
	≥ 80	<i>Rc</i> ₈₀
	≥ 70	<i>Rc</i> ₇₀
	≥ 50	<i>Rc</i> ₅₀
	< 50	<i>Rc</i> _{Déclarée}
	Non requis	<i>Rc</i> _{NR}
Rc + Ru	≥ 95	<i>Rcu</i> ₉₅
	≥ 90	<i>Rcu</i> ₉₀
	≥ 70	<i>Rcu</i> ₇₀
	≥ 50	<i>Rcu</i> ₅₀
	< 50	<i>Rcu</i> _{Déclarée}
	Non requis	<i>Rcu</i> _{NR}
Rb	≤ 10	<i>Rb</i> ₁₀₋
	≤ 30	<i>Rb</i> ₃₀₋
	≤ 50	<i>Rb</i> ₅₀₋
	> 50	<i>Rb</i> _{Déclarée}
	Non requis	<i>Rb</i> _{NR}
Ra	≤ 1	<i>Ra</i> ₁₋
	≤ 5	<i>Ra</i> ₅₋
	≤ 10	<i>Ra</i> ₁₀₋
X + Rg	≤ 0,5	<i>XRg</i> _{0,5-}
	≤ 1	<i>XRg</i> ₁₋
	≤ 2	<i>XRg</i> ₂₋
	Teneur cm ³ /Kg	
FL	≤ 0,2 ^{a)}	<i>FL</i> _{0,2-}
	≤ 2	<i>FL</i> ₂₋
	≤ 5	<i>FL</i> ₅₋

a) La catégorie ≤ 0.2 est prévue seulement pour des applications spéciales exigeant une finition de surface de haute qualité.

Tableau 3 : Catégories de teneurs en constituants de gravillons recyclés

Où, selon le EN 933-11 :

Constituants	Description
Rc	Béton, produits en béton, mortier Éléments de maçonnerie en béton
Ru	Granulats non liés, Pierre naturelle Granulats traités aux liants hydrauliques
Rb	Éléments en argile cuite (Ex : briques et tuiles) Éléments en silicate de calcium Béton cellulaire non flottant
Ra	Matériaux bitumineux
FL	Matériau flottant en volume
X	Autres : Matériaux cohérents (par exemple, argile, sol) Divers : métaux (ferreux et non ferreux), Bois, matière plastique et caoutchouc non flottants Plâtre
Rg	Verre

Tableau 4 : Constituants des gravillons recyclés selon FNEN 933-11 (Afnor, Norme NF EN 933-11, 2009)

A.1.2.2 Spécifications des GR

Caractéristique	Code	Catégorie	Types de fréquence d'essai ¹⁾	
			Temporelle	Quantitative
Sulfate soluble dans l'eau	CR _B , CR _C , CR _D	SS0,2 SS0,7	1/semaine	1/1000 tonnes
Masse volumique	CR _B , CR _C , CR _D	≥ 2,0 t/m ³ ≥ 1,7 t/m ³	1/semaine	1/1000 tonnes
Influence sur le temps de début de prise	CR _B , CR _C , CR _D	A ₁₀ A ₄₀	2/mois	1/2000 tonnes
Coefficient d'aplatissement	CR _B , CR _C , CR _D	FI ₄₀	1/mois	1/4000 tonnes
Los Angelès	CR _B , CR _C , CR _D	LA ₄₀ LA ₅₀	1/2 mois	1/8000 tonnes
Chlorures solubles dans l'acide	CR _B , CR _C , CR _D	A déclarer	2/mois	1/2000 tonnes
Absorption d'eau mesurée à 24 h (WA ₂₄)	CR _B , CR _C , CR _D	A déclarer	1/semaine	1/1000 tonnes
Alcalin libérables selon la méthode LPC N° 37	CR _B , CR _C , CR _D	A déclarer	2/mois	1/2000 tonnes

1) Tout lot de granulat recyclé et dont la production est inférieure aux fréquences d'essai du Tableau NA.3 doit faire l'objet d'un contrôle minimum pour chacune des caractéristiques. La notion de lot est définie par la norme NF P 18-545.

Tableau 5 : Caractéristiques conventionnelles normalisées des gravillons recyclés selon En 206-1/CN de 2012

Extrait « Les sables recyclés doivent vérifier les caractéristiques du Tableau 6 »

Caractéristique	Catégorie	Types de fréquences d'essai ¹⁾	
		Temporelle	Quantitative
Sulfate soluble dans l'eau	SS0,7	1/semaine	1/1000 tonnes
Masse volumique	≥ 1,7 t/m ³	1/semaine	1/1000 tonnes
Influence sur le temps de début de prise	A ₄₀	2/mois	1/2000 tonnes
Chlorures solubles dans l'acide	A déclarer	2/mois	1/2000 tonnes

1) Tout lot de granulat recyclé et dont la production est inférieure aux fréquences d'essais du Tableau NA.2 doit faire l'objet d'un essai minimum de classification des constituants. La notion de lot est définie par la norme NF P 18-545.

Tableau 6 : Caractéristiques des sables recyclés »

A.1.2.3 Taux de substitution

Extrait « La substitution peut être réalisée selon les taux maximaux définis dans le Tableau 7. Le pourcentage est calculé en masse de gravillon (respectivement sable) recyclé dans le total de gravillon (respectivement sable). »

Type de granulat recyclé	Classes d'exposition			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XD1, XS1	Autres classes d'exposition
Gravillon de Type 1	60	30	20	0 ¹⁾
Gravillon de Type 2	40	15 ¹⁾	0 ¹⁾	0 ¹⁾
Gravillon de Type 3	30	5	0	0
Sable	30	0	0	0

¹⁾ Pour les bétons de chaussées, un taux de substitution de 20 % est autorisé pour les gravillons provenant de la déconstruction des couches de base et de roulement des chaussées routières ou aéroportuaires et dont la traçabilité est assurée.

Tableau 7 : Taux de substitution par type de granulat recyclé

Extrait « Les gravillons recyclés de Type 2 et 3 ainsi que les sables recyclés ne peuvent être utilisés que pour des bétons de résistances inférieures ou égales à C25/30. »

A.1.3 EN 206 2104 (Afnor, Norme NF EN 206-1, 2014)

Extrait : Annexe E.3 Recommandations pour l'utilisation de gravillons recyclés

Type de granulat recyclé	Classes d'exposition			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1	Toutes les autres classes d'exposition ^a
Type A : (<i>Rc₉₀, Rcu₉₅, Rb₁₀, Ra₁, FL₂, XRg₁</i>)	50 %	30 %	30 %	0 %
Type B ^b : (<i>Rc₅₀, Rcu₇₀, Rb₃₀, Ra₅, FL₂, XRg₂</i>)	50 %	20 %	0 %	0 %

^a Les granulats recyclés de type A d'origine connue peuvent être utilisés avec les classes d'exposition pour lesquelles le béton d'origine a été formulé, avec un pourcentage de remplacement maximal de 30 %.

^b Il convient de ne pas utiliser les granulats recyclés de type B dans des bétons dont les classes de résistance à la compression sont supérieures à C30/37.

Pourcentage maximal de remplacement des gravillons (% en masse)

Propriété ^a	Paragraphe de l'EN 12620:2002+A.1:2008	Type	Catégorie selon l'EN 12620
Teneur en fines	4.6	A + B	Catégorie ou valeur à déclarer
Coefficient d'aplatissement	4.4	A + B	$\leq FI_{50}$ ou $\leq SI_{55}$
Résistance à la fragmentation	5.2	A + B	$\leq LA_{50}$ ou $\leq SZ_{32}$
Masse volumique après séchage à l'étuve ρ_{rd}	5.5	A	$\geq 2\ 100\ \text{kg/m}^3$
		B	$\geq 1\ 700\ \text{kg/m}^3$
Coefficient d'absorption d'eau	5.5	A + B	Valeur à déclarer
Constituants ^b	5.8	A	$Rc_{90}, Rcu_{95}, Rb_{10}, Ra_{1}, FL_{2}, XRG_{1}$
		B	$Rc_{50}, Rcu_{70}, Rb_{30}, Ra_{5}, FL_{2}, XRG_{2}$
Teneur en sulfates solubles dans l'eau	6.3.3	A + B	$SS_{0,2}$
Teneur en ions chlorure solubles dans l'acide	6.2	A + B	Valeur à déclarer
Incidence sur le temps de début de prise	6.4.1	A + B	$\leq A_{40}$
^a La catégorie NR (non requis) s'applique à toutes les autres propriétés non indiquées dans ce tableau, pour lesquelles une catégorie NR peut être déclarée selon l'EN 12620. ^b Pour les applications spéciales nécessitant un fini de surface de haute qualité, il convient que le constituant FL soit limité à la catégorie $FL_{0,2}$.			

Recommandations relatives aux gravillons recyclés selon l'EN 12620

ANNEXE.2 Tableaux de synthèses des résultats sur BGR issus de la bibliographie

Tableau 1 : Constituants des gravillons recyclés selon EN 206-1/CN 2012 (Afnor, Norme NF EN 206-1/CN, 2012).....	7
Tableau 2 : Codification des gravillons recyclés selon NFP 18 545 pour les granulats pour chaussées (Afnor, NF P 18-545, 2011).....	7
Tableau 3 : Catégories de teneurs en constituants de gravillons recyclés.....	8
Tableau 4 : Constituants des gravillons recyclés selon FNEN 933-11 (Afnor, Norme NF EN 933-11, 2009).....	9
Tableau 5 : Caractéristiques conventionnelles normalisées des gravillons recyclés selon En 206-1/CN de 2012.....	10
Tableau 6 : Caractéristiques des sables recyclés ».....	10
Tableau 7 : Taux de substitution par type de granulat recyclé.....	11
Tableau 8: Estimation des teneurs en mortiers	16
Tableau 9 : Synthèse des résultats des masses volumiques et coefficients d'absorption des granulats recyclés et naturels.....	19
Tableau 10: Récapitulatif normatif des taux de substitution de granulats recyclés dans un béton (Charonnat, 2011).....	20
Tableau 11: Exemples de proportions de granulats recyclés dans les bétons (Dao : tableaux 1-13 (Dao, 2012)) (Zhao : sous-titre 1.5.1 (Zhao, 2014)).....	22
Tableau 12 : Essais d'affaissements sur des bétons dosés au kg/m³ dont les granulats ont été pré saturés (Dao, 2012) (Zhao (Zhao, 2014)).....	24
Tableau 13 : Valeurs d'affaissements immédiate sur des bétons dont les gravillons /graviers recyclés ont été pré saturés avec leur eau d'absorption pendant 24 h (Butler et al., 2011).....	26
Tableau 14 : Masses volumiques obtenues sur des bétons (Brito and Saikia, 2013)	26
Tableau 15 : Synthèse des valeurs de retrait des bétons de granulats recyclés et de bétons de granulats naturels.....	29
Tableau 16 : Synthèse des valeurs de masses volumiques des bétons de granulats recyclés à l'état frais et durcis.....	32
Tableau 17 : Teneurs en air obtenues sur des bétons (Brito and Saikia, 2013) ; (Dao, 2012).....	33
Tableau 18 : Synthèse des valeurs de résistances mécaniques des bétons de granulats recyclés (Zhao tableau1-21) (Zhao, 2014).....	34
Tableau 19 : Composition des mortiers réalisés par Zhao (Zhao, 2014).....	38
Tableau 20 : Affaissements des mortiers obtenus par Zhao (Zhao, 2014).....	38
Tableau 21 : Résistances mécaniques des mortiers obtenus par Zhao (Zhao, 2014) ..	38
Tableau 22: Composition théorique de bétons de granulats recyclés formulé avec un squelette granulaire superposé sur celui du granulat naturel	78

Tableau 23: Composition théorique de bétons de granulats recyclés formulés non fité avec une compacité à 0,8	78
Tableau 24: Composition théorique de bétons de granulats recyclés formulés non fité avec une compacité à 0,75	79
Tableau 25 : Composition de MBE de granulats naturel sans adjuvant, E/C=0,65 ...	79
Tableau 26 : Composition de MBE de granulats recyclés sans adjuvant, E/C=0,65 ..	79
Tableau 27 : Composition théorique de BGR pour 1 m³ avec une compacité de 0,880	
Tableau 28 : Composition théorique de BGR pour 1 m³ avec une compacité de 0,75	80
Tableau 29: Composition théorique de béton de granulats recyclés formulé avec du sable recyclé substitué par du sable naturel concassé	80
Tableau 30: Composition théorique de béton de granulats recyclés formulé avec du sable recyclé substitué par du sable naturel roulé	80
Tableau 31: Composition théorique de béton de granulats recyclés sur lequel les éléments inférieurs à 63µm ont été enlevés	81
Tableau 32: Composition théorique de béton de granulats recyclés formulé en modifiant les objectifs du béton pour 1 m³	81
Tableau 33: Composition théorique de béton de granulats naturels concassés formulé en modifiant les objectifs du béton pour 1 m³	81
Tableau 34 : Résistances mécaniques obtenues sur les mortiers 0/2 mm	106
Tableau 35 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGNC 4	107
Tableau 36 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGNC 5	107
Tableau 37 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGNC 7	108
Tableau 38 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGNC 17	108
Tableau 39 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGNR 4	109
Tableau 40 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGNR 5	109
Tableau 41 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGNR 7	110
Tableau 42 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGNR 17	110
Tableau 43 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGR 4	111
Tableau 44 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGR 5	111

Tableau 45 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGR 7	112
Tableau 46 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGR 17	112

A.2.1 Propriétés des GRB

Tableau 8: Estimation des teneurs en mortiers

Particularité du granulat	sable		gravillon		gravier		Méthode employée	Auteurs	
	Valeurs [%]	fractions analysées [mm]	Valeurs [%]	fractions analysées [mm]	Valeurs [%]	fractions analysées [mm]			
-	-	-	50	4/8				(Sri Ravindrarajah and Tam, 1985)	
			60	4/8	40	8/16		Hansen(International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, 1992)	
			44 ± 11	4/8	44 ± 10,5	8/16	Méthode par NA ₂ SO ₄	(Marta Sanchez de Juan and Pilar Aloejos Gutiérrez, 2004)	
			26 et 22	4,75/9,5 et 9,5/12,7	21	12,7/19		Méthode d'analyse d'image	(Abbas et al., 2009)
			30 et 21		21				
			35,2 pour L-g 16,7 pour M-g 7,3 pour H-g	5/10	40,2 pour L-g 26,0 pour M-g 9,9 pour H-g	10/20	Méthode par acide chlorhydrique	(% v/v)Yagishita et al dans (International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry et al., 1994)	
			-	-	52,3 à 55 pour le niveau 1 30,2 à 32,4 pour le niveau 3	5/20	Méthode par acide chlorhydrique	(Nagataki et al., 2004)	
GR (E/C =0,4)		58	4/8	38	8/16	Inconnu	(Torben and Hendriks, 1983)		
GR		21,8		18,5					
GR (E/C =0,7)		27,3		25,6					
GR (E/C =1,2)		28,2		29,6					

-	33 à 55. 43,33 ± 5,53	0/4			23 à 44. 33,86 ± 7,03	8/16	Méthode thermique	(de Juan and Gutiérrez, 2009)
					23 (MA) 34,2 (OV)	4/20	Inconnu	(López-Gayarre et al., 2009)
			≈ 40	4/10	20	10/25	Inconnu	(Etxeberria et al., 2007)
98,2 % de GR et 1,8% d'impuretés			14,30	5/10	24,30	10/20	Méthode par acide chlorhydrique	(Zhen Hua Duan and Chi Sun Poon, 2014)
96,05 % de GR et 3,95% d'impuretés		37,20	34					
99 % de GR et 1% d'impuretés		63,80	61,10					
			-	-	47,10 ± 9,62	-		(Gokce et al., 2004)
					50,67 ± 4,11		Méthode thermique	(Butler et al., 2013)
-			40	8/16	25-35	16/32	Mesure indirecte	(Hansen, 1986)
			58-64	4/8	30			(Topçu and Şengel, 2004)
			60					
	3,40	2,5/5	4,50	5/10	5,70	10/20	Méthode par acide chlorhydrique	(Seo and Choi, 2014)
Sur un ensemble de 6 GR différents	36,5 ± 6,99	0/4	24 ± 7,28	6/11	25,33 ± 5,56	11/20	détermination à partir de la porosité accessible à l'eau	(Dao, 2012)
	33,5 ± 5,44		25,33 ± 6,26		26,83 ± 6,12		mesures d'absorption et de masse volumique	(Dao, 2012)
Valeurs Moyennes/ Ecart type	29,18 / 15,31		35,87 / 18,42		31,55 / 12,29		-	-

- L-g correspond à la valeur obtenue sur les granulats recyclés broyés en utilisant un concasseur à percussion
- M-g correspond à la valeur obtenue sur les granulats L-G en utilisant un rouleau broyeur
- H-g correspond à la valeur obtenue sur les granulats M-g en utilisant un rouleau broyeur

Tableau 9 : Synthèse des résultats des masses volumiques et coefficients d'absorption des granulats recyclés et naturels

Type de matériau	Paramètres étudiés	Sable		Gravillon		Gravier		Auteurs
		Valeurs	fractions analysées	Valeurs	fractions analysées	Valeurs	fractions analysées	
GN	WA ₂₄	0,993	-	1,546	6/12	1,245	-	(Barbudo et al., 2013)
	<i>prd</i>	2,553		2,789		2,581		
GR	WA ₂₄	8,160	0/5	6,806	5/12	5,828	12/20	(Gómez-Soberón, 2002)
	<i>prd</i>	2,170		2,260		2,280		
GN	WA ₂₄	1,49		1,134		0,876		
	<i>prd</i>	2,570		2,640		2,570		
GR	WA ₂₄	-	-	4,445	4/10	0,886	10/25	(Etxeberria et al., 2007)
	WA ₂₄			8,58 ± 1,73	4/8	5,793 ± 1,18	8/16	(de Juan and Gutiérrez, 2009)
	<i>prd</i>			1,993 ± 0,56	4/8	2,117 ± 0,58	8/16	
	WA ₂₄	12,0 ± 1,5	0/6	-	-	6,0 ± 0,5	6/20	(Buyle-Bodin, F and Hadjieva-Zaharieva, 2002)
<i>prd</i>	2160 ± 300	2250 ± 400						
GN	WA ₂₄	2,0				0,2		
	<i>prd</i>	2600				2680 ± 800		
GR	WA ₂₄	10,9	0/4	-	-	-	-	(Pereira et al., 2012)
	<i>prd</i>	2,01						
GN	WA ₂₄	0,63						
	<i>prd</i>	2,62						
GR	WA ₂₄	4,28	0,074	-	-	-	-	(Yaprak et al., 2011)
GN	WA ₂₄	1,22	/4,76	0,26	4,76/19,1	-	-	
GN siliceux	WA ₂₄	0,2	0/4	0,7	4/10	0,5	10/20	(Dao, 2012)
	<i>prd</i>	2,63		2,59		2,59		
	<i>pssd</i>	2,64		2,60		2,61		
	<i>pa</i>	2,65		2,63		2,63		
GN Calcaire	WA ₂₄	3,1		3,5		-		
	<i>prd</i>	2,49		2,45		-		
	<i>pssd</i>	2,57		2,53		-		
	<i>pa</i>	2,7		2,68		-		
GR	WA ₂₄	8,39 ± 2,45	0/6	7,23 ± 2,91	6/11	7,57 ± 1,65	11/22	
	<i>prd</i>	2,14 ± 0,11		2,20 ± 0,11		2,18 ± 0,03		
	<i>pssd</i>	2,32 ± 0,06		2,36 ± 0,09		2,35 ± 0,09		
	<i>pa</i>	2,63 ± 0,03		2,61 ± 0,03		2,61 ± 0,01		
GN	WA ₂₄	1,49	0/5	1,134	5/12	0,876	12/20	(Gómez-Soberón, 2002)
	<i>prd</i>	2,57		2,64		2,57		
	<i>pssd</i>	2,60		2,67		2,59		
GR	WA ₂₄	8,16		6,81		5,83		
	<i>prd</i>	2,17		2,26		2,28		
	<i>pssd</i>	2,35		2,42		2,41		
GN	WA ₂₄	-	-	1,25	< 10	1,24	< 20	(Poon et al., 2004) dans Zhao (Zhao, 2014)
	<i>prd</i>			2,62		2,62		
GR	WA ₂₄	-	-	7,56		6,28		
	<i>prd</i>			2,33		2,37		
GR	WA ₂₄	9,42	0/0,63	-	-	-	-	(Zhao, 2014)

		9,37	0,63/ 1,25					
		7,79	1,25/ 2,5					
		7,12	2,5/5					
GR (E/C =0,4)	WA ₂₄	-	-	8,5	4/8	5,0	8/16	(Hansen, 1986) Méthode British Standard BS 812 :110
	prd			2,34		2,45		
GN (E/C =0,4)	WA ₂₄	-	-	3,7	4/8	1,8	8/16	
	pssd			2,5		2,62		
GR (E/C =0,7)	WA ₂₄	9,8	0/5	8,7	4/8	5,4	8/16	
	pssd			2,35		2,44		
GR (E/C =1,2)	WA ₂₄	-	-	8,7	4/8	5,7	8/16	
	pssd			2,32		2,42		
Synthèse	GN	WA ₂₄	1,32 ± 0,90	1,65 ± 1,18		0,92 ± 0,47		
		prd	2,57 ± 0,04	2,58 ± 0,13		2,58 ± 0,06		
		pssd	2,60 ± 0,03	2,57 ± 0,06		2,61 ± 0,01		
		pa	2,67 ± 0,02	2,65 ± 0,02		2,63		
	GR	WA ₂₄	8,67 ± 1,94	7,48 ± 1,31		5,33 ± 1,70		
		prd	2,13 ± 0,06	2,21 ± 0,11		2,25 ± 0,08		
		pssd	2,33 ± 0,01	2,36 ± 0,04		2,40 ± 0,03		
		pa	2,63 1 essai	2,36		2,40		

- WA₂₄ représente le coefficient d'absorption d'eau mesurée après 24 heures d'immersion exprimée en %
- prd représente la masse volumique réelle après séchage à l'étuve exprimée en g/cm³
- pssd représente la masse volumique réelle saturée à surface sèche exprimée en g/cm³
- pa représente la masse volumique absolue exprimée en g/cm³
- fractions analysées en [mm]

A.2.2 Taux de substitution des GR

Tableau 10: Récapitulatif normatif des taux de substitution de granulats recyclés dans un béton (Charonnat, 2011)

Pays	Référence	Type de granulats recyclés	Taux de substitution max	Environnement	Résistances des bétons	Autres
France	NF EN 206-1	type 1 : Au moins 95% de béton ou granulats non liés	60	X0	< C25/30	< C25/30
			30	XC1, XC2		
			20	XC3, XC4, XF1, XD1, XS1		
		type 2 : Au moins 90% de béton ou granulats non liés	40	X0		
			15	XC1, XC2		
			0	XC3, XC4, XF1, XD1, XS1		
		type 3 : Au moins 70% de béton ou granulats non liés	30	X0		
			5	XC1, XC2		
			0	XC3, XC4,		

				XF1, XD1, XS1		
		Sable	30	X0		
			0	XC1, XC2		
			0	XC3, XC4, XF1, XD1, XS1		
Allemagne	DIN 1045-2	Type 1 : béton pur	45 %	X0, XC	Néant Pas autorisé pour béton précontraint	Pas de granulat en dessous de 2 mm
			35 %	XF1, XF3		
			25 %	XA1		
		Type 2 : maçonnerie	35 %	X0, XC		
			25 %	XF1, XF3		
		25 %	XA1			
Hollande	NEN 8005	Béton pur	20 %			
		Maçonnerie	10 %			
	CUR Recommandation 112	Béton pur (gravillons seulement)	< 50 %	C12/15 à C53/65	Toute classe	
50 à 100 %			≤ C20/25 > C20/25	Sauf XD et XS	Calculs d'élasticité, fluage et retrait à corriger	
Danemark	DS 2426	Béton concassé et maçonnerie	30 % de sable 100% de gravillon		X0 et XC1	
	DS/EN 1992 1-1	Béton de structure uniquement	10 % de sable 20 % de gravillon	> C30/37	X0 et XC1	
Italie	NTC : DM 14 Janvier 2008	Maçonnerie de démolition	100 %	C8/10		Renforcement des contrôles 1/100t et par jour de production
		Béton de démolition	30 % 60 %	C30/37 C20/25		
		Utilisation interne. Béton de préfabrication de classe supérieure à C45/55	15 %	C45/55		
Suède	BÅ 99 SS 137003	RA1 : 100 % béton et roche			XC1, XC2, XF1	Uniquement gravillon
		RA 2 : > 80% béton et roche			X0, XC1, XC2	
Norvège	NB 26	Type I : 99% béton et roches	5 % sable 10 % gravillons	C20/25		
		Type II : 95% béton, roches et briques	10 % sable 30 % gravillon	C20/25		
			20 % gravillon	C45/55		
Royaume uni	BS 8500-1 BS 8500-2	RCA = béton pur RA=mélange	20 % gravillon	RC20/25 à RC40/50		Uniquement gravillon

Suisse	Cahier Technique 2030	RC-C : béton RC-M mélange				
--------	--------------------------	------------------------------	--	--	--	--

Tableau 11: Exemples de proportions de granulats recyclés dans les bétons (Dao : tableaux 1-13 (Dao, 2012))
(Zhao : sous-titre 1.5.1 (Zhao, 2014))

Références	Graviers recyclés [%]	Gravillons recyclés [%]	Sable recyclé [%]	E/C		Dosage en ciment [kg/m ³]	Adjuvant - addition [kg/m ³] ou (%)
(Bernier, 1983)	100	100	100	-	'	-	-
	100	100	0	-	'	-	-
(El Dalati, 2007)	20	20	0	-	'	-	-
	30	30	0	-	'	-	-
(Ann et al., 2008)	100	100	100				30% de PFA 65 % de LHF
(García-González et al., 2014)	0	0	0	0,5	Eeff/c	390,9	-
	50	50	0				
	80	80	0				
	100	100	0				
(International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, 1992)	100	100	100	-	'	-	-
	100	100	0	-	'	-	-
(Sri Ravindrarajah and Tam, 1987a)			100	0,55	Eeff/c	382	-
			0			386	-
			100	0,45		382	83 (CV)
			0			386	87 (CV)
(Evangelista and de Brito, 2007)			0	0,41	Eeff/c	380	4,9 (Adj)
			10	0,42			
			20	0,43			
			30	0,44			
			50	0,45			
			100	0,45			
(Braymand, 2012), (Braymand, 2010), (S Braymand et al., 2012), (Braymand et al., 2015)	100	100	100	0,5	Etot/C	350	10,5 (Adj)
			0	0,47			2,625 (Adj)
		0	0,55	450		0	
	100	100	0,5			1%(Adj)	
		0	0			0	
		0	100	0,30		0,4 (S/C)	-
(González-Fonteboa and Martínez-Abella, 2008)	0	0	0	0,55	Eeff/c	325	0
						8 (FS/C)	
	50	50	0			345	0
						8 (FS/C)	
(Zhao, 2014)	-	0	100	0,5 à 0,82		CEM I 52,5 N 450	-

(Sagoe-Crentsil et al., 2001)	0	0	0	0,76	Etot/C	242	0	
	100	100	100	0,73		240		
				0,74		238		
				0,70		254		
(Khatib, 2005)				0		325	0	
				25		322		
				50		320		
				75		317		
				100		315		
(Kou and Poon, 2009)				0		340	8,5 (Adj)	
				25				
				50				
				75				
(Poon et al., 2004)	0	0	0	0,57		353	0	
	20	20						
	50	50						
	100	100						
(Dao, 2012)	100	100	100	0,27 à 0,7	271 à 888	0,52 à 18,26 (Adj)		
(Buyle-Bodin,F and Hadjieva-Zaharieva, 2002)	0	0	0	0,48	Etot/C	400	-	
	100	100	100	0,43			4 (Adj)	
				0				0,50
				100				0,65
				100				0,66
(Québaud et al., 1998)	0	-	0	0,61		350	1,54 (Adj)	
				0,56			-	
				0,69			-	
	100	-	100	0,71		400	-	
				0,48				
				0,59	1,76 (Adj)			
				0,65	4 (poids brut)			
(Yang et al., 2011)	0	0	0	0,47	Eeff/C	435	-	
	100	100	100					
(Sani et al., 2005)	100	100	100	-	-	-	-	
(De Juan and Gutiérrez, 2004)	20	20	0	0,4	Eeff/C	400	Superplastifiants	
	50	50		0,45		350		
				0,5		320		
				0,55		300		
100	100	0,6	300					
(Katz, 2003)	100 (x3)	100 (x3)	0	0,55		298 (1)	-	
	0	0				300 (2)		
						298 (3)		
(Vieira et al., 2011)	100	100	0	0,49		445,474	-	
	20	20						
	50	50						
	100	100						

- CV : cendres volantes
- LHF : laitiers de hauts fourneaux
- FS : fumées de silice

A.2.3 Propriétés des BGR

Tableau 12 : Essais d'affaissements sur des bétons dosés au kg/m³ dont les granulats ont été pré saturés (Dao, 2012) (Zhao (Zhao, 2014))

Référence	Granulats			Ciment [kg/m ³]	Adjuvants ou addition	Eau		Eeff/C	Affaissement [mm]	Méthode de pré saturation		
	Type	Quantité [kg]	Frac-tions									
(Sagoe-Crentsil et al., 2001)	GN	-	0,15/19	242	Ligno-sulfonates	-	NC	0,76	90	-		
	GR	-	0,15/19	240				0,73	75	Pré saturés pendant 10 min avant emploi		
				238				0,74	95			
				254				0,70	80			
(Yang et al., 2011)	GN	1037,5	2,36/20	435	-	204,45	NC	0,47	33	Préhumidifié avant emploi		
	GR (100%)	662,5	0,15/5						24			
	GB (20%) GR (80%)	-	-						20			
	GB (50%) GR (50%)	-	-						10			
(Etxeberria et al., 2007)	GN	765,1	0/5	300	-	Addition : 0,97%	165	Eau efficace	0,55	80-100	Humidifiés par aspersion et recouvert pendant 24 heures avant emploi	
		332,7	4/10									
		295,1	10/16									
		579,2	16/25									
	GR	683,2	0/5	325	-	Addition : 1,38	162	Eau efficace	0,5	80-100		
		425,8	4/10									
		306,4	10/16									
	391,2	16/25										
(González-Fonteboa et al., 2011)	GN	-	-	-	-	-	-	-	0,65	120	Préhumidifié dans de l'eau pendant 10 min avant emploi	
	GR (20%)								0,66	110		
	GR (50%)								0,67	110		
	GR (100%)								0,68	110		
(Poon et al., 2004)	GN (100%)	666	sable	353	0	-	-	Eau de gâchage	0,57	100	Gravillons et graviers saturés surface sèche	
		364	10									
		729	20									
	GN (80%) + GR (20%)	661	Sable							206		105
		288	10 GN									
		576	20 GN									
		72	10 GR									
	GN (50%) + GR (50%)	144	20 GR							207		110
		649	Sable									
		177	10 GN									
		354	20 GN									
	GR (100%)	177	10 GR							209		100
		177	20 GR									
625		Sable										
342		10										
	684	20										
(Padmini et al., 2009)	SN +gravillons et	1 :1,9 :3,1	10	CPA 45	-	-	-	0,58	75	GR présaturés pendant 10		
		1 :2,0 :4,1	20									

	graviers recyclés	1 :1,8 :2,9	10						95	min avec leur eau d'absorption	
		1 :1,0 :2,2	20								
(Buyle-Bodin,F and Hadjieva-Zaharieva, 2002)	GR	878	Gravillons Recyclés	400	4	260	Eau totale	0,65	50	GR préhumidifiés avec E'	
		629	SR								
		846	Gravillons Recyclés			262		0,66	90		
		659	SR								
(Zhao, 2014)	SR	0	0/5	450	0	225	0,5		27	SR présaturés avec leur eau d'absorption Pendant 24 h	
	SN	1350							17		
	SR	129,1							19		
	SN	1215,0							29		
	SR	258,2							8		
	SN	1080,0							5		
	SR	387,3									
	SN	944,9									
	SR	645,6									
	SN	675,0									
	SR	1291,1									
	SN	0									
(Meffteh et al., 2013) ; (Mefftah and Arabi, 2011)	0% de grR et GrR	585,67	0/5	350	-	189	Eau efficace	0,54	90	Pré mouillés	GR présaturés avec leur eau d'absorption Pendant 24 h
		256,10	5/10						90	Saturés	
		955,34	10/20								
	20% de grR et GrR	585,67	0/5						90	Pré mouillés	
		204,88	5/10 GR								
		764,27	10/20 GR						150	Saturés	
		43,90	5/10 GN								
		148,94	10/20 GN								
	40% de grR et GrR	585,67	0/5						120	Pré mouillés	
		153,66	5/10 GR								
		573,20	10/20 GR								
		87,81	5/10 GN						160	Saturés	
		297,88	10/20 GN								
	60% de grR et GrR	585,67	0/5						100	Pré mouillés	
		102,44	5/10 GR								
		382,14	10/20								

	(100%)																					
(Gómez-Soberón, 2002)	GN	304	12/20	400	-	207,6	0,52	Eau efficace	Eeff/C	2,130												
		710	5/12																			
		662	0/5																			
	GR (100%)	497	10/20																			
		406	5/10																			
SN	662	0/5																				
(Etxeberria et al., 2007)	GN	765,1	0/4	300	Addition : 0,97%	165	0,55	Eau efficace	Eeff/C	2,420												
		332,7	4/10																			
		295,1	10/16																			
		579,2	16/25																			
	GR (grossier 25%)	765,1	0/4 GN	300	Addition : 0,79	165	0,55	Eau efficace	Eeff/C	2,400												
		249,5	4/10 GN																			
		72,8	4/10 GR																			
		221,3	10/16 GN																			
		64,6	10/16 GR																			
		4343,4	16/25 GN																			
		128,3	16/25 GR																			
	GR (grossier 50%)	739,0	0/5	318	Addition : 0,84	165	0,52	Eau efficace	Eeff/C	2,390												
		172,1	4/10 GN																			
		150,6	4/10 GR																			
		147,4	10/16 GN																			
		129,2	10/16 GR																			
		289,4	16/25 GN																			
	256,6	16/25 GR																				
	GR (grossier 100%)	683,2	0/4	325	Addition 1,38	162	0,50	Eau efficace	Eeff/C	2,340												
		425,8	4/10																			
		306,4	10/16																			
		391,2	16/25																			
	(González-Fonteboa et al., 2011)	GN	-	-	-	-	-	-	-	-	2,340 et 2,360											
GR (grossier 20%)		-	-	-	-	-	-	-	-	2,320 et 2,330												
GR (grossier 50%)		-	-	-	-	-	-	-	-	2,300 et 2,310												
GR (grossier 100%)		-	-	-	-	-	-	-	-	2,270												
(Katz, 2003)	GN (ciment Portland)	215	SNC	298	-	163	0,55	Eau efficace	Eeff/C	2,463												
		454	2,36/9,5																			
		907	9,5/25																			
		427	SNR																			
	GR (ciment Portland)	259	SNR	298	-	166	0,55	Eau efficace	Eeff/C	2,175												
		1453	Gravillons Recyclés																			
		217	SNR	300							-	168	0,55	Eau efficace	Eeff/C	2,145						
		1460	Gravillons Recyclés																			
		240	SNR	298													-	163	0,55	Eau efficace	Eeff/C	2,156
		1456	Gravillons Recyclés																			
GN (Ciment)	212	SNC	294	-	161	0,55	Eau efficace	Eeff/C	2462													
	421	SNR																				

	Blanc)	448	2,36/9,5																									
		896	9,5/25																									
	GR (Ciment Blanc)	254	SNR	293							2146																	
		1440	Gravillons Recyclés																									
		219	SNR	302						2170																		
		1484	Gravillons Recyclés																									
		238	SNR																									
1457	Gravillons Recyclés	296							2153																			
(Buyle- Bodin,F and Hadjieva- Zaharieva, 2002)	GN	1219	Gravillons naturels	400	-	4		190	0,48			2360																
		523	SN																									
		1140	Gravillons naturels																									
		685	SN																									
	GN et GR	824	Gravillons Recyclés										2220															
		787	SN																									
	GR	878	Gravillons Recyclés	400	4				260	0,65			2210															
		629	SR																									
		846	Gravillons Recyclés																									
		659	SR																									
		865	Gravillons Recyclés																									
		675	SR																									
	GN	914	GN	327					209	0,63 9			2386															
		901	SN																									
GR (grossier 50%)		860	GR	310													197	0,63 5			2,301							
		564	GN																									
		370	SN																									
GR (grossier 100%)		1764	GR	289																					184	0,63 7		
	GR	836	11/22	271	0,67				169,0 93	0,62																		
189		6/11																										
825		0/6																										
(Vieira et al., 2011)	GN	103,712	4/5,6	445,47 4												191,5 54	0,43			2413,5 ± 16,1								
		117,832	5,6/8																									
		119,133	8/11,2																									
		236,807	11,2/16																									
		407,993	16/25,4																									
		185,306	SFN																									
		478,666	SGN																									
		82,929	4/5,6 GN																									
	Gravillon s/gravier s recyclés (20%)	94,266	5,6/8 GN						196,5 15	0,44				2392,2 ± 10,9														
		95,307	8/11,2 GN																									
		189,445	11,2/16 GN																									
		326,394	16/25,4 GN																									
		19,147	4/5,6 GR																									
		21,754	5,6/8 GR																									
		21,994	8/11,2 GR																									
		43,718	11,2/16																									

			GR					
		75,322	16/25,4 GR					
		185,306	SFN					
		478,666	SGN					
	Gravillon s/gravier s recyclés (50%)	51,856	4/5,6 GN	445,47 4	-	203,9 57	0,46	2355,0 ± 5,9
		58,916	5,6/8 GN					
		59,567	8/11,2 GN					
		118,403	11,2/16 GN					
		203,996	16/25,4 GN					
		47,867	4/5,6 GR					
		54,384	5,6/8 GR					
		54,985	8/11,2 GR					
		109,295	11,2/16 GR					
		188,304	16/25,4 GR					
		185,306	SFN					
		478,666	SGN					
		GR	95,734					
	108,768		5,6/8					
	109,969		8/11,2					
	218,591		11,2/16					
	376,609		16/25,4					
	185,306		SFN					
	478,666		SGN					

- GN : granulats naturels
- GR : granulats recyclés
- SNR : sable naturel roulé
- SNC : sable naturel concassé
- SFN : sable fin naturel
- SGN : sable grossier naturel

Tableau 15 : Synthèse des valeurs de retrait des bétons de granulats recyclés et de bétons de granulats naturels

[Référence]	Composition	retrait	
		Valeurs	Echéances de mesures et remarques
(Sri Ravindrarajah and Tam, 1987b)	BGN (E/C= 0,55 sans CV)	(230 ; 205 ; 240) microstrain	(7 ; 28 ; 42 jours)
	BGR (GrN, grN et SR) (E/C= 0,55 sans CV)	(295 ; 295 ; 325) microstrain	
	BGN (E/C= 0,45 avec CV)	(290 ; 270 ; 200) microstrain	
	BGR (GrN, grN et SR) (E/C= 0,45 avec CV)	(385 ; 345 ; 225) microstrain	
(Tomasawa, 1975) dans Nixon (Nixon, 1978)	BGN E/C = 60%	(0,2 ; 1,2 ; 2,4 ; 4,2 ; 5,8 ; 6,9) x 10 ⁻⁴	(1 ; 3 ; 7 ; 14 ; 28 ; 56 et 90 jours)
	BGR (GrR, grR et SN) E/C = 60%	(0,3 ; 1 ; 2 ; 3,4 ; 6 ; 8,5 ; 10) x 10 ⁻⁴	
	BGR E/C = 60%	(0,1 ; 0,5 ; 1 ; 2,3 ; 4,5 ; 7,5 ; 9,5) x 10 ⁻⁴	

(Hasaba et al., 1981) dans Hansen (Hansen, 1986)	Quantité de ciment 300 kg/m ²	BGN		(0,5 ; 1,1 ; 1,6 ; 4 ; 4,2) $\times 10^{-4}$	(7 ; 14 ; 28 ; 56 et 84 jrs) Retrait des BGR (GrR, grR et SN) est 50% supérieur à celui des BGN Retrait des BGR (GrR, grR et SR) est 70-80% supérieur à celui des BGN
		BGR (GrR, grR et SN)		(0,5 ; 1,8 ; 2,5 ; 5,1 ; 6,4) $\times 10^{-4}$	
		BGR (GrR, grR et SR)		(0,5 ; 2,1 ; 3 ; 6,2 ; 7,3) $\times 10^{-4}$	
(Coquillat, 1982) dans Hansen (Hansen, 1986)	-		-	Retrait des BGR (GrR, grR et SR) est 73% supérieur à celui des BGN	-
Wesche et Schulz dans Hansen (Hansen, 1986)	-		-	Retrait des BGR (GrR, grR et SN) est 40% supérieur à celui des BGN	Le retrait augmente avec la quantité de mortier primaire
(Zagurskij and Zhadanovskij, 1985) dans Hansen (Hansen, 1986)	-		-	Retrait des BGR (GrR, grR et SN) est 20 à 30 % supérieur à celui des BGN	-
(Torben and Erik Boegh, 1985)	-		-	Retrait des BGR (GrR, grR et SN) est 40 à 60% supérieur à celui des BGN d'origine	-
Bissonnette et al 1999 tiré de Dao (Dao, 2012)	BGN	E/C= 0,35	Volume de pâte (0,3 ; 0,5 ; 0,65 ; 1)	(0,2 ; 0,35 ; 0,53 ; 1)	<i>"plus le volume de pâte contenu dans le béton est important, plus le retrait relatif du béton est élevé"</i> (Dao, 2012)
E/C= 0,5		(0,17 ; 0,35 ; 0,5 ; 1)			
Domingo-Cabo., 2009 tiré de Dao (Dao, 2012)	BGN E/C = 0,5 ; 0,7% d'additive				
	BGR (20% de substitution de graviers et gravillons recyclés) ; E/C = 0,7 ; 0,7% d'additive				
	BGR (50% de substitution de graviers et gravillons recyclés) ; E/C = 0,7 ; 0,7% d'additive				
	BGR (100% de substitution de graviers et gravillons recyclés) ; E/C = 0,7 ; 1,4% d'additive				
(Evangelista and de Brito, 2004) ;	BGN Eeff/C = 0,41 SPP utilisé				
	BGR (10% de SN substitué par du SR)				

(Evangelista and de Brito, 2007)	Eeff/C = 0,42 SPP utilisé			
	BGR (20% de SN substitué par du SR) Eeff/C = 0,44 SPP utilisé			
	BGR (30% de SN substitué par du SR) Eeff/C = 0,45 SPP utilisé			
	BGR (50% de SN substitué par du SR) Eeff/C = 0,46 SPP utilisé			
	BGR (100% de SN substitué par du SR) Eeff/C = 0,48 SPP utilisé			
(Katz, 2003)	BGN avec du ciment portland		(-0,1 ; -0,22 ; -0,28 ; -0,32) mm/m	(7 ; 28 ; 56 ; 90 jrs)
	BGR avec du ciment portland	GR obtenu à 1 jour d'âge du béton parent	(-0,25 ; -0,47 ; -0,64 ; -0,71) mm/m	
	BGR avec du ciment portland	GR obtenu à 3 jours d'âge du béton parent	(-0,22 ; -0,45 ; -0,66 ; -0,71) mm/m	
	BGR avec du ciment portland	GR obtenu à 28 jours d'âge du béton parent	(-0,25 ; -0,51 ; -0,72 ; -0,79) mm/m	
	BGN avec du ciment blanc	-	(-0,08 ; -0,18 ; -0,23 ; -0,27) mm/m	
	BGR avec du ciment blanc	GR obtenu à 1 jour d'âge du béton parent	(-0,1 ; -0,3 ; -0,47 ; -0,58) mm/m	
	BGR avec du ciment blanc	GR obtenu à 3 jours d'âge du béton parent	(-0,1 ; -0,33 ; -0,47 ; -0,58) mm/m	
	BGR avec du ciment blanc	GR obtenu à 28 jours d'âge du béton parent	(-0,1 ; -0,32 ; -0,52 ; -0,63) mm/m	
(Buyle-Bodin, F and Hadjieva-Zaharieva, 2002)	BGN 2 Etot/C=0,43		140 µm/m	1 an stockage dans l'eau
			460 µm/m	1 an stockage dans l'air
	BGM Etot/C = 0,5		180 µm/m	1 an stockage dans l'eau
			830 µm/m	1 an stockage dans l'air
	BGR 3 Etot/C = 0,61		330	1 an stockage dans l'eau
			1420	1 an stockage dans l'air
(Sagoe-Crentsil et al., 2001)	BGN Eeff/C= 0,76		(-305 ; -500 ; -530 ; -600 ; -600) microstrain	(28 ; 56 ; 91 ; 180 ; 365 jours)
	BGR Eeff/C= 0,73		(-430 ; -660 ; -700 ; -780 ; -780) microstrain	
	BGR Eeff/C= 0,74		(-450 ; -670 ; -750 ; -880 ; -840) microstrains	
	BGR Eeff/C= 0,70		(-485 ; -680 ; -790 ; -990 ; -960) microstrain	
(Khatib, 2005)	BGN		-200 microstrain	90 jrs

	BGN (25% de SN est substitué par du SR)		-237 microstrain	
	BGN (50% de SN est substitué par du SR)		-252 microstrain	
	BGN (75% de SN est substitué par du SR)		-300 microstrain	
	BGN (100% de SN est substitué par du SR)		-312 microstrain	
(De Juan and Gutiérrez, 2004)	0% de GR	(0,4; 0,45 ; 0,5; 0,55; 0,6 ; 0,65)	(3,5 ; 3,2 ; 3,4 ; 2,5 ; 2,6 ; 2,4)	28 jrs
	20% de GR		(3,6 ; 3,15 ; 2,9 ; 2,8 ; 2,3 ; 2,4)	
	50% de GR		(3,5 ; 3,4 ; 3,15 ; 2,5 ; 2,6 ; 2,1)	
	100% de GR		(2,8 ; 2,9 ; 2,9 ; 2,5 ; 2,4 ; 2,2)	
(Debieb and Kenai, 2008)				(2;7;28;90 jrs)
(Limbachiya, 2005)	GrN et grN= 1200 ; SN = 650 ; C0	C=310 Etot= 185	596 microstrain	90 jrs retrait à 20°C et 55% HR
	GrN et grN= 840 ; GrR et grR= 360 ; SN = 645 ; C30		600 microstrain	
	GrN et grN= 590 ; GrR et grR= 5900 ; SN = 640 ; C50		625 microstrain	
	GrR et grR= 1200 ; SN = 625 ; C100		673 microstrain	
(Corinaldesi and Moriconi, 2009)	BGN E/C = 0,56 « REF »			
	BGR (SR+ GrR+grR) E/C = 0,35 "REC"			
	BGR (SR+ GrR+grR) + CV + Superplastifiant E/C = 0,4 « REF+FA »			

Tableau 16 : Synthèse des valeurs de masses volumiques des bétons de granulats recyclés à l'état frais et durcis

[Référence]	Composition		Masses volumiques		
			Valeurs [kg/m ³]	Echéances	
Malhotra (Malhotra, 1976) dans Nixon (Nixon, 1978)	BGR (graviers recyclés et SN) E/C = 0,69		2115	Etat frais	
	BGR (100%) E/C = 0,67		2240		
	BGN E/C = 0,67		2275		
(Zaharieva et al., 2003) ;(Buyle-Bodin,F and Hadjieva-Zaharieva, 2002)	BGN 1 (Etot/C= 0,48)	Conservé à l'air	2320	28 jours	
		Conservé dans l'eau	2345		
	BGN 2 (Etot/C= 0,43)	Conservé à l'air	2380		
		Conservé dans l'eau	2440		
	BGM (Etot/C= 0,50)	Conservé à l'air	2305		
		Conservé dans l'eau	2370		
	BGR 1 (Etot/C= 0,65)	Conservé à l'air	2160		
		Conservé dans l'eau	2195		
	BGR 2 (Etot/C= 0,66)	Conservé à l'air	2160		
		Conservé dans l'eau	2205		
BGR 3 (Etot/C= 0,61)	Conservé à l'air	2190			
	Conservé dans l'eau	2225			
(Gómez-Soberón, 2002)	E/C constant, Graviers naturel remplacé par les graviers recyclés à 0%,	0%	Conservé à l'air	2130	28 jrs
			Saturé surface sèche	2310	
	15%,30%,60%,100%,	15%	Conservé à l'air	2140	

			Saturé surface sèche	2360	
		30%	Conservé à l'air	2150	
			Saturé surface sèche	2330	
		60%	Conservé à l'air	2120	
			Saturé surface sèche	2320	
		100%	Conservé à l'air	2090	
			Saturé surface sèche	2290	
(Dao, 2012)	BGR Eeff/C = 0,62			2300	28 jrs
(Khatib, 2005)	BGN			(2405 ; 2410 ; 2427 ; 2427)	(1jr, 7jr ; 28jrs ; 90 jrs)
	BGN (25% de SN est substitué par du SR)			(2397 ; 2410 ; 2417 ; 2420)	
	BGN (50% de SN est substitué par du SR)			(2373 ; 2373 ; 2383 ; 2383)	
	BGN (75% de SN est substitué par du SR)			(2333 ; 2343 ; 2367 ; 2370)	
	BGN (100% de SN est substitué par du SR)			(2290 ; 2303 ; 2320 ; 2340)	
(González-Fonteboa and Martínez-Abella, 2008)	BGN sans FS/C (E/C= 0,55)	Conservé à l'air		(2,4 ; 2,29) t/m ³	(28 ; 115 jrs)
		Conservé dans l'eau		(2,4 ; 2,41) t/m ³	
	BGN avec FS/C= 8 (E/C= 0,55)	Conservé à l'air		(2,38 ; 2,27) t/m ³	
		Conservé dans l'eau		(2,39 ; 2,41) t/m ³	
	BGM (50%GrR, 50%GrN, 50%grR, 50%grN et 100%SN) sans FS/C (E/C= 0,55)	Conservé à l'air		(2,37 ; 2,25) t/m ³	
		Conservé dans l'eau		(2,38 ; 2,39) t/m ³	
BGM (50%GrR, 50%GrN, 50%grR, 50%grN et 100%SN) avec FS/C= 8 (E/C= 0,55)	Conservé à l'air		(2,34 ; 2,16) t/m ³		
	Conservé dans l'eau		(2,35 ; 2,30) t/m ³		

Teneur en air

Tableau 17 : Teneurs en air obtenues sur des bétons (Brito and Saikia, 2013) ; (Dao, 2012)

Appellation	Type de granulats	E/C	Teneur en air (%)
(Sagoe-Crentsil et al., 2001)	Basalte grossiers (0,15/19 mm)	0,76	2,4
	Graviers recyclé (0,15/19 mm) (100%)	0,73	2,4
		0,74	1,8
		0,70	2,3
(Katz, 2003)	GN	Eeff/C = 0,55	1,3
	GR (avec du ciment blanc)		5,4 (1 Jour) 4,1 (3 Jour) 5,0 (28 Jour)

	GR (avec du ciment portland)		4,8 (1 Jour) 5,4 (3 Jour) 5,6 (28 Jour)
(Dao, 2012)	BGR	Eeff/C = 0,62	3 %
(De Juan and Gutiérrez, 2004)	0% de GR	(0,65 ; 0,6 ; 0,55 ; 0,5 ; 0,45 ; 0,4)	(2,6 ; 2,8 ; 2,2 ; 1,6 ; 1,5 ; 1,3)
	20% de GR		(2,3 ; 2,8 ; 2 ; 1,1 ; 1,1 ; 1,1)
	50% de GR		(2,7 ; 3,1 ; 2,7 ; 1,3 ; 1,8 ; 1,5)
	100% de GR		(2,9 ; 2,9 ; 2,3 ; 1,3 ; 1,1 ; 1,05)

Tableau 18 : Synthèse des valeurs de résistances mécaniques des bétons de granulats recyclés (Zhao tableau-21) (Zhao, 2014)

Auteurs, Année [Référence]	Composition	Résistance à la compression [MPa]	
		Valeurs	Echéances de mesures
(Evangelista and de Brito, 2004)	BGN Eeff/C = 0,41 SPP utilisé	59,43	28 jrs
	BGR (10% de SN substitué par du SR) Eeff/C = 0,41 SPP utilisé	62,24	
	BGR (20% de SN substitué par du SR) Eeff/C = 0,41 SPP utilisé	58,42	
	BGR (30% de SN substitué par du SR) Eeff/C = 0,41 SPP utilisé	61,28	
	BGR (50% de SN substitué par du SR) Eeff/C = 0,41 SPP utilisé	60,78	
	BGR (100% de SN substitué par du SR) Eeff/C = 0,41 SPP utilisé	61,04	
(Kou and Poon, 2009)	BGN E/C 0,53 (série I) et 0,44 (série II)	Série I (44,3) Série II (53,7)	28 jrs
	BGR (25% de SN substitué par du SR) 0,53 (série I) et 0,44 (série II)	Série I (44,5) Série II (64,3)	
	BGR (50% de SN substitué par du SR) 0,53 (série I) et 0,44 (série II)	Série I (43,4) Série II (62,3)	
	BGR (75% de SN substitué par du SR) 0,53 (série I) et 0,44 (série II)	Série I (41,3) Série II (56,3)	
	BGR (100% de SN substitué par du SR) 0,53 (série I) et 0,44 (série II)	Série I (38,7) Série II (53,2)	
(Pereira et al., 2012)	SN substitué par du SR à 0%, 10%,30%,50%,100%. SPP utilisé	53,3 ; 53,7 ; 51 ; 47,8 ; 45,1	
(Poon and Lam, 2008)	E/C constant, Graviers naturel remplacé par les graviers recyclés à 0%, 30%,50%,70%,100%,	48,6 ; 45,3 ; 42,5 ; 39,2 ; 37,1	
(Gómez-Soberón, 2002)	E/C constant, Graviers naturel remplacé par les graviers recyclés à 0%, 15%,30%,60%,100%,	39 ; 38,1 ; 37 ; 35,8 ; 34,5	
(Corinaldesi and Moriconi, 2010)	E/C constant gravillons et graviers recyclés remplacés à 0% et 30 % (E/C = 0,5)	51, 2 ; 38,1	
(Padmini et al., 2009)	Graviers naturel remplacé par les graviers recyclés à 0%, 25%,50%,75%,100%,	20 à 35% de réduction pour les fractions supérieures à 10 mm	
(Topçu and Şengel, 2004)	Graviers naturel remplacé par les graviers recyclés à 0%, 30%,50%,70%,100%,	23,5% de réduction pour le C20 et 33% de	

			réduction pour le C16 (17,98 ; 14,71 ; 14,6 ; 14,18) pour C15 (30,75 ; 26,84 ; 26,6) pour C25 (66,85 ; 49,26 ; 40,89) pour C26		
(Mas et al., 2012)	Gravillons et graviers naturels remplacés par les recyclés à 0%, 25%,50%, 75% et sans adjuvant pour C15		(22,88 ; 19,47 ; 22 ; 20,89) pour C15 (34,42 ; 32,02 ; 32,93) pour C25 (73,26 ; 61,94 ; 49,65) pour C26	90 jrs	
(Casuccio et al., 2008)	Gravillons et graviers naturels remplacés par les recyclés à 0%, 100% et sans adjuvant pour C18 ; Gravillons et graviers naturels remplacés par les recyclés à 0%, 100% avec adjuvant pour C37 et C48 ;		1 à 15% de réduction	28 jrs	
(Braymand et al., 2015) ; (Sandrine Braymand et al., 2012b) ; (Braymand, 2012) ; (Sandrine Braymand et al., 2012a) ; (Braymand et al., 2013)	BGN(1) Etot/C = 0,5		1(26 ; 32 ; 44 ; 54)	(2 jrs ; 7jrs ; 28 jrs ; 180 jrs)	
	BGM (2) Etot/C = 0,47		2(28 ; 34 ; 47 ; 54)		
	BGR (3) Etot/C = 0,55		3(30 ; 34 ; 47 ; 53)		
	BGR Etot/C = 0,5	0/4 mm et 4/8 mm		(28 ; 30 ; 40)	(7jrs ; 28 jrs ; 180 jrs)
	BGB Etot/C = 0,5			(58 ; 50 ; 58)	
BC Etot/C = 0,5			(37 ; 35 ; 36)		
(Katz, 2003)	BGN avec du ciment portland		(21,6 ; 34,6 ; -)	(7jrs ; 28 jrs ; 90 jrs)	
	BGR avec du ciment portland	GR obtenu à 1 jour d'âge du béton parent	(18,3 ; 26,6 ; 33,0)		
	BGR avec du ciment portland	GR obtenu à 3 jours d'âge du béton parent	(17,0 ; 25,8 ; 28,7)		
	BGR avec du ciment portland	GR obtenu à 28 jours d'âge du béton parent	(17,1 ; 26,8 ; 30,6)		
	BGN avec du ciment blanc	-	(36,8 ; 42,1 ; 58,9)		
	BGR avec du ciment blanc	GR obtenu à 1 jour d'âge du béton parent	(19,0 ; 24,1 ; 28,9)		
	BGR avec du ciment blanc	GR obtenu à 3 jours d'âge du béton parent	(23,4 ; 30,5 ; 38,7)		
	BGR avec du ciment blanc	GR obtenu à 28 jours d'âge du béton parent	(20,0 ; 29,1 ; 35,2)		
(Poon et al., 2004)	BGR avec des graviers naturels remplacés par les graviers recyclés à des taux de 0%,20%,50%,100%,	GR séchés à l'air libre	25 ; 23,3 ; 20,4 ; 24,4	3jrs	
			34,9 ; 34,8 ; 32,2 ; 33,9	7 jrs	
			48,3 ; 44,9 ; 44,7 ; 46,8	28 jrs	
		GR séchés à l'étuve	18,2 ; 19,4 ; 21 ; 21,7	3jrs	
			27,9 ; 29,2 ; 29,2 ; 32,1	7 jrs	
			40,2 ; 43,2 ; 39,7 ; 43,3	28 jrs	
		GR saturés	25,2 ; 20,4 ; 17,7 ; 17,5	3jrs	
			33,1 ; 30,3 ; 27,0 ; 28,5	7 jrs	
			46,0 ; 43,0 ; 38,1 ; 39,1	28 jrs	
(Zhao, 2014)	Mortier de sable naturel E/C = 0,5	SR présaturés avec leur eau	67,77	28 jrs	

	Mortier avec 10% de substitution de SN par du SR. E/C = 0,5	d'absorption Pendant 24 h	66,63	
	Mortier avec 20% de substitution de SN par du SR. E/C = 0,5		64,58	
	Mortier avec 30% de substitution de SN par du SR. E/C = 0,5		57,23	
	Mortier avec 50% de substitution de SN par du SR. E/C = 0,5		53,84	
	Mortier de sable recyclé. E/C = 0,5		42,09	
	Mortier de sable naturel E/C = 0,6		55,98	
	Mortier avec 10% de substitution de SN par du SR. E/C = 0,6		51,17	
	Mortier avec 20% de substitution de SN par du SR. E/C = 0,6		49,32	
	Mortier avec 30% de substitution de SN par du SR. E/C = 0,6		47,37	
	Mortier avec 50% de substitution de SN par du SR. E/C = 0,6		46,92	
	Mortier de sable recyclé. E/C = 0,6		39,14	
(Buyle-Bodin,F and Hadjieva-Zaharieva, 2002)	BGN 1 Etot/C=0,48			42,6
			37,7	28 jrs stockage dans l'air
	BGN 1 Etot/C=0,43		54,8	28 jrs stockage dans l'eau
			47,7	28 jrs stockage dans l'air
	BGM Etot/C = 0,5		43,3	28 jrs stockage dans l'eau
			37,8	28 jrs stockage dans l'air
	BGR 1 Etot/C = 0,65		31,5	28 jrs stockage dans l'eau
			29,5	28 jrs stockage dans l'air
	BGR 2 Etot/C = 0,66		35,4	28 jrs stockage dans l'eau
			34,2	28 jrs stockage

			dans l'air	
	BGR 3 Etot/C = 0,61	39,4	28 jrs stockage dans l'eau	
		38,1	28 jrs stockage dans l'air	
(Dao, 2012)	BGR Eeff/C = 0,62	24,76	28 jrs	
(Sagoe-Crentsil et al., 2001)	BGN Eeff/C= 0,76	27		
	BGR Eeff/C= 0,73	27,5		
	BGR Eeff/C= 0,74	32,5		
	BGR Eeff/C= 0,70	32		
(Yang et al., 2011)	BGN	(41,55 ; 54,65)	(7 jrs ; 28 jrs)	
	BGR(100%)	(38,75 ; 51,55)		
	BGB (20%) BGR (80%)	(38,2 ; 48,8)		
	BGB (50%) BGR (50%)	(35,65 ; 43,85)		
(Etxeberria et al., 2007)	BGN Eeff/C = 0,55	29	28 jrs	
	BGR (grossier 25%) Eeff/C = 0,55	28		
	BGR (grossier 50%) Eeff/C = 0,52	29		
	BGR (grossier 100%) Eeff/C = 0,50	28		
(Gómez-Soberón, 2002)	BGN Eeff/C = 0,52	(33,3 ; 39 ; 42,1)	(7 jrs, 28 jrs ; 90 jrs)	
	BGR (grossier 15%) Eeff/C = 0,52	(33,9 ; 38,1 ; 41,6)		
	BGR (grossier 30%) Eeff/C = 0,52	(34,8 ; 37 ; 39,5)		
	BGR (grossier 60%) Eeff/C = 0,52	(30,6 ; 35,8 ; 38,3)		
	BGR (grossier 100%) Eeff/C = 0,52	(30,7 ; 34,5 ; 37,5)		
(Mefteh et al., 2013) ; (Meftah and Arabi, 2011)	BGN	Granulats séché à l'étuve	(22,5 ; 31)	(7 jrs ; 28 jrs)
		Granulats préhumidifiés	-	
		Granulats saturés	-	
	BGR avec 20% de gravillons et de graviers recyclés	Granulats séché à l'étuve	(25 ; 36,5)	
		Granulats préhumidifiés	(21 ; 29)	
		Granulats saturés	(26,5 ; 33)	
	BGR avec 40% de gravillons et de graviers recyclés	Granulats séché à l'étuve	(25 ; 35)	
		Granulats préhumidifiés	(19 ; 28)	
		Granulats saturés	(22 ; 29)	
	BGR avec 60% de gravillons et de graviers recyclés	Granulats séché à l'étuve	(22,5 ; 26)	
		Granulats préhumidifiés	(24 ; 31)	
		Granulats saturés	(18 ; 25,5)	
	BGR avec 80% de gravillons et de graviers recyclés	Granulats séché à l'étuve	(19 ; 27,5)	
		Granulats préhumidifiés	(18,5 ; 27)	
		Granulats saturés	(16 ; 25)	
BGR	Granulats séché à l'étuve	(19 ; 27,5)		
	Granulats préhumidifiés	(18 ; 26)		
	Granulats saturés	(16 ; 25,5)		

(Khatib, 2005)	BGN (25% de SN est substitué par du SR)	(11,7 ; 46,7 ; 51,1)	(1jr, 28jrs ; 90 jrs)
	BGN (50% de SN est substitué par du SR)	(9,2 ; 35,3 ; 43,6)	
	BGN (50% de SN est substitué par du SR)	(8,9 ; 35,2 ; 42,1)	
	BGN (75% de SN est substitué par du SR)	(8,6 ; 35,1 ; 39,9)	
	BGN (100% de SN est substitué par du SR)	(8,4 ; 30 ; 37,8)	
(Xiao et al., 2012)	BGR (Gravillons et graviers naturels substitués par les recyclés aux taux 0%, 30%,50%,70% et 100%) E/C constant	35,9. 34,1 ; 29,6 ; 30,3 ; 26,7	28 jrs

A.2.4 MBE de GR

Tableau 19 : Composition des mortiers réalisés par Zhao (Zhao, 2014)

	Ciment [g]	Sable recyclé [g]	Eau efficace [g]	Eeff/C
CM-0,5-S	450	1350	225	0,5
CM-0,5-D	450	1350	225	0,53
RM-0,5-S	450	1291	225	0,5
RM-0,5-D	450	1291	225	0,72
RM-0,55-S	450	1291	225	0,55
RM-0,55-D	450	1291	225	0,77
RM-0,6-S	450	1291	225	0,6
RM-0,6-D	450	1291	225	0,82

Tableau 20 : Affaissements des mortiers obtenus par Zhao (Zhao, 2014)

Temps de mesure [T0+ min]	5	15	30	45	60	75	90	105	120
CM-0,5-S	13	10	7	6	6				
CM-0,5-D	33	33	28	18	12	9	6		
RM-0,5-S	6	5	5	4					
RM-0,5-D	44	43	41	37	24	15	11	7	
RM-0,55-S	22	21	19	17	16	13	10	7	4
RM-0,55-D	50	49	45	40	33	28	20	13	9
RM-0,6-S	55	48	41	34	27	23	22	15	13
RM-0,6-D	89	82	76	66	61	50	40	37	22

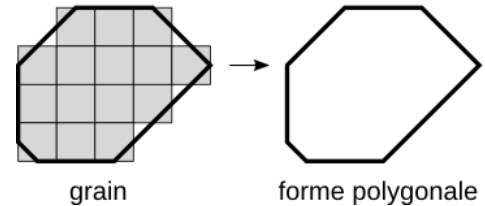
Tableau 21 : Résistances mécaniques des mortiers obtenus par Zhao (Zhao, 2014)

	CM-0,5-S	CM-0,5-D	RM-0,5-S	RM-0,5-D	RM-0,55-S	RM-0,55-D	RM-0,6-S	RM-0,6-D
Masse volumique [g/cm ³]	2,4	2,36	2,15	2,14	2,16	2,13	2,16	2,12
Rf [MPa]	11,97	12,15	8,76	8,78	8,10	8,15	7,72	7,80
Rm [MPa]	66,7	72,00	4,22	49,84	43,01	45,34	41,96	43,76

ANNEXE.3 Caractéristiques de l'appareil photo et du logiciel de traitement d'images

A.3.1 Précision des mesures du logiciel

Aire : Concernant les calculs d'aire, le logiciel se contente de compter le nombre de pixels noirs de chaque granulat. Il n'y a donc pas d'imprécision commise à ce niveau-là, l'erreur éventuelle viendrait uniquement de la précision sur la définition du contour du granulat.



Périmètre : Le logiciel semble procéder au calcul du périmètre de la façon suivante. Cela implique que les très petites inclusions ne sont pas prises en compte dans le calcul du périmètre. Il est difficile de donner une valeur exacte d'imprécision du périmètre. Cependant, afin d'avoir un ordre de grandeur, on peut rappeler qu'un pixel mesure en général aux alentours de 0,08 mm. L'erreur faite par le logiciel sur le périmètre restera donc acceptable vis à vis de la taille des granulats étudiés.

A.3.2 Des pixels aux unités de longueur

Afin de ramener les mesures effectuées en pixels à une unité de longueur exploitable, 2 solutions étaient envisageables.

Utiliser le mode macro de l'appareil photo

Equipé d'un **objectif macrophotographique**, l'appareil photo peut ainsi prendre des clichés à une échelle précise choisie sur l'objectif. La mise au point se fait ensuite manuellement en s'approchant ou s'éloignant de l'échantillon à photographier. Cette méthode permet d'atteindre un niveau de précision correcte, mais nécessite pour cela une mise au point parfaite de l'objectif. Or les granulats ayant des tailles différentes, leur distance optimale de mise au point n'est pas la même pour tous. De plus, l'objectif macro, étant à la base conçu pour réaliser des photos de sujets de taille réduite, il n'est possible que de prendre un nombre limité de granulats en photo.

Utiliser un repère de longueur sur la photo

Cette méthode, pouvant paraître obsolète, reste la plus précise et la plus aisée pour la prise d'un nombre important de photos. On dispose donc un référentiel de longueur (pied à coulisse) au bas de l'échantillon de granulats pris en photo. Puis à l'aide du logiciel, une distance en pixel est sélectionnée sur le pied à coulisse, et la valeur en mm correspondante renseignée, afin d'en déduire le facteur d'échelle. C'est cette méthode qui a été choisie pour des raisons de facilité et rapidité de mise en œuvre.

Comparaison entre les 2 méthodes :

Dimension capteur (mm)
15,8
23,6

Résolution photo (px)
2848
4288

Echelle macro
18,17

Echelle logiciel
18,54

Ecart relatif (%)
2,00

A.3.3 Utilisation d'ImageJ

A.3.3.1 Introduction

ImageJ est un logiciel développé dans le langage Java et compatible sur Windows, Mac et Linux. Il permet de traiter des images dans la plupart des formats couramment utilisés. Il est notamment utilisé en imagerie médicale.

A.3.3.2 Installation

<http://rsb.info.nih.gov/ij/download.html>

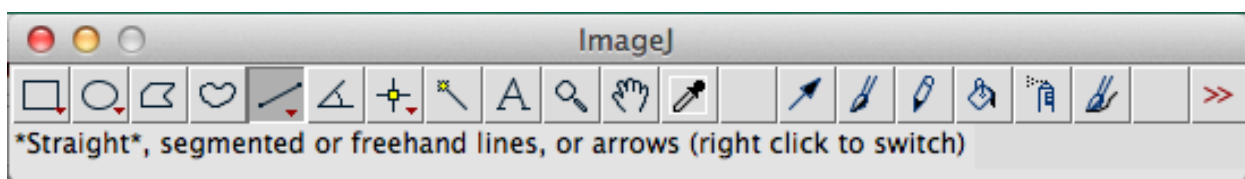
A.3.3.3 Analyse d'une image

1.3.3.3.1 Ouverture et mise à l'échelle d'une image

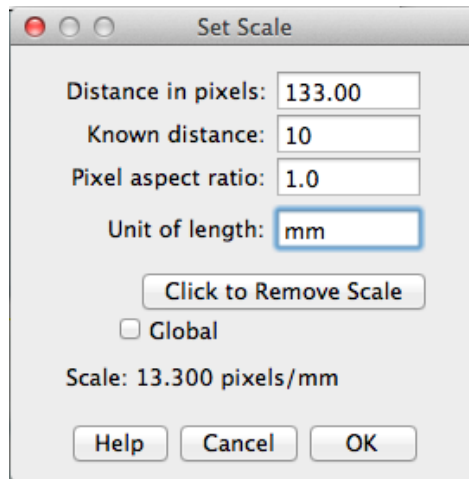
- Ouvrir une image dans le menu **File -> Open**

Rappelons que pour être exploitable sur le logiciel, une image doit disposer d'un repère de longueur (règle) pour pouvoir mettre en place une échelle

- Zoomer sur la longueur qui servira de longueur de référence, à l'aide de l'outil loupe ou des touches du clavier « + » et « - ».
- Tracer un segment à l'aide de l'outil « straight », sur la longueur de référence. (Choisir une distance de référence facilement repérable et suffisamment grande, pour éviter les imprécisions)

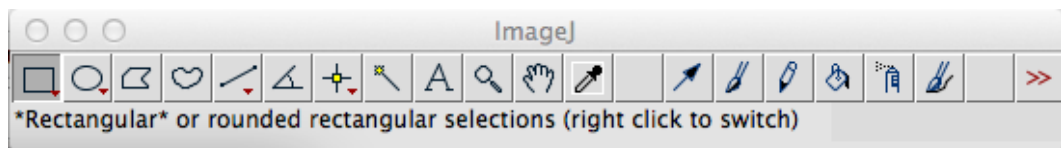


- Aller dans **Analyse -> Set scale...** Ne pas toucher à la valeur « Distance in pixels », elle correspond à la longueur du segment tracé au préalable. Remplir le champ « Known distance » avec la distance réelle correspondante, ainsi que son unité dans « Unit of length ». Ne pas toucher au champ « Pixel aspect ration ». Valider avec **OK**.



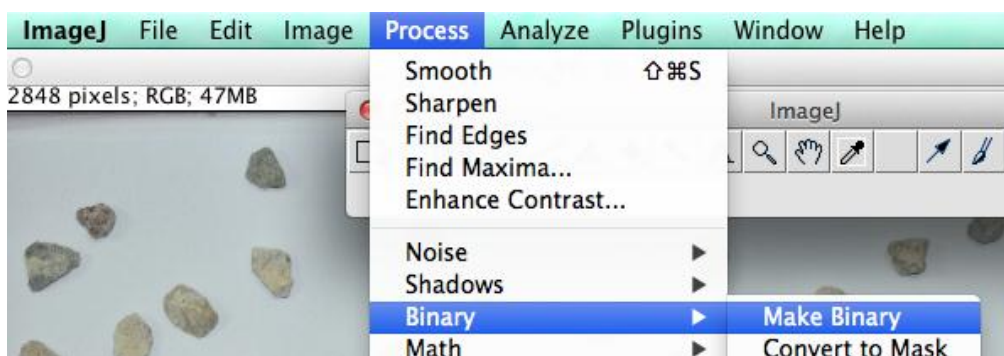
1.3.3.3.2 Rognage et passage en mode binaire

- L'échelle étant maintenant fixée, le repère de longueur n'est plus nécessaire sur l'image car il perturberait les résultats de l'analyse. Il est donc nécessaire de rogner l'image. Pour cela sélectionner à l'aide de l'outil **Rectangular** la zone contenant uniquement les granulats.



Puis aller dans le menu **Image** -> **Crop**.

- Pour passer l'image en binaire, aller dans le menu **Process** -> **Binary** -> **Make Binary**



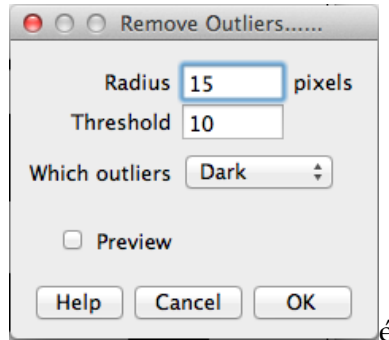
- Remplir les blancs à l'intérieur des cailloux à l'aide de la commande **Process** -> **Binary** -> **Fill Holes**.

- Si après cette étape, des granulats apparaissent encore avec des taches blanches ou coupés par le rognage, les sélectionner à l'aide des outils classiques de sélection, et les



supprimer à l'aide de la touche **Suppr** du clavier.

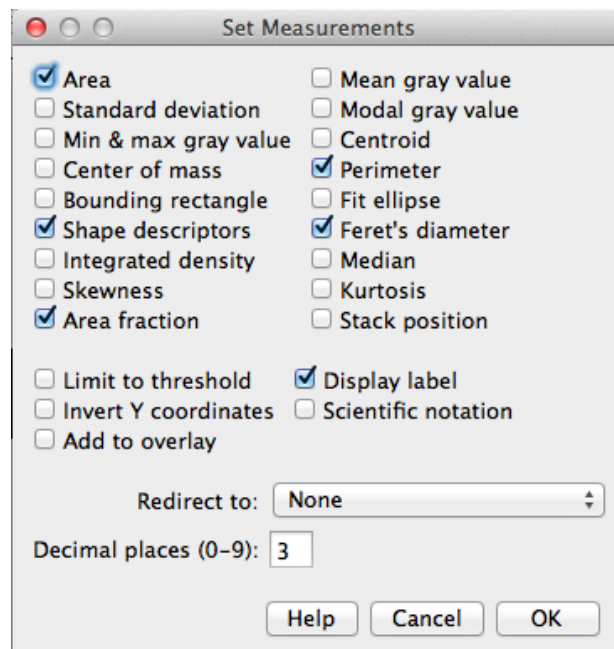
- Afin de supprimer les pixellisation dues au passage en binaire ainsi que le bruit éventuel du fond blanc, aller dans **Process -> Noise -> Remove Outliers**. Remplir les champs comme ci-dessous et valider par **OK**



1.3.3.3 Allongement, circularité et convexité

Les critères d'allongement et de circularité se déduisent facilement à partir des outils de base du logiciel.

- Tout d'abord, sélectionner les grandeurs que le logiciel va étudier lors de l'analyse par particules. Pour cela, se rendre dans le menu **Analyse -> Set Measurements** et cocher les mêmes grandeurs que ci-dessous.

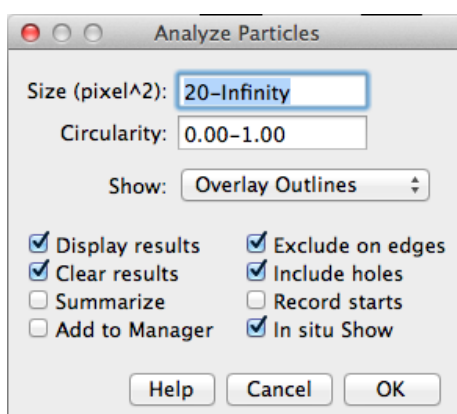


- L'option « Shape descriptors » va nous permettre d'obtenir directement les critères d'allongement, de circularité et de compacité.

- Pour procéder à l'analyse aller dans le menu **Analyse -> Analyze Particles**
 Dans le champ « Size », choisir l'aire minimale en fonction de la taille moyenne des granulats de la photo, cela permet d'éviter l'analyse d'imperfections résiduelles de la photo binaire.

L'option « Show » permet d'afficher différentes caractéristiques sur l'image binaire étudiée. Choisir **Overlay Outlines** permet de numéroter chaque granulat ainsi que d'afficher en surbrillance le contour de chaque granulat utilisé pour les mesures.

Valider par **OK**



- Les résultats apparaissent sous la forme d'un tableau. Grâce à l'échelle définie précédemment, toutes les dimensions présentes dans le tableau sont dans l'unité choisie par l'utilisateur.
- Enregistrer les résultats avec la commande **File -> Save As**. Ils seront enregistrés sous forme d'un tableur Excel classique. Il sera simplement nécessaire de remplacer dans le tableur, les points séparateurs par des virgules afin de pouvoir exploiter les valeurs.
- Les grandeurs mesurées pertinentes sont référencées comme cela :

Area	Perim.	Circ.	Feret	MinFeret	AR	Solidity
Aire	Périmètre	Critère de circularité	Dimension de Feret max	Dimension de Feret min	Critère d'allongement de l'ellipse équivalente	Critère de convexité

1.3.3.3.4 Tortuosité

Le critère de tortuosité nécessite l'installation de 2 plug-ins complémentaire :

- BinaryLabel8: identifie et numérote chacun des granulats
- Geodesic: calcule la longueur géodésique

Ils s'installent via le menu **Plugins -> Install**, puis en sélectionnant le fichier correspondant.

En partant d'une image binaire, labéliser l'image via l'option **BinaryLabel8** du menu **Plugins**. Puis calculer le diamètre géodésique via **Plugins -> Geodesic -> Geodesic Diameter**. Valider la fenêtre qui s'ouvre par OK. Les résultats s'affichent dans un tableau et s'enregistrent facilement dans un tableur.

Il est nécessaire de supprimer les lignes du tableur où le diamètre géodésique est très faible comparé aux autres valeurs. Elles correspondent aux mesures faites sur le « bruit » de la photo. Car le plugin ne permet pas de choisir une « aire minimale » de mesure.

Important : Le plugin Geodesic ne prend pas en compte l'échelle fixée sur le logiciel, il est nécessaire d'appliquer le facteur d'échelle relevé précédemment aux résultats enregistrés.

ANNEXE.4 Synthèse des paramètres des essais d'absorption/cinétique/masse volumique

Types de granulats	Classe granulaire [mm]	Masse de granulat [g]	Méthode d'immersion	Temps d'immersion [h]	Méthodes de séchage	Suivi de cinétique	Nombre d'essais	Nature de l'eau : Eau adjuvantée ou non	Acquisition ou relevé manuel	Type de récipient	Volume du cristalliseur [l]
GR 1	0/4	1500	<i>Saturation dans le récipient</i>	48	Sèche-cheveux	Non	3	Non	Manuel	<i>figure 1</i>	2
	4/6,5				Tissu blanc		1				
	6,5/12,5						3				
GR 2	0/4	500	<i>Saturation dans le récipient</i>	44	Sèche-cheveux	Non	3	Non	Manuel	<i>figure 2</i>	2
	4/8	1500			Tissu blanc						
	8/16										
	16/20										
	>20										
GR 3	0/4	500	<i>Saturation dans le récipient</i>	44	Sèche-cheveux	Non	3	Non	Manuel	<i>figure 3</i>	2
	4/8	1500			Tissu blanc						
	8/16										
	16/20										
	>20										
GR 4-1	0/0,063	1000	<i>Saturation dans le récipient</i>	34	Sèche-cheveux	Non	1	Non	Manuel	<i>figure 4</i>	0,63
	0/0,5	600									
	0,5/4	1000									
	0/1	600									
	1/4	400									
	0/2	400									
	2/4	440									
	0/4	2000									
4/10	1250	Tissu blanc	Non	4		2					

	10/20	2800									
GR 5	0/4	300	Saturation dans le récipient	34	Sèche-cheveux	Non	1	Non	Manuel	figure 5	2
	4/8	500			Tissu blanc		3				
	8/16	1350					2				
	16/20	900									
GNC-1	0/0,063	1100	Saturation dans le récipient	34	Sèche-cheveux	Non	1	Non	Manuel	figure 6	0,63
	0/0,5	600									
	0,5/4	1000									
	0/1	600									
	1/4	400									
	0/2	400									
	2/4	440									
	0/4	2000									
	4/10	1250			Tissu blanc		3				2
6,3/20	2800										
GR 2	0,063/4	500	Saturation dans le panier immergé	30	Lampe à infrarouge	Oui	3	Non	Acquisition	figure 7	0,63
	4/10	1000		40	Dispositif du tube en rigole absorbant					figure 2	2
	10/20	1250		34						figure 3	2
GR 4-2	0,063/4	500	Saturation dans le panier immergé	34	Lampe à infrarouge	Oui	2	Non	Acquisition	figure 8	0,63
	0/4	500		36						2	
GR 4-1	4/10	1000		40	Dispositif du tube en rigole absorbant		3			figure 2	2
GR 4-2	10/20	1250		40			3			figure 3	2
GR 6	4/10	1000	Saturation dans le panier immergé	40	Dispositif du tube en rigole absorbant	Oui	3	Non	Acquisition	figure 2	2
GNC-2	0/4	500	Saturation dans le	34	Lampe à infrarouge	Oui	2	Non	Acquisition	figure 10	0,63

GNC-1	4/10	1000	<i>panier immergé</i>	36	Dispositif du tube en rigole absorbant	Oui	3			<i>figure 2</i>	2
	6,3/20	1250		40						<i>figure 3</i>	
GNR	0/4	500	<i>Saturation dans le panier immergé</i>	37	Lampe à infrarouge	Oui	3	Non	Acquisition	<i>figure 11</i>	0,63
	4/8	1000		27	Dispositif du tube en rigole absorbant	Oui	3			<i>figure 2</i>	2
	8/16	1250		40						<i>figure 3</i>	
GR 4-2	0,063/4	500	<i>Saturation dans le panier immergé</i>	40	Lampe à infrarouge	Oui	3	Oui	Acquisition	<i>figure 12</i>	0,63
GR4-1	4/10	1000		40	Dispositif du tube en rigole absorbant	Oui	3	Oui		<i>figure 2</i>	2
	10/20	1500		24		Oui	1	Eau adjuvantée		<i>figure 3</i>	2
	0/4	250		23	Lampe à infrarouge	Oui	1	Eau + fines		<i>figure 13</i>	0,63
GR4-1	0/4	250	<i>Saturation dans le panier immergé</i>	25	Lampe à infrarouge	Oui	1	Eau adjuvantée	Acquisition	<i>figure 14</i>	0,63
GR4-1	0/4	250		24	Lampe à infrarouge	Oui	1	Eau adjuvantée + fines		<i>figure 15</i>	0,63
GR4-1	10/20	1500		23	Dispositif du tube en rigole absorbant	Oui	1	Eau +fines		<i>figure 3</i>	2
GR4-1	10/20	1500		23		Oui	1	Eau adjuvantée +fines		<i>figure 3</i>	2
GNC-1	4/10	1000		40	Dispositif du tube en rigole absorbant	Oui	3	Oui	Acquisition	<i>figure 2</i>	2
GR4-1	0/4	250	<i>Saturation dans le récipient</i>	34	Lampe à infrarouge	Non	1	Non	Manuel	<i>figure 16</i>	0,63
GR 4-1	0,063/4										
GR 4-1	0,315/4										
GR 4-1	1,25/4										
GR 6	10/14	500	<i>Saturation dans le récipient</i>	34	Dispositif du tube en rigole absorbant		1			<i>figure 17</i>	2
GR 6	10/20	1500									



fig. 1 : Seau en plastique perforée



Fig. 2 : Panier en treillis



Fig. 18 : Panier en treillis

ANNEXE.5 Liste des essais réalisés pour les différentes fractions et selon un protocole normalisé ou « amélioré »

Granulats	Essais réalisés	Lots employés	Classes granulaires	Référence de la norme	Nombre de tests
Naturels et Recyclés	Analyse granulométrique	R 4-1 GNC-1	0/4 mm 4/10 mm 6,3/20 mm 10/20 mm	NF EN 933-1	4 par fraction
		GR 4-2 GNC-2	0/4 mm 10/20 mm		1
		GR 1 GR 2 GR 3 GR 5 GNR	0/4 mm 4/8 mm 8/16 mm		3 par fraction
		GR 6 GR 7	0/500 µm		1
	Module de finesse	GR 1 GR 2 GR 3 GR 4-1 et (GR 4-2) GR 5 GNC-1 et (GNC-2) GNR	0/4 mm	XP P 18 540 et NF EN 12 620	3 par fraction
		GR 4-2 GNC	0/20 mm		
	Analyse granulométrique laser	GR 1 GR 2 GR 3 GR 4-1 GR 5 GNC-1 GNR	0/500 µm	Protocole spécifique	3 par fraction
		GR 1 GR 2 GR 3 GR 4-2 GR 5 GR 6 GR 7	0/100 µm		
		GR 7	0/63 µm		
	Surface spécifique	GR 1 GR 2 GR 3 GR 4-1 GR 5	0/100 µm	NF EN 196-6 adaptée	1
	Analyse morphologique par analyse photographique	GR 4-1 GNC-1 GNR	4/5 - 5/6,3 - 6,3/8 - 8/10 - 10/12,5	Protocole spécifique	10 photographies par fraction
	Analyse morphologique au pied à coulisse	GR 4-1 GNC-1 GNR	4/5 - 5/6,3 - 6,3/8 - 8/10 - 10/12,5 - 12,5/16 et 16/20		
	Masse	GR 2	0/4 mm	NF X 31-503	3 par fraction

	volumique apparente	GR 4-2 GNC	4/10 mm 6,3/20 mm ou 10/20 mm				
		GNR	0/4 mm 4/8 mm 8/16 mm				
	coefficient d'absorption	GR 1 Méthode 1	0/4 mm 6,5/13,5 mm	NF EN 1097-6 adapté	3 par fraction	1	
		GR 2 et GR 3 Méthode 1	0/4 mm 4/8 mm 8/16 mm 16/20 mm > 20 mm				
		GR 5 Méthode 1	0/4 mm				1
			4/8 mm				3 par fraction
			8/16 mm				2 par fraction
		GR 4-1 GNC-1 Méthode 1	0,063/4 mm 0/500 µm 500 µm/4 mm 0/1 mm 1/4 mm 0/2 mm 2/4 mm				1
			0/4 mm 4/10 mm 6,3/20 mm 10/20 mm				3 par fraction
		GR 2 GR 4-1 et (GR 4-2) GR 6 GNC-1 et (GNC-2) GNR	0/4 mm 4/10 mm 4/8 mm 8/16 mm 10/20 mm				3 par fraction
		GR 4-1 et (GR 4-2) GNC-1	0,063/4 mm 4/10 mm 4/10 mm				3 par fraction
		GR 4-1	0/4 mm 0,063/4 mm 0,315/4 mm 1,25/4 mm				1
	GR 6	10/20 mm	1				
	cinétique d'absorption et temps de saturation	GR 4-1	0/4 mm 4/10 mm 10/20 mm	NF EN 1097-6 Adaptée	3 par fraction	1	
		GNC-1	0/4 mm				
		GR 2 GR 4-1 et (GR 4-2) GR 6 GNC GNR	0/4 mm 4/10 mm 4/8 mm 8/16 mm 10/20 mm				
		GR 4-1 et (GR 4-2) GNC-1	0,063/4 mm 4/10 mm 4/10 mm				
	Masses volumiques	GR 1	0/4 mm 6,5/13,5 mm	NF EN 1097-6	3 par fraction		
		GR 2 et GR 3	0/4 mm				

			4/8 mm 8/16 mm 16/20 mm > 20 mm		
		GR 5	0/4 mm		1
			4/8 mm 8/16 mm		3 par fraction
			16/20 mm		2 par fraction
		GR 4-1 GNC-1	0,063/4 mm 0/500 µm 500µm/4 mm 0/1 mm 1/4 mm 0/2 mm 2/4 mm		1
			0/4 mm 4/10 mm 6.3/20 mm 10/20 mm		
		GR 2 GR 4-1 et (GR 4-2) GR 6 GNC-1 et (GNC-2) GNR	0/4 mm 4/10 mm 4/8 mm 8/16 mm 10/20 mm		3 par fraction
			GR 4-1 et (GR 4-2)		
		GNC-1	4/10 mm		
	Masses volumiques absolues des éléments fins	GR 2 GR 3 GR 4-1 GNC-1	0/100 µm 0/315 µm 0/500 µm	NF 1097-7 adaptée	3 par fraction
GR 1 GR 5		0/100 µm 0/315 µm 0/500 µm	1		
teneur en eau	GR 1 GR 2 GR 3 GR 4-1 GR 4-2 GR 5 GNC-1 GNC-2 GNR	0/4 mm 4/8 mm 4/10 mm 8/16 mm 16/20 mm 6,3/20 mm 10/20 mm	NF EN 1097-5	3 par fraction	
Désorption des granulats	GR 2 GR 4-1 GR 6 GNC-1 GNR	0/4 mm 4/10 mm 4/8 mm 8/16 mm 6,3/20 mm	Protocole de mesure original (par séchage thermique)	3 par fractions	
	GR 4-2 GNC-2	0/4 mm 10/20 mm			
Essai mécanique Los Angeles	GR 2 GR 4-2	10/14 mm	NF EN 1097-2	3 par fractions	
Essai mécanique Micro Deval	GR 6 GNC-1 GNR		NF EN 1097-1	2 par fractions	
Classification des granulats	GR 1	6,3/13,5	NF EN 933-11	1	
	GR 2	4/8			

		GR 3				
		GR 4	4/10			
	Equivalent de sable	GR 1 GR 2 GR 3 GR 4-1 GNC-1 GNR	0/2 mm	NF EN 933-8	3 par fractions	
	Bleu de méthylène	GR 1 GR 2 GR 3 GR 4-1 GNC-1 GNR	0/2 mm	NF EN 933-9	3 par fractions	
	Essais de prise des éléments fins	GR 1 GR 2 GR 3 GR 4-1 GR 5	0/500 µm	Protocole de mesure original	1	
		GR 1 GR 2 GR 3 GR 4-2 GR 5 GR 6 GR 7-0	0/500 µm		1	
		GR 5 GR 6 GR 7	0/100 µm		1	
		GR7-4100	GR 4-2 GR 7		100/500 µm 0/100 µm	1
		GR8-4	GR 4-2		100/500 µm	
			GR 8 (plâtre)		0/100 µm	
	Détermination de la chaleur d'hydratation	GR 1 GR 2 GR 3 GR 4-1 et (GR 4-2) GR 5 GR 6 GR 7-0	0/4 mm 4/10 mm	NF EN 196-9	1	
		GR7-4 ₅₀₀	GR 4-2		500 µm/4 mm 4/10 mm	1
			GR 7		0/500 µm	
		GR8-4	GR 4-2		500 µm/4 mm 4/10 mm	1
			GR 8		0/500 µm	
			GR 4-2 GNC-2 GR 7-4 ₅₀₀		0/2 mm	1
	Evaluation de la quantité de mortier	GR 2 GR 4-1 ou (GR 4-2) GR 6	4/10 mm	Protocole spécifique	5 par fractions	
10/14 mm						

ANNEXE.6 Détermination des coefficients de courbure Cc et d'uniformité Cu

A.6.1 Coefficients de courbure et d'uniformité déterminés avec les données d'analyse granulométrique par tamisage

Nature des granulats	Désignation	d ₁₀	d ₃₀	d ₆₀	Coefficient de courbure (Cc)	Coefficient d'uniformité (Cu)
Naturels Concassés	GNC-1 : Fraction 0/4 mm	0,18	0,29	0,45	1,04	2,50
	GNC-1 : Fraction 4/8 mm	4,2	4,8	5,7	0,96	1,36
	GNC-1 : Fraction 4/10 mm	4,1	4,7	5,9	0,91	1,44
	GNC-1 : Fraction 8/16 mm	10	12	17	1,03	1,40
	GNC-1 : Fraction 6,3/20 mm	10	12,5	16	0,98	1,60
	GNC-1 : Fraction 0/20 mm	0,26	0,9	12	0,26	46,15
Naturels Roulés	GNR : Fraction 0/4 mm	0,17	0,25	0,6	0,61	3,53
	GNR : Fraction 4/8 mm	4,2	5	6,1	0,98	1,45
	GNR : Fraction 8/16 mm	8,4	10,2	12,2	1,02	1,45
	GNR : Fraction 0/16 mm	0,22	1,3	9,8	0,78	44,55
Recyclés	GR 1 : Fraction 0/4 mm	0,13	0,38	1,01	1,10	7,77
	GR 1 : Fraction 4/8 mm	4,3	4,7	5,7	0,90	1,33
	GR 1 : Fraction 8/16 mm	8,5	9,4	12,5	0,83	1,47
	GR 2 : Fraction 0/4 mm	0,21	0,5	1,25	0,95	5,95
	GR 2 : Fraction 4/8 mm	4,2	4,85	6	0,93	1,43
	GR 2 : Fraction 8/16 mm	8,8	10,1	12,3	0,94	1,40
	GR 3 : Fraction 0/4 mm	0,22	0,57	1,35	1,09	6,14
	GR 3 : Fraction 4/8 mm	4,25	4,8	6	0,90	1,41
	GR 3 : Fraction 8/16 mm	8,7	9,9	12,5	0,90	1,44
	GR 4-1 : Fraction 0/4 mm	0,18	0,45	1,5	0,75	8,33
	GR 4-1 : Fraction 4/8 mm	4,2	5,3	6,5	1,01	1,51
	GR 4-1 : Fraction 4/10 mm	4,2	5,6	7,5	0,99	1,78
	GR 4-1 : Fraction 8/16 mm	10	12	14	1,03	1,40
	GR 4-1 : Fraction 10/20 mm	10,8	13	17	0,92	1,57
	GR 4-1 : Fraction 0/20 mm non fitée	0,38	2,25	13	1,02	34,21
	GR 4-1 : Fraction 0/20 mm fitée	0,34	1,95	12	0,93	35,29
	GR 5 : Fraction 0/4 mm	0,15	0,6	1,7	1,41	11,33
	GR 5 : Fraction 4/8 mm	4,3	5,2	6,5	0,97	1,51
GR 5 : Fraction 8/16 mm	8,8	10	13	0,87	1,48	

A.6.2 Coefficients de courbure et d'uniformité déterminés avec les données d'AG par tamisage (500 µm/4 mm) et d'AG laser (0/500 µm)

Nature des granulats	Désignation	d ₁₀	d ₃₀	d ₆₀	Coefficient de courbure (Cc)	Coefficient d'uniformité (Cu)
Recyclés	GR 1	0,038	0,38	1,01	3,76	26,58
	GR 2	0,044	0,5	1,25	4,55	28,41
	GR 3	0,044	0,57	1,35	5,47	30,68
	GR 4-1	0,06	0,45	1,5	2,25	25,00
	GR 5	0,13	0,6	1,7	1,63	13,08
Naturels	GNC-1	0,185	0,29	0,45	1,01	2,43
	GNR	0,13	0,25	0,6	0,80	4,62

ANNEXE.7 Courbes de Gauss selon le type de granulats et la méthode de mesure employée

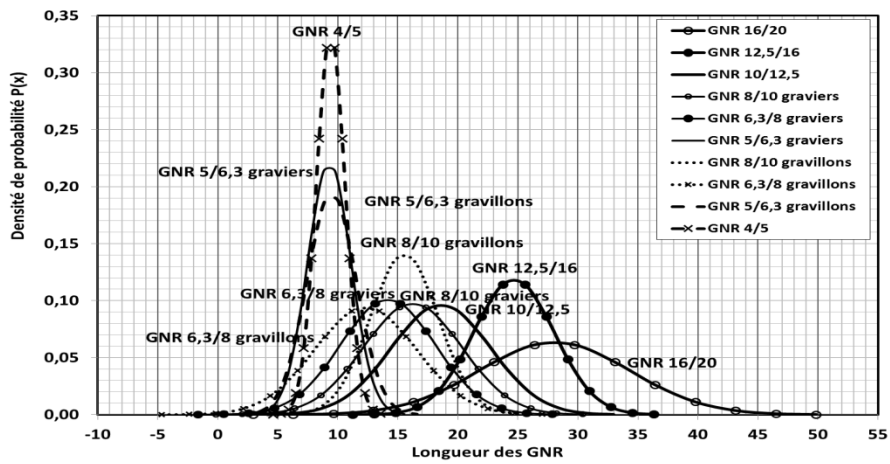


Figure 4: Courbes de Gauss de la longueur des GNR obtenues au pied à coulisse

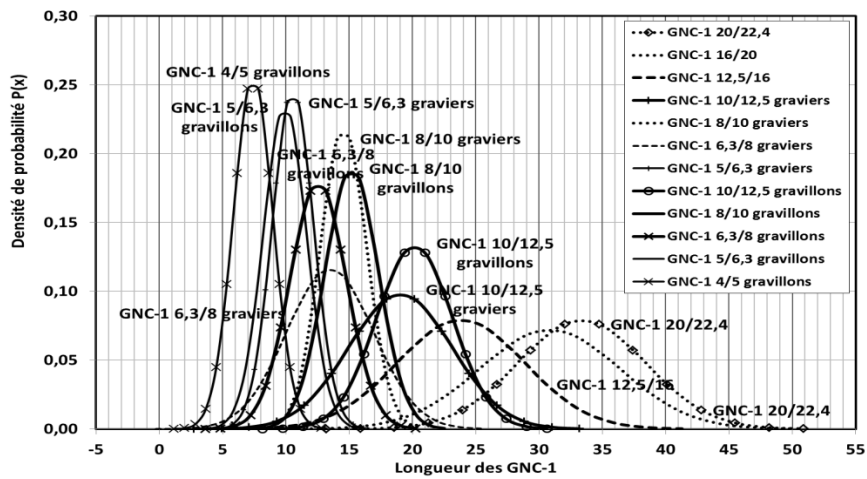


Figure 5: Courbes de Gauss de la longueur des GNC-1 obtenues au pied à coulisse

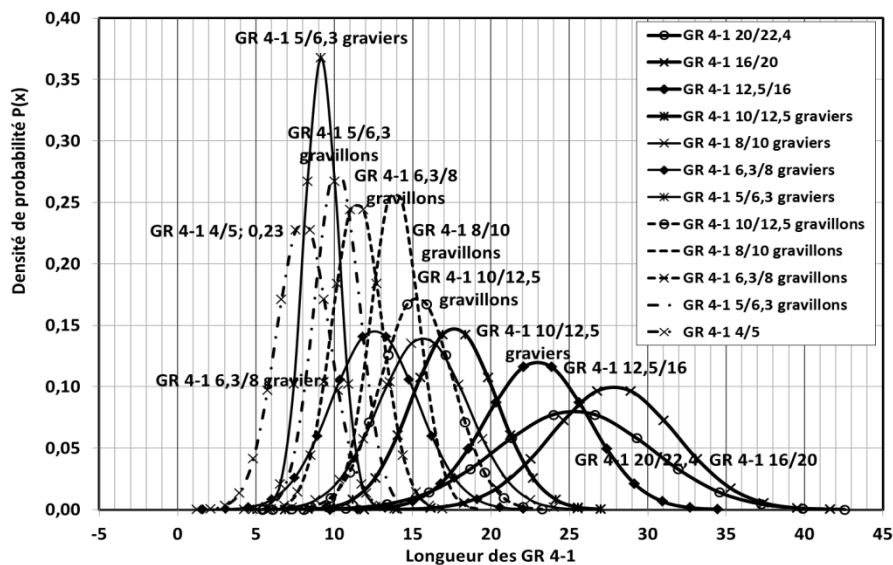


Figure 6: Courbes de Gauss de la longueur des GR 4-1 obtenues au pied à coulisse

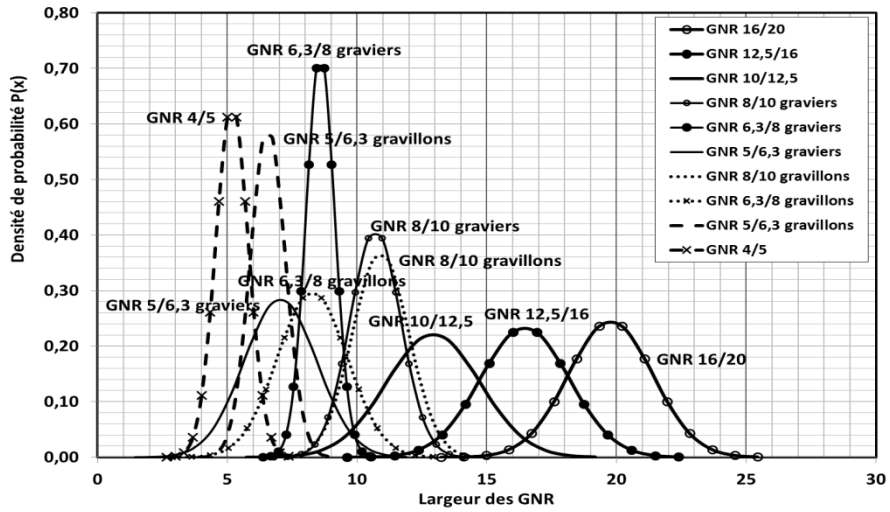


Figure 7: Courbes de Gauss de la largeur des GNR obtenues au pied à coulisse

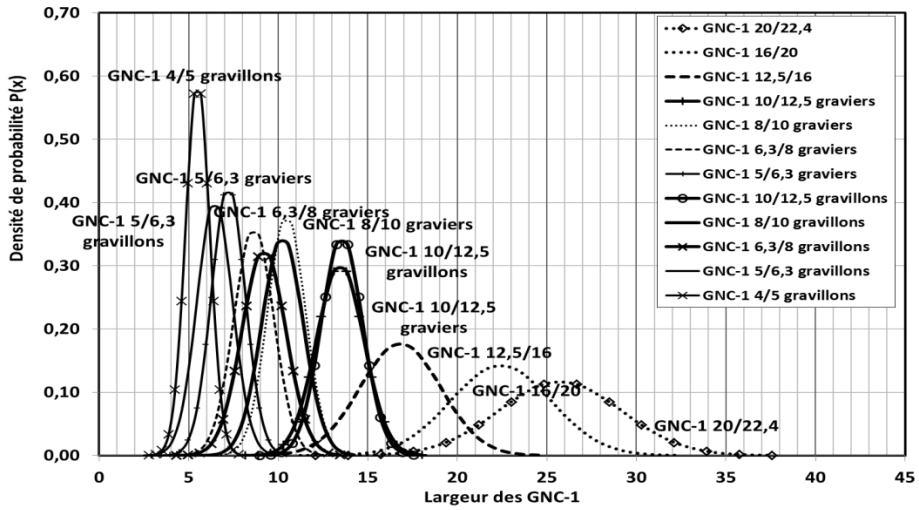


Figure 8: Courbes de Gauss de la largeur des GNC-1 obtenues au pied à coulisse

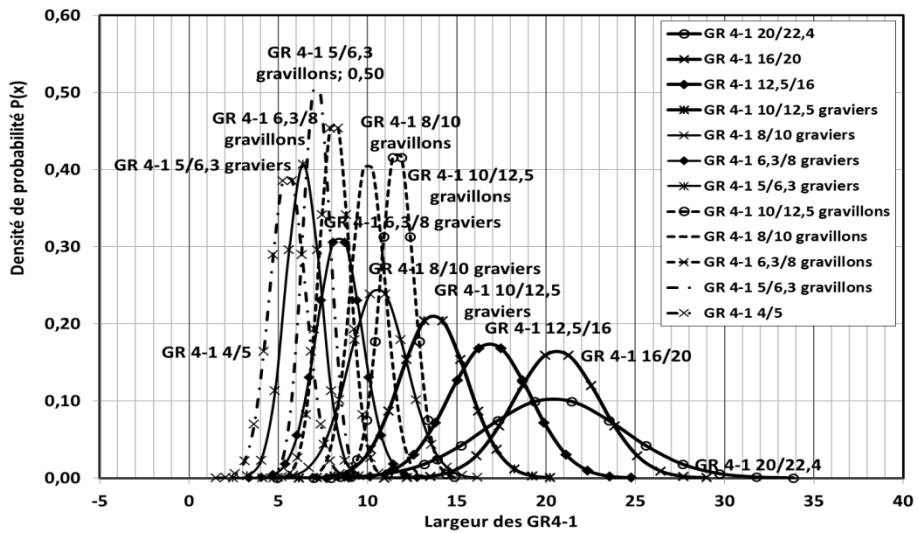


Figure 9: Courbes de Gauss de la largeur des GR 4-1 obtenues au pied à coulisse

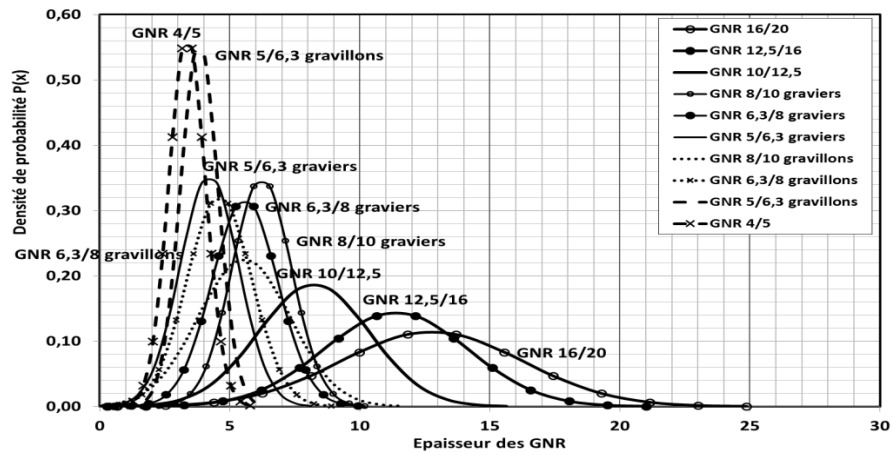


Figure 10: Courbes de Gauss de l'épaisseur des GNR obtenues au pied à coulisse

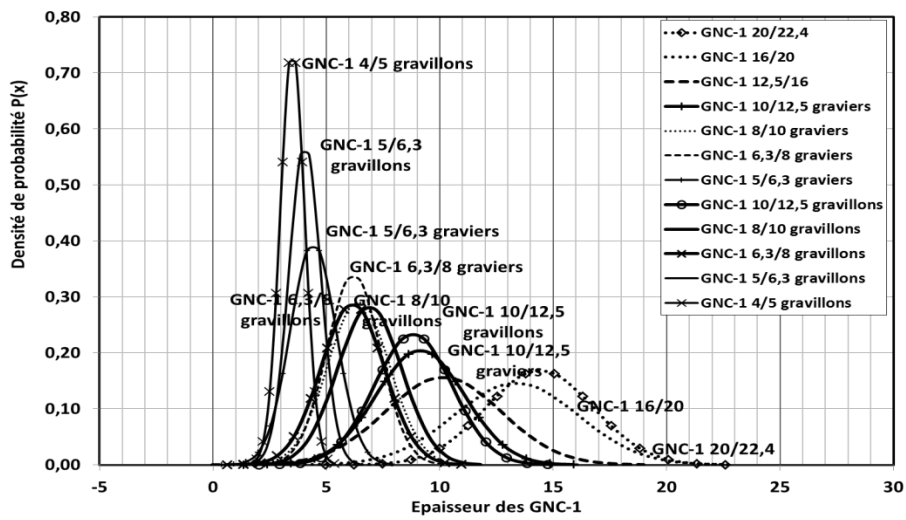


Figure 11: Courbes de Gauss de l'épaisseur des GNC-1 obtenues au pied à coulisse

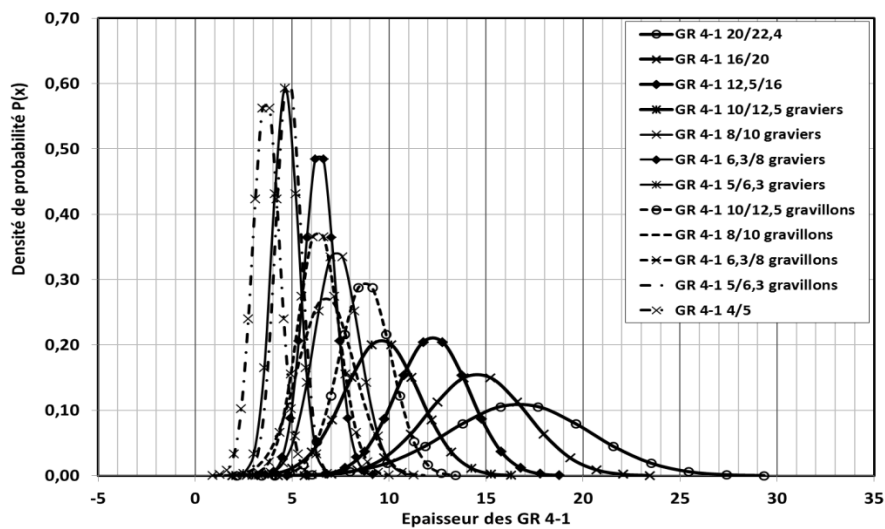


Figure 12: Courbes de Gauss de l'épaisseur des GR 4-1 obtenues au pied à coulisse

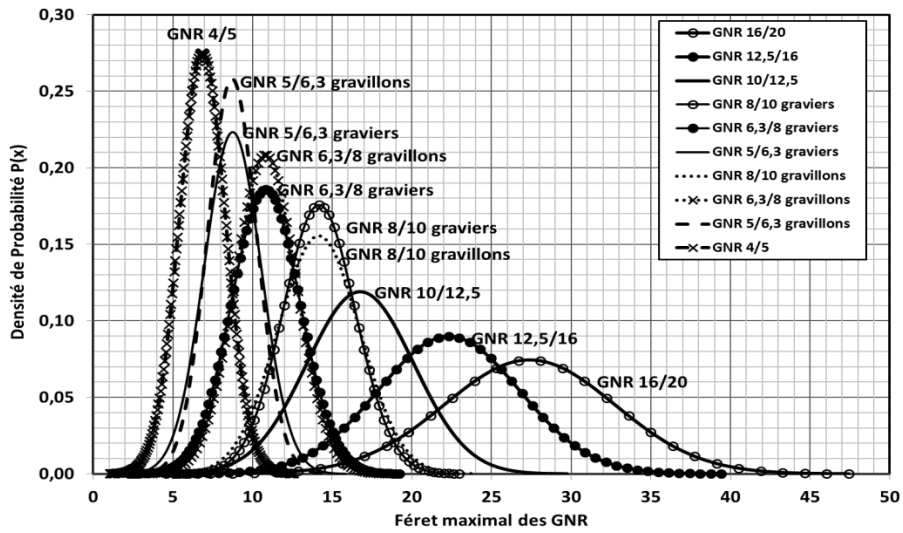


Figure 13: Courbes de Gauss du féret maximal des GNR obtenues par analyse d'images

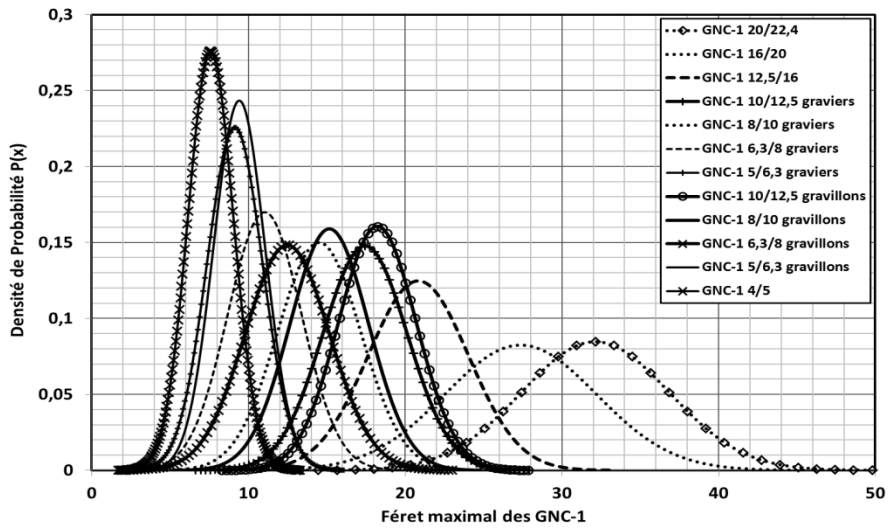


Figure 14: Courbes de Gauss du féret maximal des GNC-1 obtenues par analyse d'images

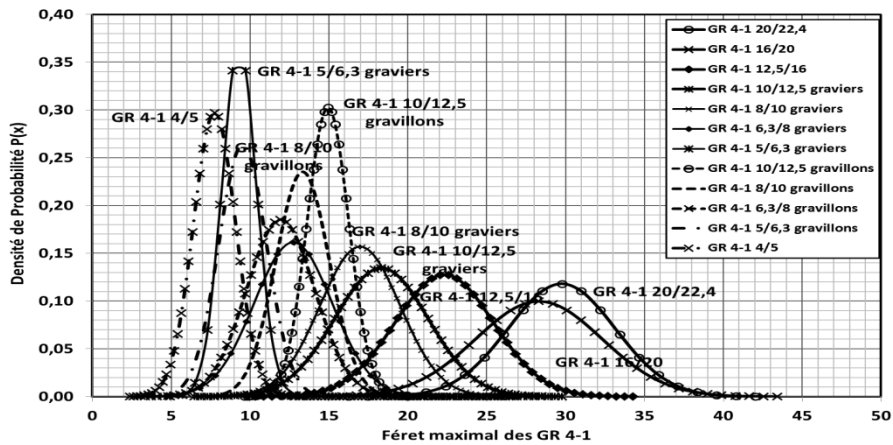


Figure 15: Courbes de Gauss du féret maximal des GR 4-1 obtenues par analyse d'images

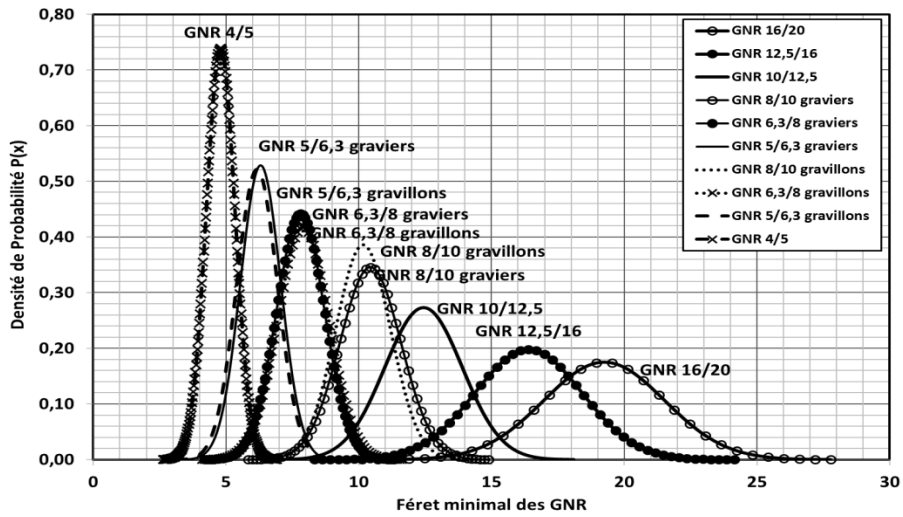


Figure 16: Courbes de Gauss du féret minimal des GNR obtenues par analyse d'images

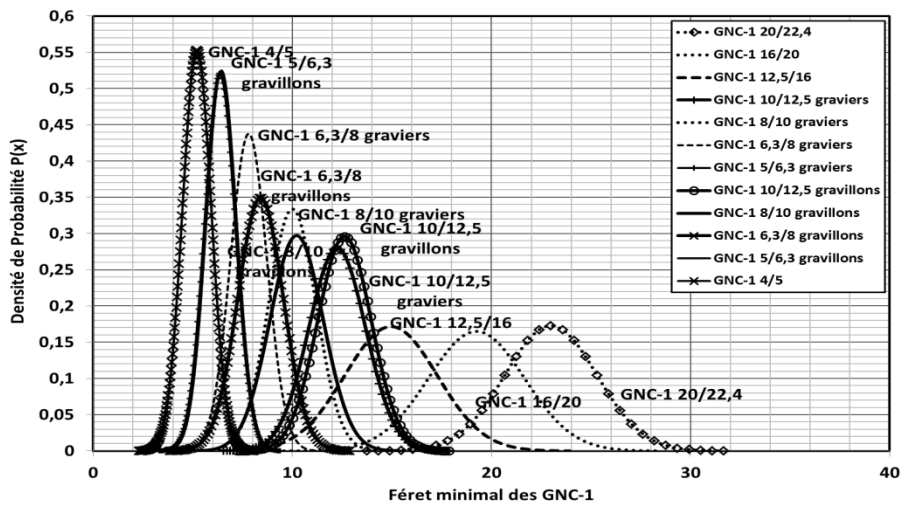


Figure 17: Courbes de Gauss du féret minimal des GNC-1 obtenues par analyse d'images

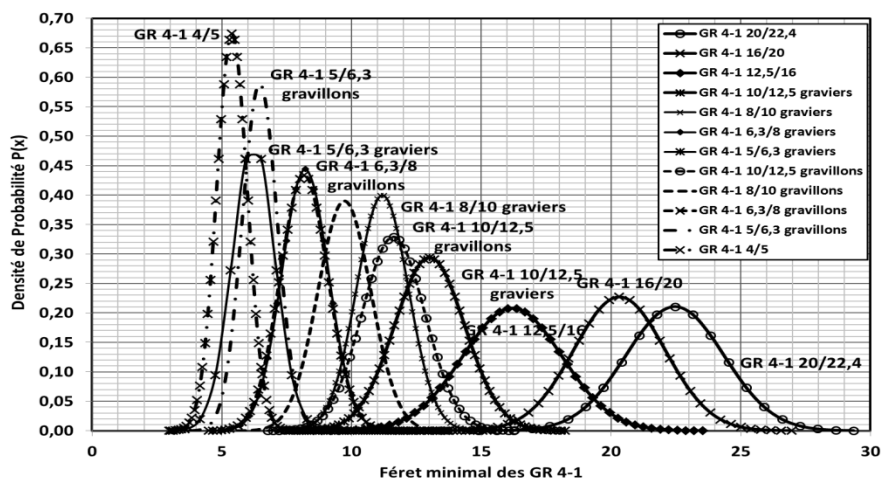


Figure 18: Courbes du féret minimal des GR 4-1 obtenues par analyse d'images

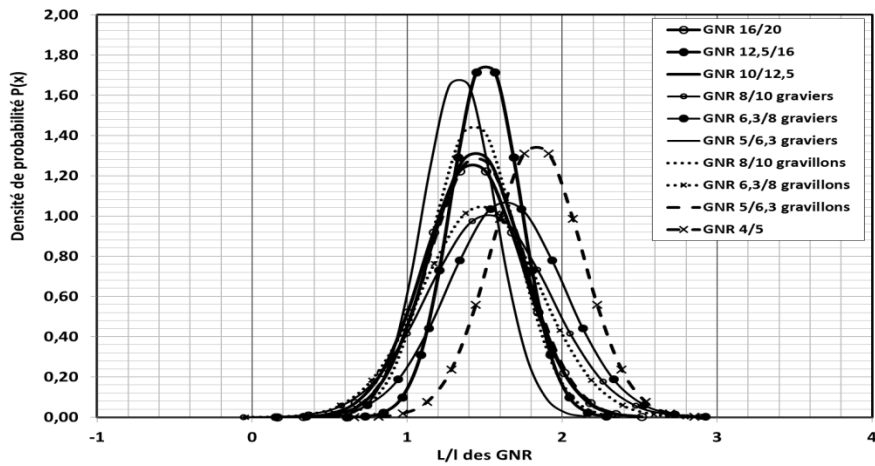


Figure 19: Courbes de Gauss du rapport L/I des GNR obtenues au pied à coulisse

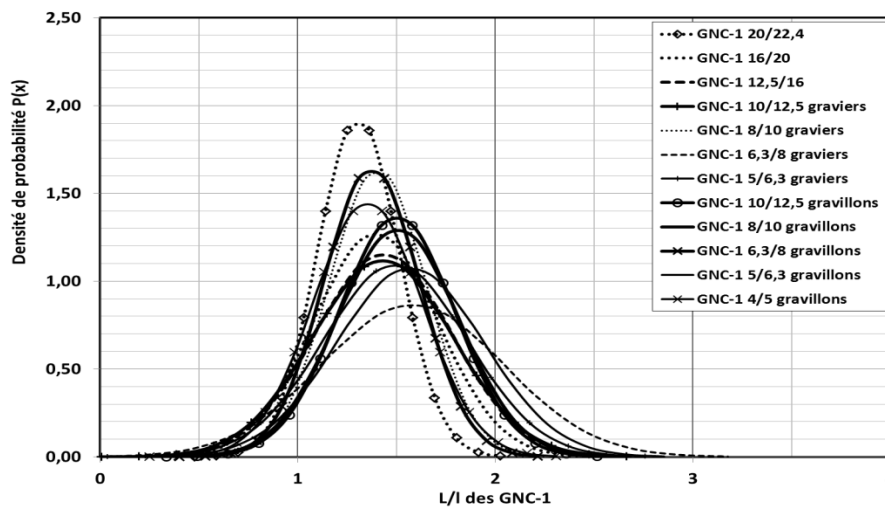


Figure 20: Courbes de Gauss du rapport L/I des GNC-1 obtenues au pied à coulisse

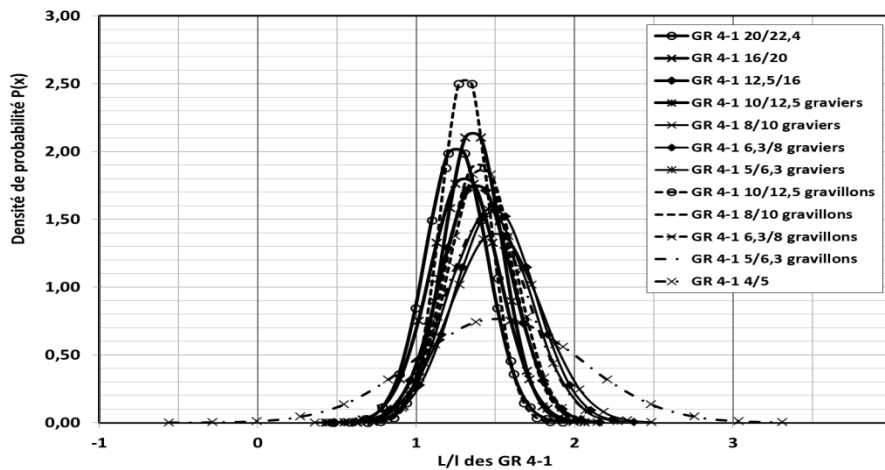


Figure 21: Courbes de Gauss du rapport L/I des GR 4-1 obtenues au pied à coulisse

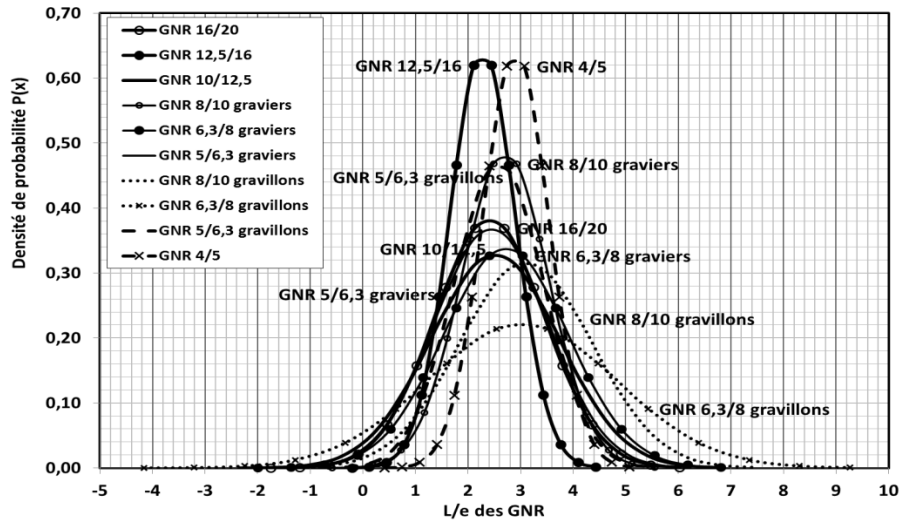


Figure 22: Courbes de Gauss du rapport L/e des GNR obtenues au pied à coulisse

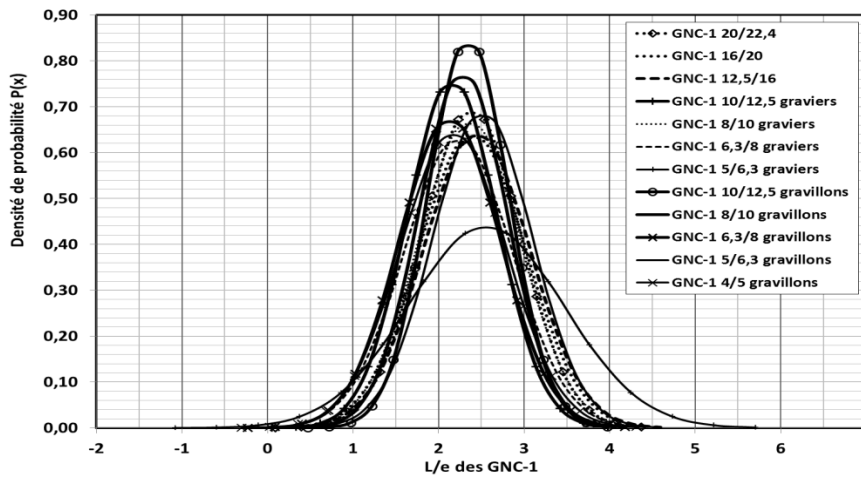


Figure 23: Courbes de Gauss du rapport L/e des GNC-1 obtenues au pied à coulisse

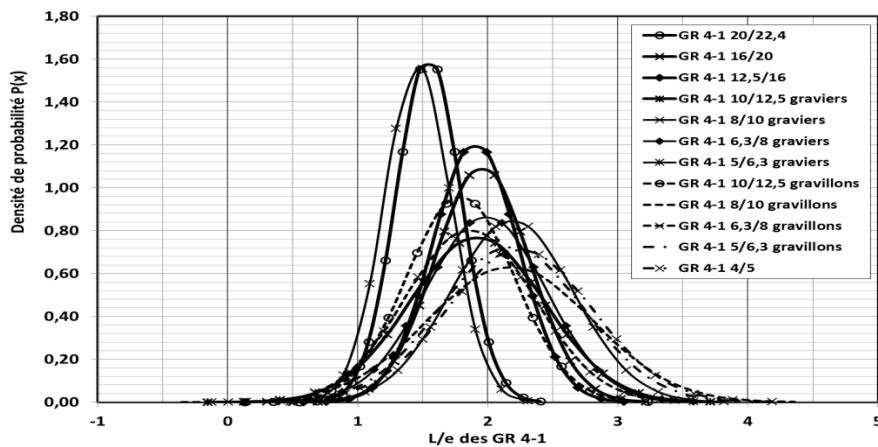


Figure 24: Courbes de Gauss du rapport L/e des GR 4-1 obtenues au pied à coulisse

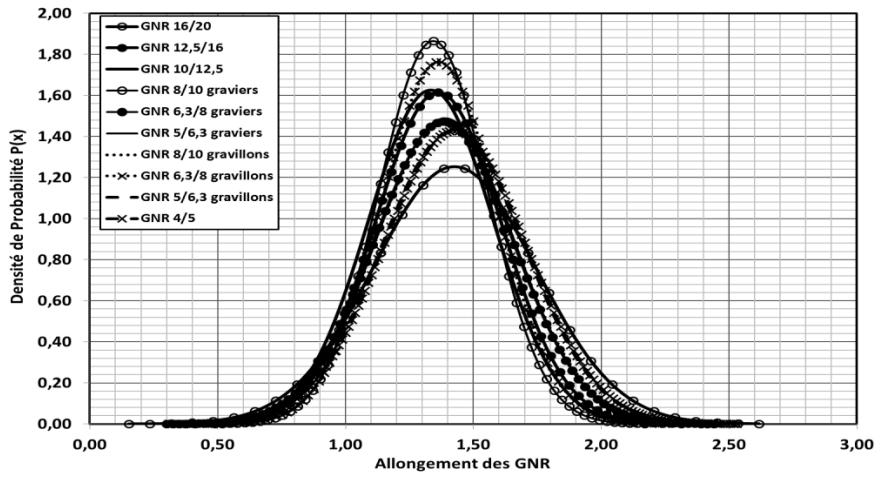


Figure 25: Courbes de Gauss de l'allongement des GNR obtenues par analyse d'images

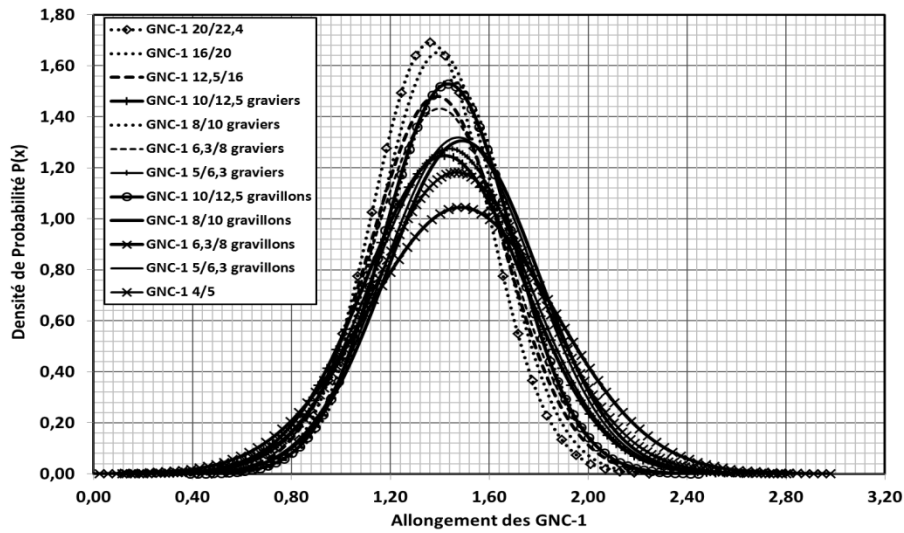


Figure 26: Courbes de Gauss de l'allongement des GNC-1 obtenues par analyse d'images

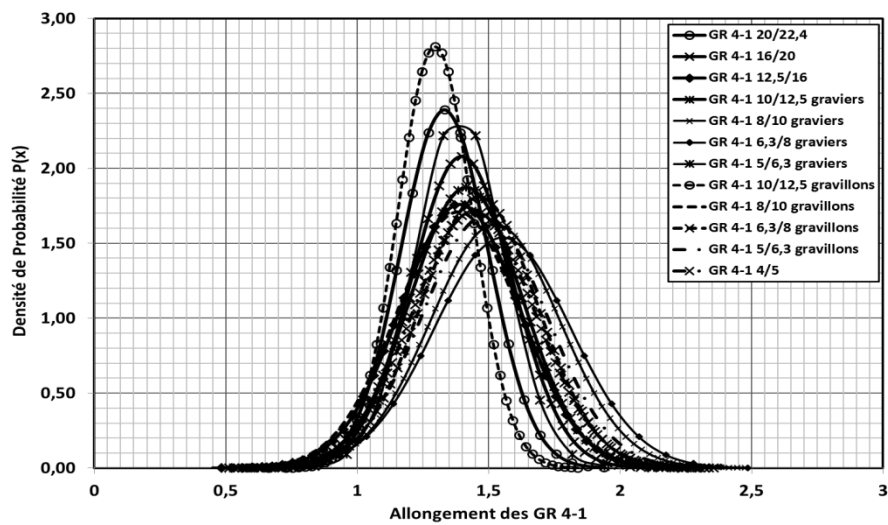


Figure 27: Courbes de Gauss de l'allongement des GR 4-1 obtenues par analyse d'images

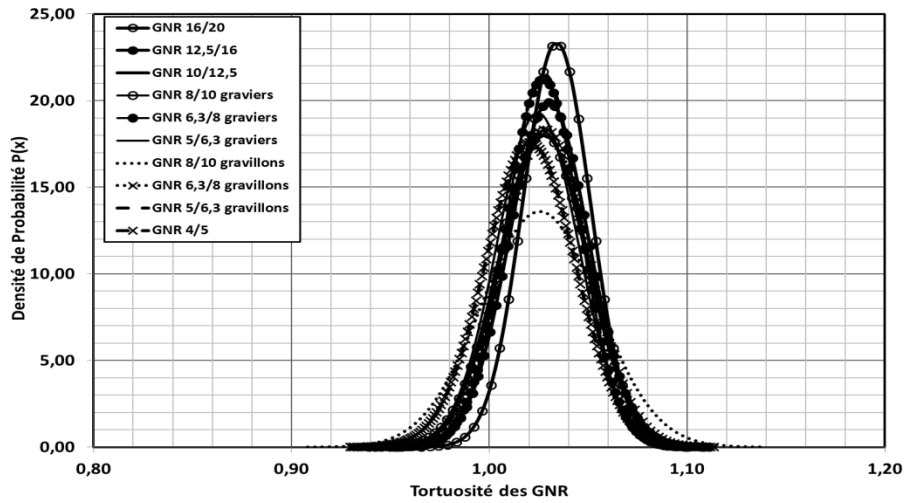


Figure 28: Courbes de Gauss de la tortuosité des GNR obtenues par analyse d'images

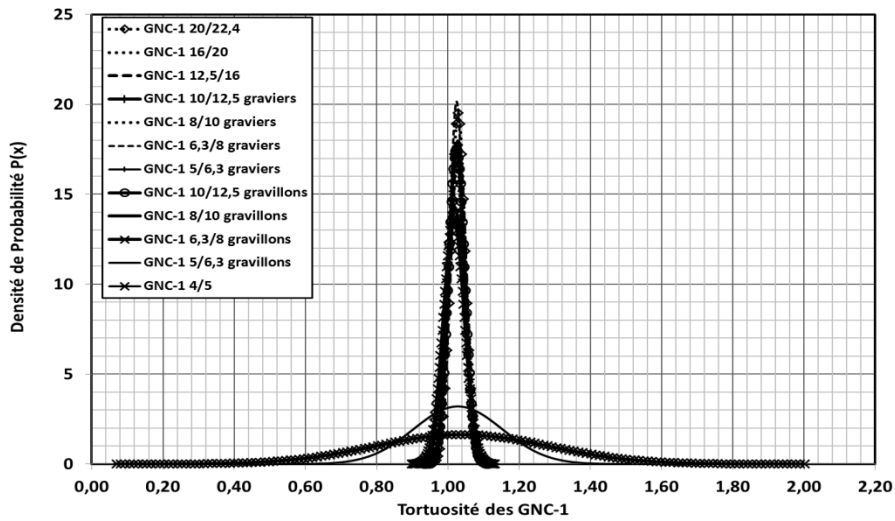


Figure 29: Courbes de Gauss de la tortuosité des GNC-1 obtenues par analyse d'images

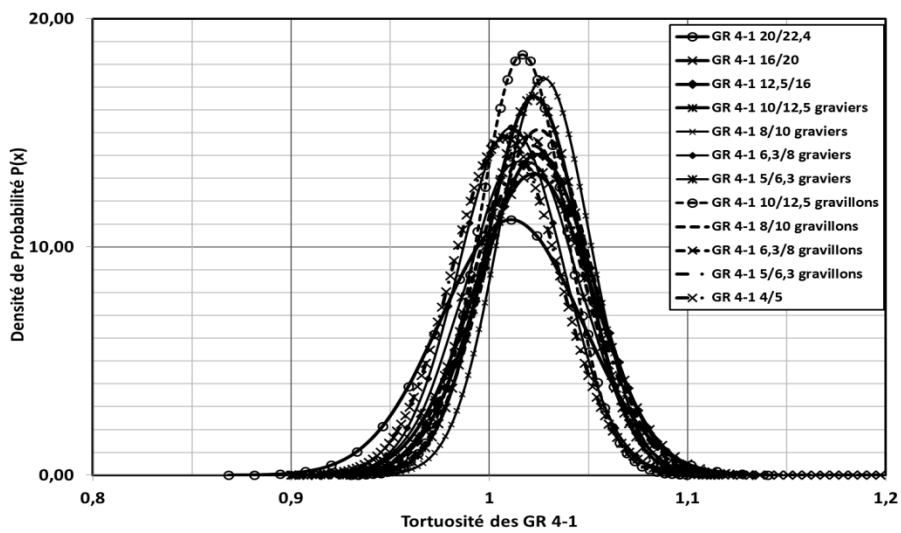


Figure 30: Courbes de Gauss de la tortuosité des GR 4-1 obtenues par analyse d'images

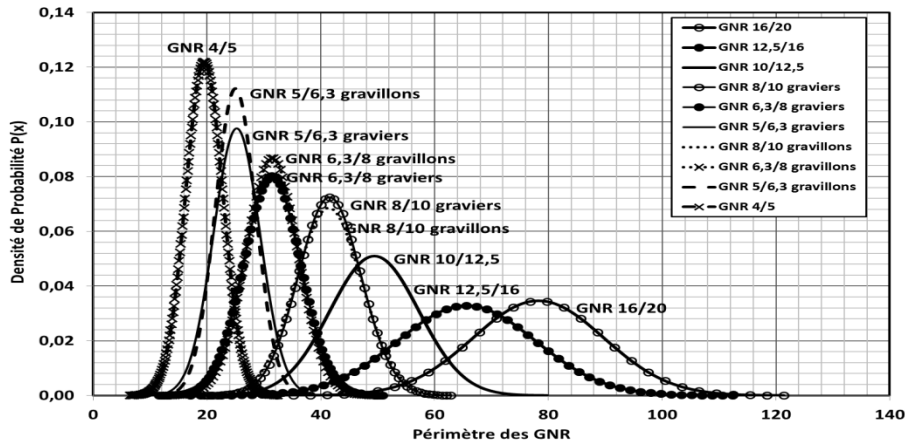


Figure 31: Courbes de Gauss du périmètre des GNR obtenues par analyse d'images

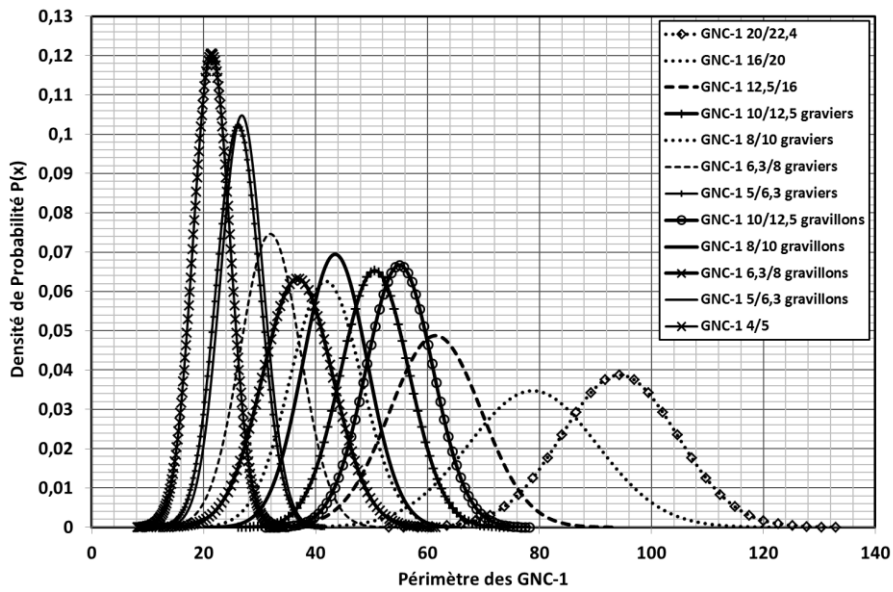


Figure 32: Courbes de Gauss du périmètre des GNC-1 obtenues par analyse d'images

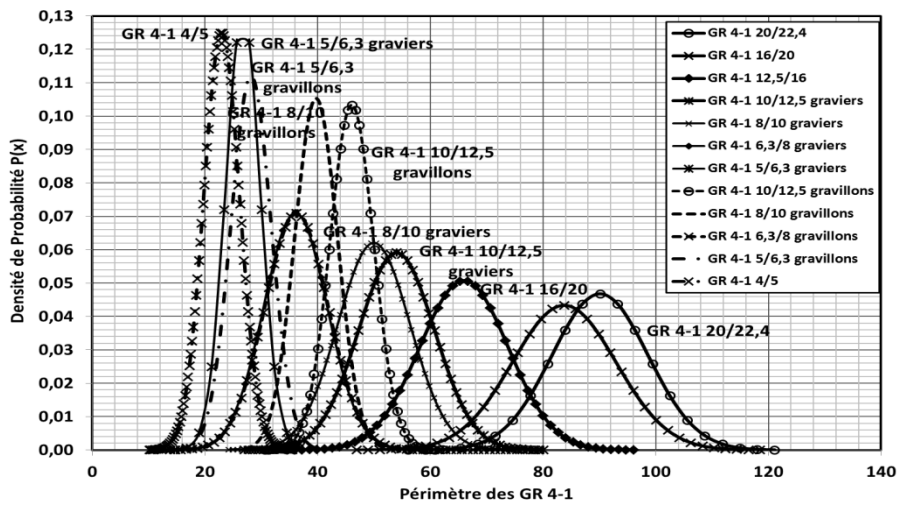


Figure 33: Courbes de Gauss du périmètre des GR 4-1 obtenues par analyse d'images

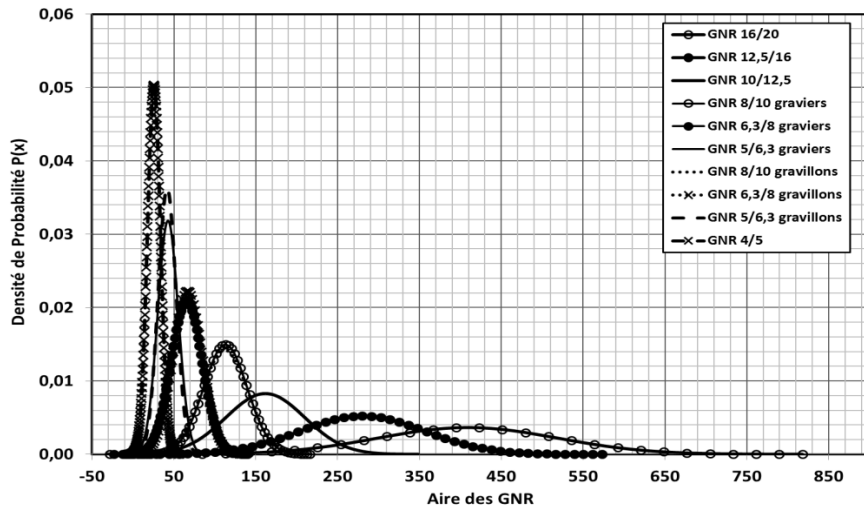


Figure 34: Courbes de Gauss de l'aire des GNR obtenues par analyse d'images

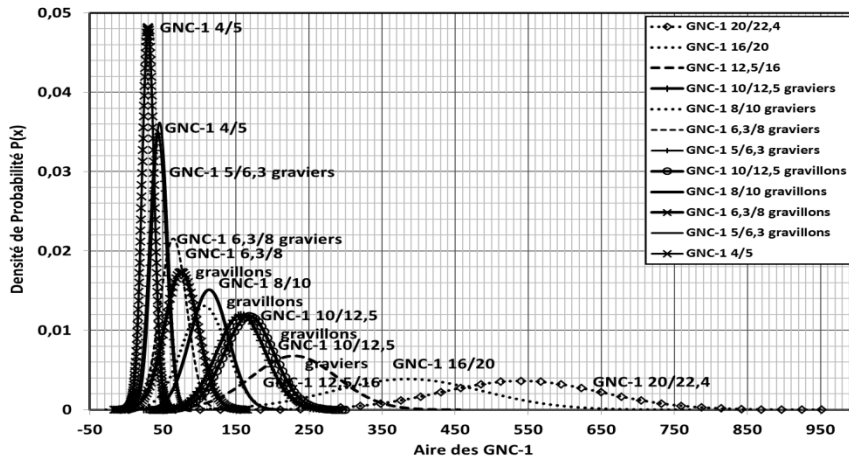


Figure 35: Courbes de Gauss de l'aire des GNC-1 obtenues par analyse d'images

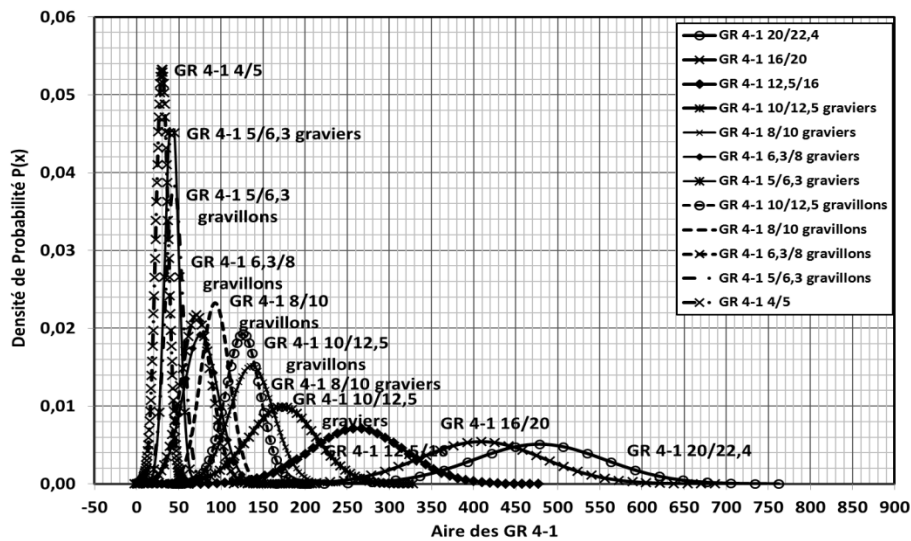


Figure 36: Courbes de Gauss de l'aire des GR 4-1 obtenues par analyse d'images

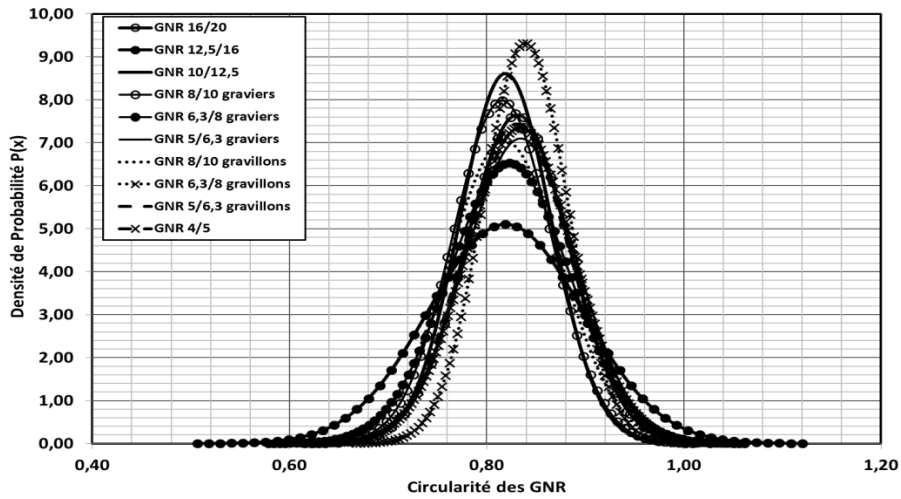


Figure 37: Courbes de Gauss de la circularité des GNR obtenues par analyse d'images

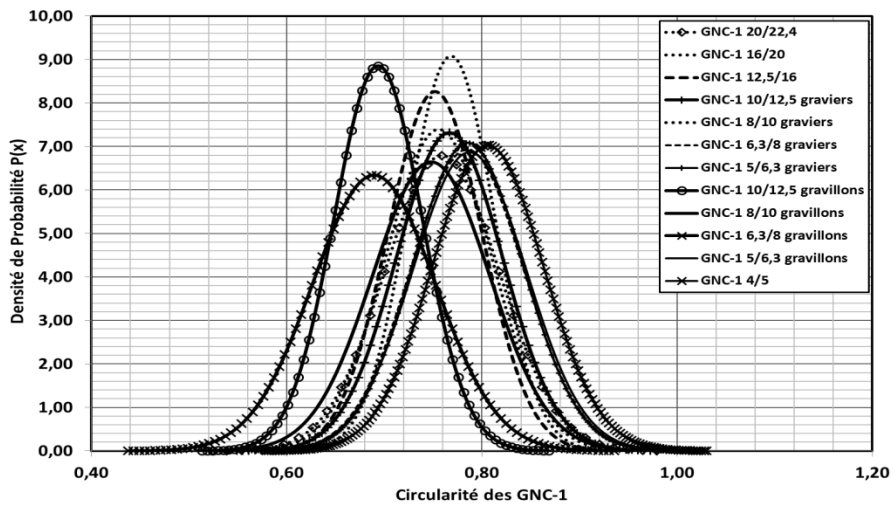


Figure 38: Courbes de Gauss de la circularité des GNC-1 obtenues par analyse d'images

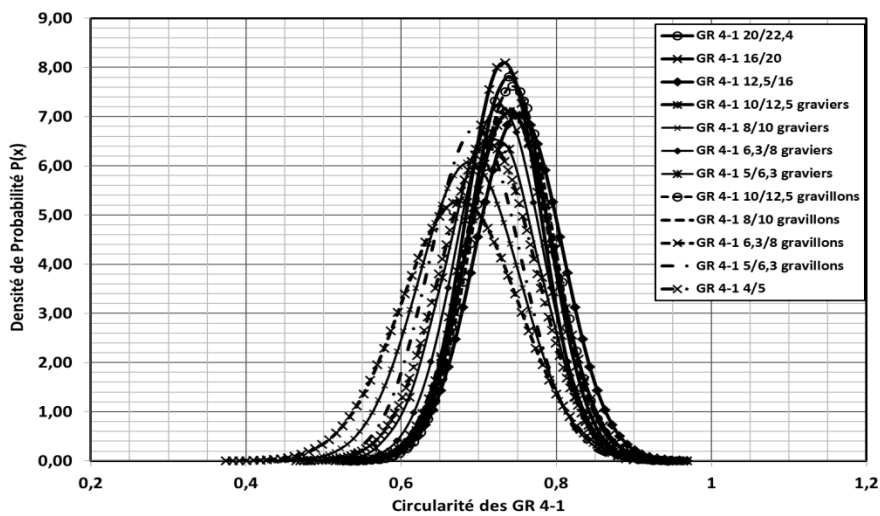


Figure 39: Courbes de Gauss de la circularité des GR 4-1 obtenues par analyse d'images

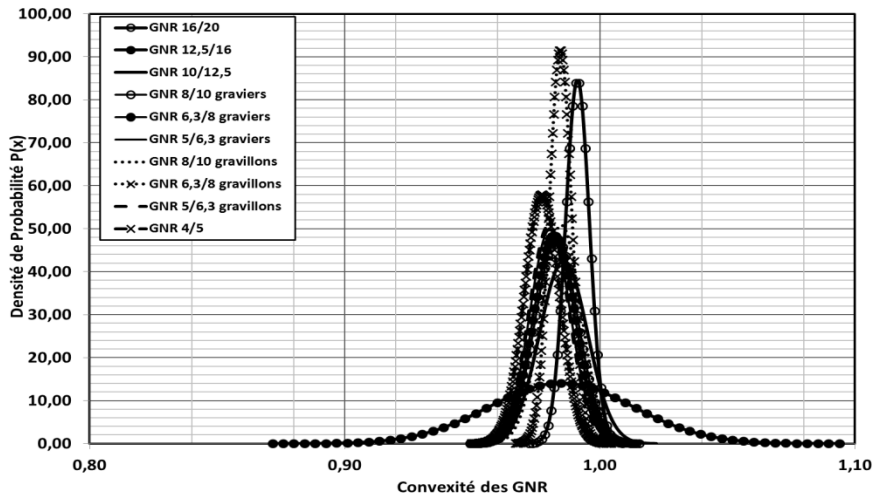


Figure 40: Courbes de Gauss de la convexité des GNR obtenues par analyse d'images

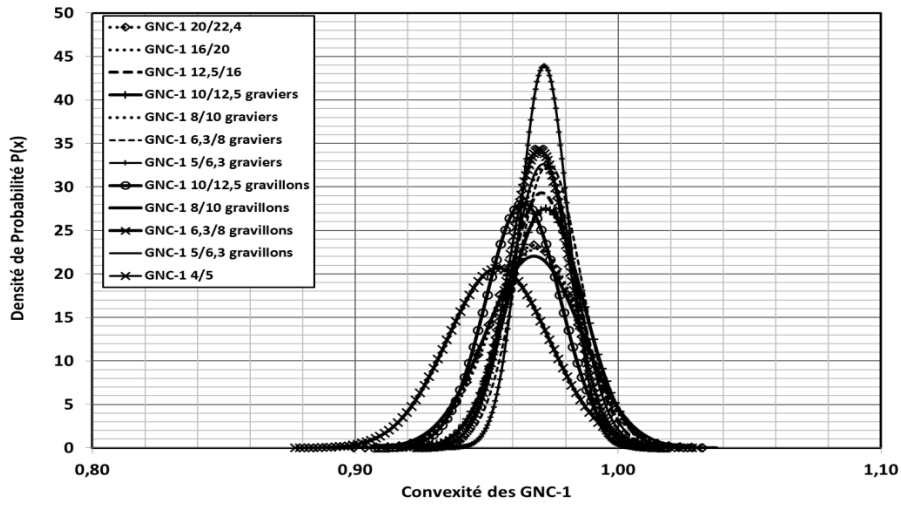


Figure 41: Courbes de Gauss de la convexité des GNC-1 obtenues par analyse d'images

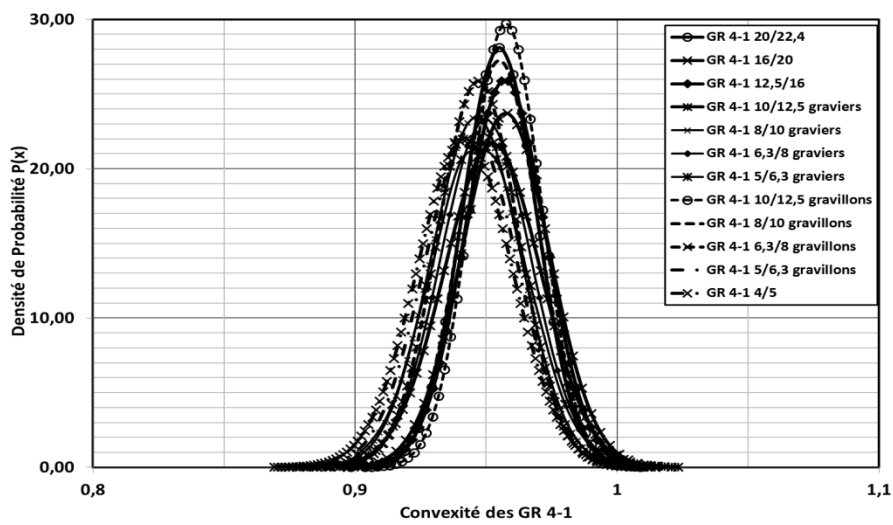


Figure 42: Courbes de Gauss de la convexité des GR 4-1 obtenues par analyse d'images

ANNEXE.8 Tableaux récapitulatifs des résultats de coefficients d'absorption d'eau et de masses volumiques obtenues à l'issu des différentes méthodes

- Coefficient d'absorption

méthode utilisée	Type de granulats	[W] Coefficient d'absorption selon toutes les méthodes [%]					
		Sable		Gravillons		Graviers	
		Valeurs	Ecart-type	Valeurs	Ecart-type	Valeurs	Ecart-type
1	GR 1	7,54	0,33	3,21		3,44	0,29
1	GR 2	12,19	0,41	6,67	0,08	5,52	0,14
2	GR 2	10,96	0,05	6,49	0,1	5,64	0,25
1	GR 3	11,03	0,69	6,8	0,69	5,18	0,42
1	GR 4-1	9,54	1,32	5,32	0,47	5,2	0,4
2	GR 4-2	8,8	0,36	6,57	0,19	5,2	0,4
3	GR 4-1	7,87					
1	GR 5	11,77		6,21	0,25	3,35	0,15
2	GR 6			6,84	0,41		
3						5,07	
1	GNC-1	1,12	0,31	0,41	0,05	0,47	0,03
2	GNC-2	0,98	0,03	1,23	0,3	0,5	0,04
1	GNR	0,8		1		1	
2	GNR	1,06	0,28	2,03	0,02	1,43	0,06
2	GR 4-1 adjuvanté	9,69		5,6	0,22	5,33	
2	GR 4-2 adjuvanté	8,43	0,97				
2	GNC-1 adjuvanté			1,35	0,32		
2	GR 4-1 + eau	9,31				6,9	
2	GR 4-1 + fines	8,43				9,03	
2	GR 4-1 + adjuvant + fines	10,07				9,69	

- Masse volumique réelles après séchage à l'étuve [pord]

Méthode utilisée	Type de granulats	[pord] Masse volumiques réelles déterminées après séchage en étuve selon toutes les méthodes [g/cm ³]					
		Sable		Gravillons		Graviers	
		Valeurs	Ecart-type	Valeurs	Ecart-type	Valeurs	Ecart-type
1	GR 1	2,18	0,02	2,44		2,43	0,29
1	GR 2	1,97	0,02	2,22	0	2,25	0,02
2	GR 2	2,24	0,12	2,32	0,06	2,28	0,02
1	GR 3	1,99	0,01	2,22	0,04	2,29	0,02
1	GR 4-1	2	0,04	2,29	0,02	2,26	0,02
2	GR 4-1	2,2	0,05	2,28	0,08	2,28	0,01

3	GR 4-1	1,99					
1	GR 5	2,01		2,27	0,03	2,43	0,01
2	GR 6			2,3	0,09		
3						2,33	
1	GNC-1	2,58	0,02	2,73	0,01	2,72	0,01
2	GNC-2	2,62	0,2	2,94	0,31	2,87	0
1	GNR	2,63		2,59		2,59	
2	GNR	2,86	0,21	2,57	0,08	2,58	0,02
2	GR 4-1 adjuvanté	2,16	0,03				
2	GR 4-2 adjuvanté			2,27	0,01		
2	GNC-1 adjuvanté			2,66	0,02		

Méthode 3 : Fractions	GR 4 0,063/4	GR 4 0,315/4	GR 4 1,25/4
Masse volumique réelle après séchage [g/cm ³]	2,15	2,17	2,30
Coefficient absorption [%]	7,24	6,48	4,62

- **Masse volumique réelles saturée à surface sèche [qssd]**

Méthode utilisée	Type de granulats	[qssd] Masse volumiques réelles saturée à surface sèche selon toutes les méthodes [g/cm ³]					
		Sable		Gravillons		Graviers	
		Valeurs	Ecart-type	Valeurs	Ecart-type	Valeurs	Ecart-type
1	GR 1	2,35	0,01			2,51	0,01
1	GR 2	2,21	0,02	2,23	0	2,38	0,01
2	GR 2	2,48	0,13	2,47	0,06	2,41	0,02
1	GR 3	2,21	0	2,37	0,02	2,41	0
1	GR 4-1	2,19	0,03	2,41	0,01	2,38	0
2	GR 4-1	2,39	0,05	2,43	0,09	2,4	0
1	GR 5	2,24		2,41	0,03	2,51	0
2	GR 6			2,46	0,1		
3						2,45	
1	GNC-1	2,6	0,01	2,75	0,01	2,73	0,01
2	GNC-2			2,97	0,31	2,89	0
2	GNR	2,89	0,2	2,62	0,08	2,62	0,01
2	GR 4-1 adjuvanté	2,34	0,02				
2	GR 4-2 adjuvanté			2,4	0,02		
2	GNC-1 adjuvanté			2,69	0,01		

- Masse volumique absolue [ρa]

Méthode utilisée	Type de granulats	[ρa] Masse volumiques absolue selon toutes les méthodes [g/cm ³]					
		Sable		Gravillons		Graviers	
		Valeurs	Ecart-type	Valeurs	Ecart-type	Valeurs	Ecart-type
1	GR 1	2,61	0			2,65	0
1	GR 2	2,58	0,02	2,61	0	2,57	0,02
2	GR 2	2,97	0,21	2,73	0,08	2,62	0,02
1	GR 3	2,55	0,02	2,62	0,01	2,6	0,01
1	GR 4-1	2,46	0,08	2,61	0,03	2,57	0,03
2	GR 4-1	2,73	0,05	2,69	0,11	2,59	0
1	GR 5	2,63		2,64	0,05	2,63	0,01
2	GR 6			2,73	0,12		
3						2,64	
1	GNC-1	2,65	0,01	2,77	0	2,75	0,01
2	GNC-2			3,05	0,32	2,92	0
2	GNR	2,95	0,2	2,71	0,09	2,68	0,01
2	GR 4-1 adjuvanté	2,64	0,02				
2	GR 4-2 adjuvanté			2,6	0,02		
2	GNC-1 adjuvanté			2,75	0,01		

ANNEXE.9 Tableaux récapitulatifs des compositions de bétons et de mortier de béton équivalent

A.9.1 Composition de bétons

Paramètres étudiés	Tableau récapitulatif des compositions de bétons formulées				
	Compositions étudiées	Détails des compositions	Adjuvants et dosage	Eeff /C	Compacité
Sans adjuvant	BGNR_2-1-0,65	BGNR formulé sans adjuvant.	X	0,65	0,8
	BGNR_3-1-0,76		X	0,76	//
	BGNC_2-3-0,65	BGNC formulé sans adjuvant	X	0,65	//
	BGNC_3-3-0,76	BGNC formulé sans adjuvant	X	0,76	//
	BGR_2-5-0,65	BGR formulé sans adjuvant	X	0,65	//
	BGR_3-5-0,76	BGR formulé sans adjuvant	X	0,76	//
Screening des BGNC	BGNC_1-3-0,65	BGNC	EPB 013 à 0,8%	0,65	//
	BGNC_014-0,72%	//	EPB 014 à 0,72%	//	//
	BGNC_025-0,56%	//	EPB 025 à 0,56%	//	//
	BGNC_026-0,8%	//	EPB 026 à 0,8%	//	//
	BGNC_027-0,72%	//	EPB 027 à 0,72%	//	//
	BGNC_029-1,04%	//	EPB 029 à 1,04%	//	//
	BGNC_013-0,8%-011-0,4%	//	EPB 013 à 0,8% et EPB 011 à 0,4%	//	//
Screening des BGR	BGR_1-5	BGR formulé en utilisant le squelette granulaire superposé sur celui des GNC	EPB 013 à 1,2%	//	//
	BGRS_001-1,0%	//	EPB 001 à 1,0%	//	//
	BGRS_013-1,0%	//	EPB 013 à 1,0%	//	//
	BGRS_014-1,0%	//	EPB 014 à 1,0%	//	//
	BGRS_017-1,0%	//	EPB 017 à 1,0%	//	//
	BGRS_018-1,0%	//	EPB 018 à 1,0%	//	//
	BGRS_001-1,2%	//	EPB 001 à 1,2%	//	//

BGRS_014-0,9%	//	EPB 014 à 0,9%	//	//
BGRS_018-1,2%	//	EPB 018 à 1,2%	//	//
BGRS_018-1,4%	//	EPB 018 à 1,4%	//	//
BGRS_001-1,2%- 011-0,4%	//	EPB 001 à 1,2% et EPB 011 à 0,4%	//	//
BGRS_013-1,0%- 011-0,4%	//	EPB 013 à 1,0% et EPB 011 à 0,4%	//	//
BGRS_014-0,9%- 011-0,4%	//	EPB 014 à 0,9% et EPB 011 à 0,4%	//	//
BGRS_017-1,0%- 011-0,4%	//	EPB 017 à 1,0% et EPB 011 à 0,4%	//	//
BGRS_018-1,4%- 011-0,4%	//	EPB 018 à 1,4% et EPB 011 à 0,4%	//	//
BGRS_025-0,8%	//	EPB 025 à 0,8%	//	//
BGRS_026-0,9%	//	EPB 026 à 0,9%	//	//
BGRS_027-1,0%	//	EPB 027 à 1,0%	//	//
BGRS_028-0,8%	//	EPB 028 à 0,8%	//	//
BGRS_029-1,5%	//	EPB 029 à 1,5%	//	//
BGRS_025-0,7%	//	EPB 025 à 0,7%	//	//
BGRS_026-1,0%	//	EPB 026 à 1,0%	//	//
BGRS_027-0,9%	//	EPB 027 à 0,9%	//	//
BGRS_025- 0,7%_07012014	//	EPB 025 à 0,7%	//	//
BGRS_026- 1,0%_07012014	//	EPB 026 à 1,0%	//	//
BGRS_027- 0,9%_07012014	//	EPB 027 à 0,9%	//	//
BGRS_029-1,3%	//	EPB 029 à 1,3%	//	//
BGRS_025-0,7%- 029-0,6%	//	EPB 025 à 0,7% et EPB 029 à 0,6%	//	//

	BGRS_025-0,7%-029-0,4%	//	EPB 025 à 0,7% et EPB 029 à 0,4%	//	//
	BGRS_025-0,5%-029-0,6%	BGR formulé en utilisant le squelette granulaire superposé sur celui des GNC	EPB 025 à 0,5% et EPB 029 à 0,6%	//	//
Modification du squelette	BGR_014-c0,8	BGR formulé en utilisant le squelette granulaire obtenu du Dreux	EPB 014 à 0,9%	//	0,8
	BGR_014-c0,7			//	0,75
	BGR_013-c0,8	BGR formulé en utilisant le squelette granulaire non modifié	EPB 013 à 1%	//	0,8
	BGR_013-c0,7			//	0,75
	BGR-0/1mm-1/4mm	BGR formulé avec le squelette granulaire massique du granulat recyclé dont la fraction 0/4 mm a été scindée en deux : 0/1 mm et 1/4 mm.	EPB 014 à 0,9%	//	0,8
	BGRS_014	BGR formulé en utilisant le squelette granulaire superposé sur celui des GNC	//	//	//
	BGRS_013	//	EPB 013 à 1,0%	//	//
Modification de la fraction sableuse	BGRS-014+SNC	BGR formulé avec du sable recyclé substitué par du SNC	EPB 014 à 0,9%	//	//
	BGRS-014+SNR	BGR formulé avec du sable recyclé substitué par du SNR		//	//
	BGRS_014	BGR formulé en utilisant le squelette granulaire superposé sur celui des GNC		//	//
	BGRS-014-63µm/4mm	BGR sur lequel les éléments inférieurs à 63µm ont été enlevés.		//	//
Modification du dosage en ciment	BGNC_014-C300	BGNC formulé en modifiant le dosage du ciment	EPB 014 à 0,72%	//	//
	BGRS_014-C300	BGR formulé en modifiant le dosage du ciment	EPB 014 à 0,9%	//	//
	BGNC_014-C260	BGNC de référence	EPB 014 à 0,72%	//	//
	BGRS_014-C260	BGR formulé de référence	EPB 014 à 0,9%	//	//
Modification de mise en œuvre	BGR-Gsat+EP24h	BGR formulé avec des granulats préalablement saturés avec l'eau de prémouillage 24 heures avant le malaxage.	//	//	//
	BGR-(Gsat+EP+A)24h	BGR formulé avec des granulats préalablement saturés avec l'eau de prémouillage et de l'adjuvant 24 heures avant le malaxage.	//	//	//
	BGR-(G+EP+A)5min	BGR sur lequel l'adjuvant est introduit avec l'eau de pré	//	//	//

		humidification 5 minutes avant le malaxage.			
	BGR-(A)90sec	BGR sur lequel l'adjuvant est introduit sans être mélangé avec de l'eau. Il est introduit 2 minutes avant la fin du malaxage.	//	//	//
	BGR-E+A-C-Gsat24h	BGR sur lequel l'ensemble adjuvant + eau puis le ciment sont introduits en premier, ensuite les granulats saturés.	//	//	//
	BGR-E+A-C-Gnonsat	BGR sur lequel l'ensemble adjuvant + eau puis le ciment sont introduits en premier, ensuite les granulats non saturés	//	//	//
	BGR-G-EA-C	BGR sur lequel les granulats sont introduits + eau de pré humidification en premier, ensuite l'eau de gâchage adjuvantée puis en dernier du ciment	//	//	//
	BGRS_014	BGR formulé en utilisant le squelette granulaire superposé sur celui des granulats naturels concassés.	//	//	//

A.9.2 Composition de mortiers de bétons équivalents

Paramètres étudiés	Tableau récapitulatif des compositions de bétons formulées			
	Compositions étudiées	Détails des compositions	Adjuvants et dosage	Eeff/C
Sans adjuvant non corrigé	MBEGNR_2-2-0,65	MBE correspondant aux BGNR réalisé sans adjuvant. 0% de corrections en sables a été effectué.	//	0,65
	MBEGNR_3-2-0,76		//	0,76
	MBEGNC_2-4-0,65	MBE correspondant aux BGNC réalisé sans adjuvant. 0% de corrections en sables a été effectué.	//	0,65
	MBEGNC_3-4-0,76		//	0,76
	MBEGR_2-6 -0,65	MBE correspondant aux BGR réalisé sans adjuvant. 0% de corrections en sables a été effectué.	//	0,65
	MBEGR_3-6-0,76		//	0,76
Avec adjuvant non corrigé	MBEGNR_1-2-0,65	MBE correspondant aux BGNR sur lesquels l'adjuvant est introduit avec l'eau de gâchage. 0% de corrections en sables a été effectué.	EPB 013 à 0,5%	0,65
	MBEGNC_1-4-0,65	MBE correspondant aux BGNC sur lesquels l'adjuvant est introduit avec l'eau de gâchage. 0% de corrections en sables a été effectué.	EPB 013 à 0,8%	0,65
	MBEGR_1-6-0,65	MBE correspondant aux BGR sur lesquels l'adjuvant est introduit avec l'eau de gâchage. 0% de corrections en sables a été effectué.	EPB 013 à 1,2%	0,65
Sans adjuvant corrigé	MBEGR+13%_013-0%	MBE correspondant aux BGR réalisé sans adjuvant. 13% de corrections en sables a été effectué.		//
Screening	MBEGNC+0%_013-0,8%	MBE correspondant aux BGNC sur lesquels l'adjuvant est introduit avec l'eau de gâchage. 0% de corrections en sables a été effectué.	EPB 013 à 0,8%	0,8

	MBEGNC_025-0,56%	//	EPB 025 à 0,56%	//
	MBEGNC_027-0,72%	//	EPB 027 à 0,72%	//
	MBEGNC_029-1,04%	//	EPB 029 à 1,04%	//
	MBEGNC_013-0,8%_011-0,4%	//	EPB 013 à 0,8% et EPB 011 à 0,4%	//
	MBEGNC_026-0,6%	//	EPB 026 à 0,6%	//
Screening des MBEGR	MBEGRS_001-1,2%	MBE correspondant aux BGR sur lesquels l'adjuvant est introduit avec l'eau de gâchage. 13% de corrections en sables a été effectué	EPB 001 à 1,2%	//
	MBEGRS_013-1%	//	EPB 013 à 1,0%	//
	MBEGRS_014-0,9%	//	EPB 014 à 0,9%	//
	MBEGRS_017-1%	//	EPB 017 à 1%	//
	MBEGRS_018-1,4%	//	EPB 018 à 1,4%	//
	MBEGRS_001-1,2%_011-0,4%	//	EPB 001 à 1,2% et EPB 011 à 0,4%	0,65
	MBEGRS_025-0,7%	//	EPB 025 à 0,7%	//
	MBEGRS_026-1%	//	EPB 026 à 1%	//
	MBEGRS_027-0,9%	//	EPB 027 à 0,9%	//
	MBEGRS_028-0,8%	//	EPB 028 à 0,8%	//
	MBEGRS_029-1,3%	//	EPB 029 à 1,3%	//
	MBEGRS_025-0,8%	//	EPB 025 à 0,8%	//
	MBEGRS_026-0,9%	//	EPB 026 à 0,9%	//

Modification du dosage en ciment	MBEGR-014_63µm/4mm	MBEGR correspondant aux BGR sur lequel les éléments inférieurs à 63µm ont été enlevés.	EPB 014 à 0,9%	//
	MBEGNC-014-C300	MBE correspondant aux BGNC formulés en modifiant le dosage en ciment	EPB 014 à 0,72%	//
Modification de la mise en œuvre	MBEGR-014-C300	MBE correspondant aux BGR formulés en modifiant le dosage en ciment	//	//
	MBEGR-Gsat+EP24h	MBE correspondant aux BGR formulés avec des granulats préalablement saturés avec l'eau de prémouillage 24 heures plutôt.	//	//
	MBEGR-(Gsat+EP+A)24h	MBE correspondant aux BGR formulés avec des granulats préalablement saturés avec l'eau de prémouillage et de l'adjuvant 24 heures avant le malaxage.	//	//
	MBEGR-(G+EP+A)5min	MBE correspondant aux BGR sur lesquels l'adjuvant est introduit avec l'eau de pré humidification 5 minutes avant le malaxage	//	//
	MBEGR-(A)90sec	MBE correspondant aux BGR sur lequel l'adjuvant est introduit sans être mélangé avec de l'eau et ceci après l'introduction de l'eau.	//	//
	MBEGR-E+A-C-Gsat24h	MBE correspondant aux BGR sur lesquels l'ensemble adjuvant + eau puis le ciment sont introduits en premier, ensuite les granulats saturés	//	//
	MBEGR-E+A-C-Gnonsat	MBE correspondant aux BGR sur lesquels l'ensemble adjuvant + eau puis le ciment sont introduits en premier, ensuite les granulats non saturés.	EPB 014 à 0,9%	0,65

A.9.3 Composition de mortiers

Compositions étudiées	Détail des compositions	Adjuvant et dosage	Eeff/C
Composition 0 (C0)	Mortier formulé avec du sable naturel 0/2 roulé normalisé eau totale = 0,5	Mc-Power flow 3140 à 0,5 %	0,482
Composition 1 (C1)	Mortier formulé avec du sable naturel 0/2 concassé dont la courbe granulométrique est modifiée et s'intègre dans le fuseau granulaire normalisé	//	0,482
Composition 2 (C2)	Mortier formulé avec du sable naturel 0/2 concassé dont la courbe granulométrique n'a pas été retravaillée	//	0,482
Composition 4 (C4)	Mortier formulé avec du sable 0/2 recyclé dont la courbe granulométrique est modifiée et s'intègre dans le fuseau granulaire normalisé. La courbe s'intègre naturellement, elle ne sera pas modifiée	Mc-Power flow 3140 à 0,8 %	0,482
Composition 5 (C5)	Mortier formulé avec du sable recyclé 0,063/2 mm dont les fines ont été retirées	//	0,482
Composition 6 (C6)	Mortier formulé avec du sable recyclé 0/2 mm dont les fines 0/0,063 mm sont considérées comme du liant équivalent	//	0,482
Composition 8 (C8)	Mortier formulé avec du sable 0/2 mm recyclé dont la courbe granulométrique est modifiée et se superpose à celle de la courbe granulométrique du sable concassé	//	0,482
Composition 9 (C9)	Mortier formulé avec du sable recyclé 0/2 mm dont les fines 0/0,063 sont considérées comme du liant équivalent. Le sable utilisé est du 0,063/2 mm avec une masse volumique de 2030,5>0 kg/m ³	//	0,482
Composition 10 (C10)	Mortier formulé avec du sable 0/2 mm recyclé dont la courbe granulométrique est modifiée et se superpose à celle de la courbe granulométrique du sable concassé	//	0,482
Composition 11 (C11)	Mortier formulé avec du sable recyclé 0/2 mm dont les fines sont gardées (la phase granulaire est identique à la composition 4) et dont la même quantité de fines 0/0,063mm que celle de la composition 6 est ajoutée comme liant équivalent.	//	0,482

A.9.4 Détail des compositions de bétons et mortiers

Tableau 22: Composition théorique de bétons de granulats recyclés formulé avec un squelette granulaire superposé sur celui du granulat naturel

	Ciment	Fractions granulaires				Eau
		0/1 mm	1/4 mm	4/10 mm	10/20 mm	
Composition béton massique (kg/ m ³)	260	473,65	226,73	77,65	774,92	169
Masse volumique (kg/m ³)	3060	2010	2210	2290	2260	1000
Composition béton volumique (m ³ /m ³)	0,085	0,236	0,103	0,034	0,343	0,169

Tableau 23: Composition théorique de bétons de granulats recyclés formulés non fité avec une compacité à 0,8

	Ciment	Fractions granulaires			Eau
		0/4 mm	4/10 mm	10/20 mm	
Composition béton massique (kg/ m ³)	260	595,86	106,95	825,04	169
Masse volumique (kg/m ³)	3060	2000	2290	2260	1000
Composition béton volumique (m ³ /m ³)	0,085	0,298	0,047	0,337	0,169

Tableau 24: Composition théorique de bétons de granulats recyclés formulés non fité avec une compacité à 0,75

	Ciment	Fractions granulaires			Eau
		0/4 mm	4/10 mm	10/20 mm	
Composition béton massique [kg]	260	554,19	99,47	767,35	169
Masse volumique [kg/m ³]	3060	2000	2290	2260	1000
Composition béton volumique [m ³]	0,085	0,277	0,043	0,340	0,169

Tableau 25 : Composition de MBE de granulats naturel sans adjuvant, E/C=0,65

Constituants Sans adjuvant	Composition béton de granulats naturels [kg/m ³]	% de chaque fraction massique granulométrique dans le béton	Surface spécifiques imbibées [m ² /kg]	Composition MBE imbibée obtenue par kg pour 0,546 m ³	Composition MBE sec obtenue par kg pour 0,546 m ³
Ciment (CEM I 52.5 N)	260			260	260
Sable saturé (0/4 mm)	725,66	38	7,098	766,1	757,6
Gravillon saturé (4/10 mm)	179,64	9	0,409		
Gravier saturé (6,3/20 mm)	1011,61	53	0,166		
Eau de gâchage	177,99			169	177,5

Prise en compte du sable contenu dans le gravillon ainsi que la teneur en eau

prise en compte du sable contenu dans les gravillons 6,08%			
MBE imbibé*		MBE sec	
	Proportions	Proportions	Volume [l]
Ciment	260	260	85,0
Eau	169	175,9	169
Sable	776,6	768	297,7
Volume total :			551,7

Constituants Sans adjuvant	Composition théorique de MBE sec pour 1m ³ [kg]
ciment (CEM I 52.5 N)	471,27
Sable sec	1392,06
Eau totale	318,83

Tableau 26 : Composition de MBE de granulats recyclés sans adjuvant, E/C=0,65

Composition de MBE de granulat recyclé dosée à 1,2 % d'adjuvant, E/C=0,65	composition béton [kg/m ³]	% de chaque fraction massique granulométrique dans le béton	Composition MBE humide obtenue kg pour 0,609 m ³	Composition MBE sec obtenue kg pour 0,609 m ³
ciment (CEM I 52.5 N)	260		260	260
Sable saturé (0/4 mm)	702,36	45,1	780,1	710,3
Gravillon saturé (4/10 mm)	77,31	5		
Gravier saturé (10/20mm)	775,89	49,9		
Eau de gâchage	254,83	//	169	238,8

Prise en compte du sable contenu dans le gravillon ainsi que la teneur en eau

prise en compte du sable contenu dans les gravillons 4,43%			
MBE imbibé*		MBE sec	
	Proportions	Proportions	Volume [l]
Ciment	260	260	85,0
Eau	169,0	238,8	169
Sable	783,7	713,5	356,8
Volume total :			610,7
Constituants Sans adjuvant		Composition théorique de MBE secs pour 1m ³ [kg]	
ciment (CEM I 52.5 N)		425,7	
Sable sec		1168,33	
Eau totale		391,03	

Tableau 27 : Composition théorique de BGR pour 1 m³ avec une compacité de 0,8

	Ciment	Fractions granulaires			Eau
		0/4 mm	4/10 mm	10/20 mm	
Composition béton massique (kg/ m ³)	260	825,04	137,51	565,30	169
Masse volumique (kg/m ³)	3060	2000	2290	2260	1000
Composition béton volumique (m ³ /m ³)	0,085	0,413	0,060	0,250	0,169

Tableau 28 : Composition théorique de BGR pour 1 m³ avec une compacité de 0,75

	Ciment	Fractions granulaires			Eau
		0/4 mm	4/10 mm	10/20 mm	
Composition béton massique (kg/ m ³)	260	767,35	127,89	525,77	169
Masse volumique (kg/m ³)	3060	2000	2290	2260	1000
Composition béton volumique (m ³ /m ³)	0,085	0,384	0,056	0,233	0,169

Tableau 29: Composition théorique de béton de granulats recyclés formulé avec du sable recyclé substitué par du sable naturel concassé.

	Ciment	Fractions granulaires			Eau
		0/4 mm	4/10 mm	10/20 mm	
Composition béton massique (kg)	260	680,60	85,08	935,83	169
Masse volumique (kg/m ³)	3060	2580	2290	2260	1000
Composition béton volumique (m ³)	0,085	0,264	0,037	0,414	0,169

Tableau 30: Composition théorique de béton de granulats recyclés formulé avec du sable recyclé substitué par du sable naturel roulé.

	Ciment	Fractions granulaires			Eau
		0/4 mm	4/10 mm	10/20 mm	
Composition béton massique (kg)	260	740,13	86,06	895,04	169
Masse volumique (kg/m ³)	3060	2630	2290	2260	1000
Composition béton volumique (m ³)	0,085	0,281	0,037	0,396	0,169

Tableau 31: Composition théorique de béton de granulats recyclés sur lequel les éléments inférieurs à 63µm ont été enlevés.

	Ciment	Fractions granulaires			Eau
		63µm/4 mm	4/10 mm	10/20 mm	
Composition béton massique [kg]	260	720,27	78,29	767,24	169
Masse volumique [kg/m ³]	3060	2110	2290	2260	1000
Composition béton volumique [m ³]	0,085	0,342	0,034	0,340	0,169

Tableau 32: Composition théorique de béton de granulats recyclés formulé en modifiant les objectifs du béton pour 1 m³

	Ciment	Fractions granulaires			Eau
		0/4 mm	4/10 mm	10/20 mm	
Composition béton massique [kg]	300	676,27	74,97	748,25	195
Masse volumique [kg/m ³]	3060	2000	2290	2260	1000
Composition béton volumique [m ³]	0,098	0,338	0,033	0,331	0,195

Tableau 33: Composition théorique de béton de granulats naturels concassés formulé en modifiant les objectifs du béton pour 1 m³

	Ciment	Fractions granulaires			Eau
		0/4 mm	4/10 mm	10/20 mm	
Composition béton massique [kg]	300	711,12	168,42	991,82	195
Masse volumique [kg/m ³]	3060	2590	2730	2720	1000
Composition béton volumique [m ³]	0,098	0,274	0,062	0,365	0,195

ANNEXE.10 Représentation graphique des résultats obtenus sur bétons et mortier de béton équivalent

A.10.1 Graphes des affaissements, masses volumiques et résistances de BGNC et BGR

A.10.1.1 Bétons non adjutants

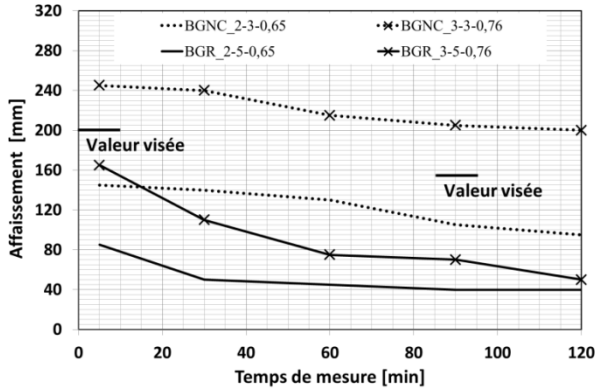


Figure 43 : Evolution de l'ouvrabilité des bétons non adjutants

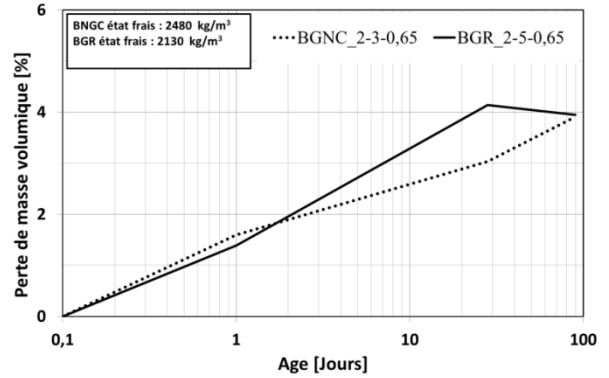


Figure 46 : Perte de masse volumique des bétons non adjutants par rapport à la valeur à l'état frais

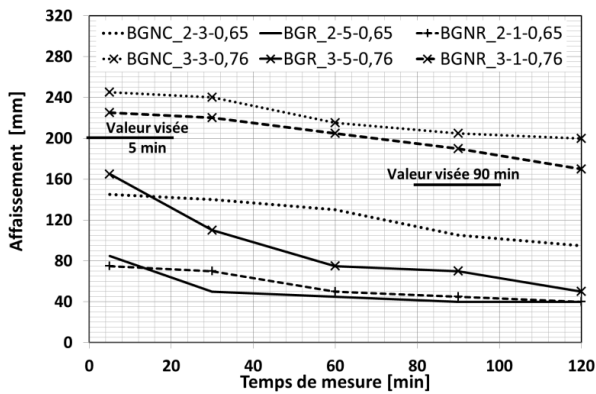


Figure 44 : Evolution de l'ouvrabilité des bétons BGNR, BGNC et BGR non adjutants

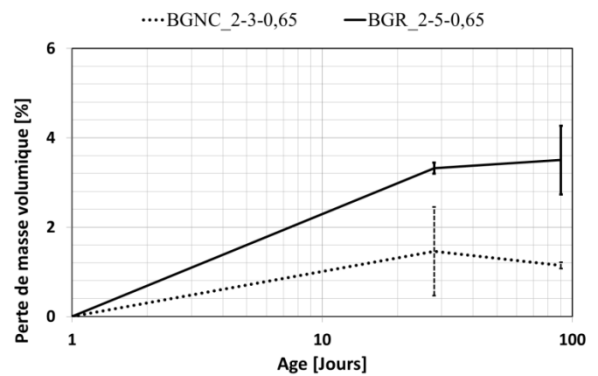


Figure 47 : Perte de masse volumique des bétons non adjutants par rapport à la valeur à 1 jour

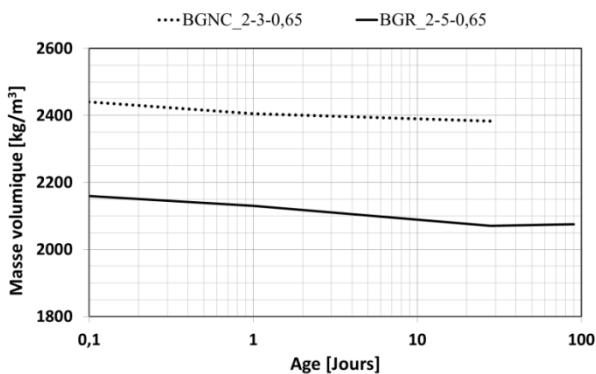


Figure 45 : Evolution de la masse volumique des bétons non adjutants

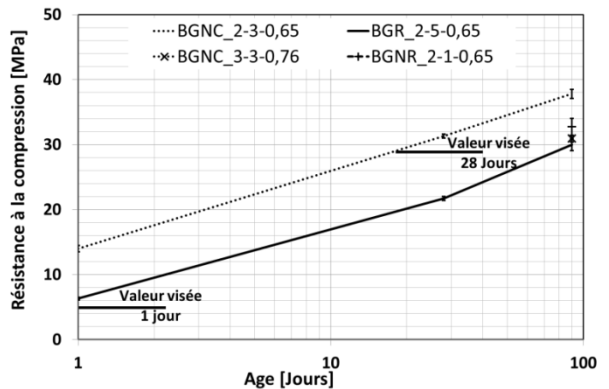


Figure 48 : Evolution des résistances des bétons non adjutants

A.10.1.2 Screening des adjuvants

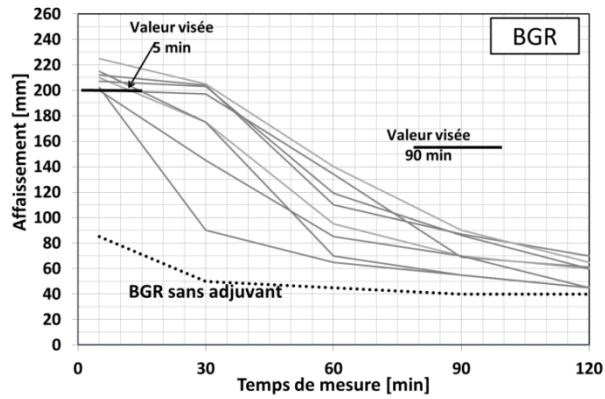
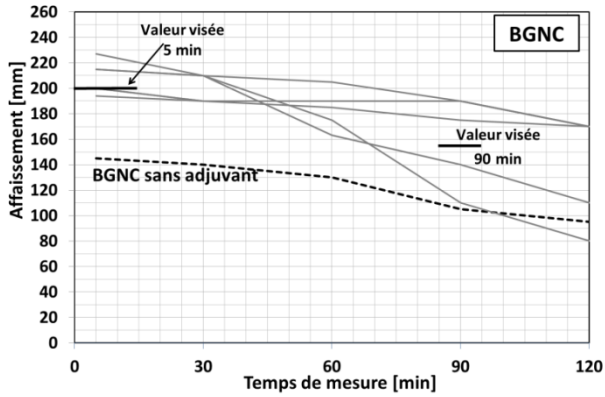


Figure 49 : Evolution de l'ouvrabilité des BGNC et BGR réalisés avec le même type d'adjuvant

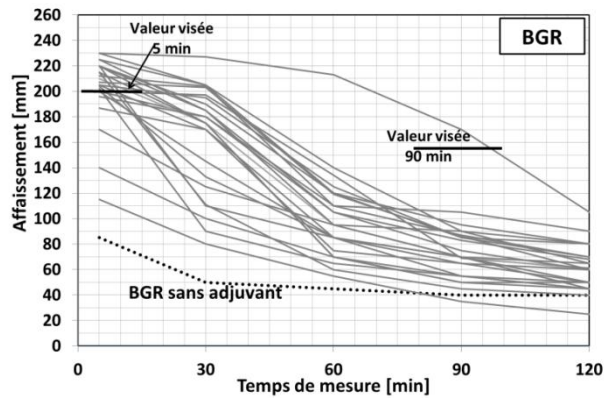


Figure 50 : Evolution de l'ouvrabilité de tous les BGR

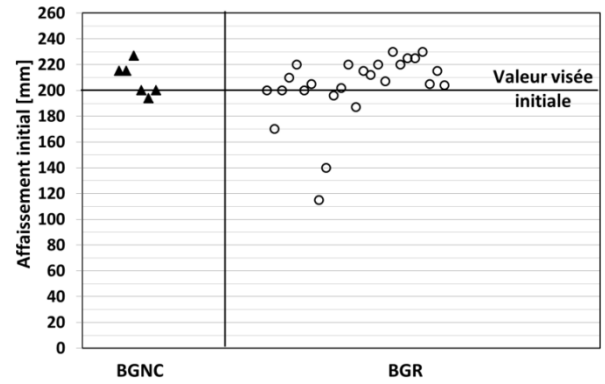


Figure 51 : Ouvrabilité des bétons à 5 minutes

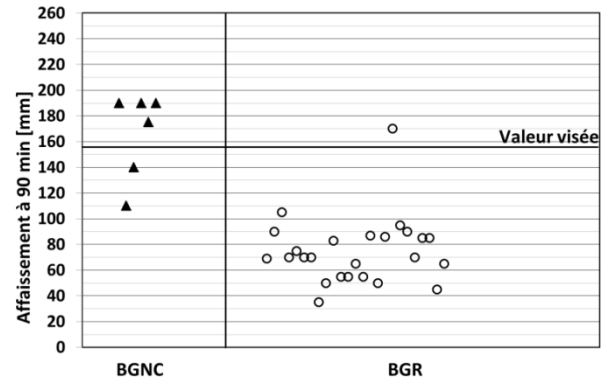


Figure 52 : Ouvrabilité des bétons à 90 minutes

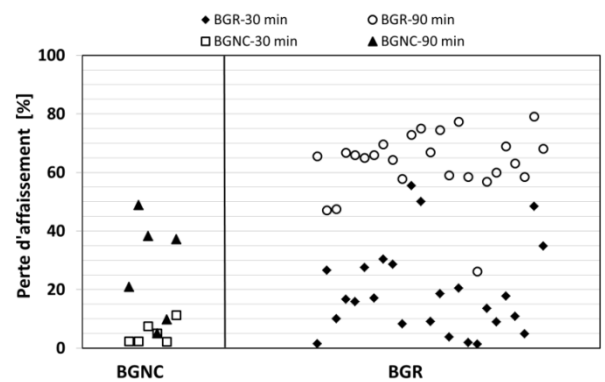


Figure 53 : Perte d'ouvrabilité des bétons

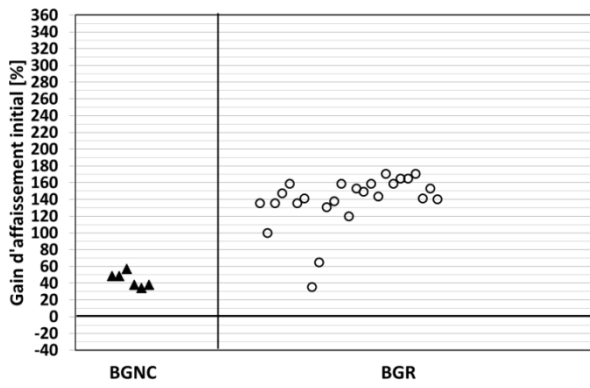


Figure 54 : gain d'ouvrabilité des bétons à 5 minutes

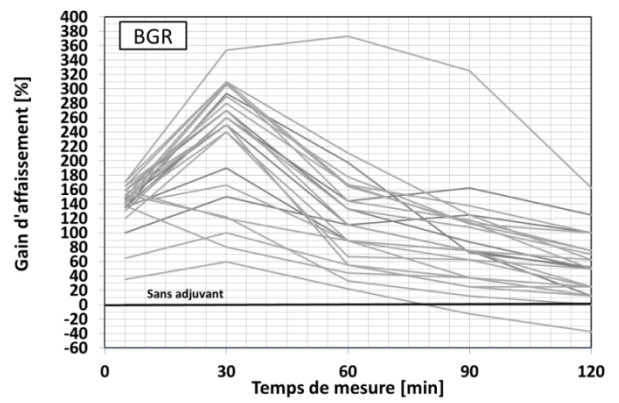


Figure 57 : Evolution de du gain d'ouvrabilité de tous les BGR

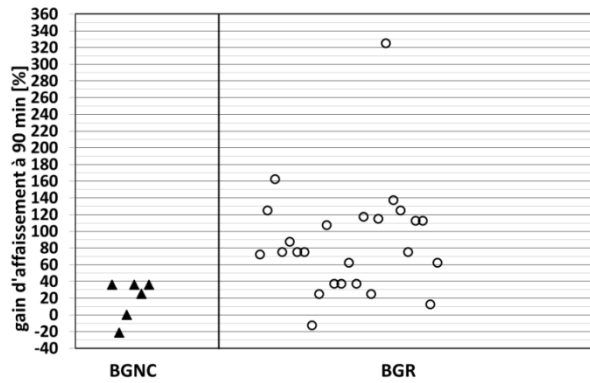


Figure 55 : Gain d'ouvrabilité des bétons à 90 minutes

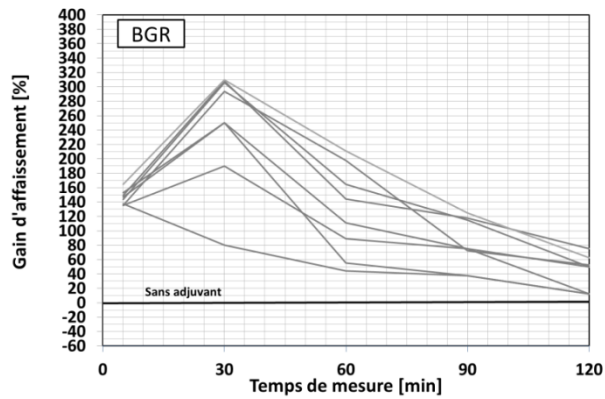
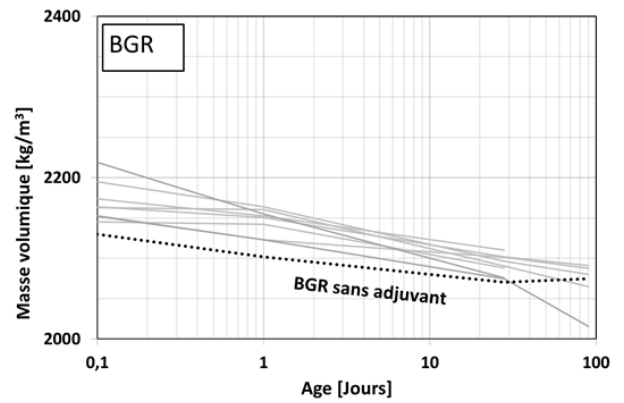
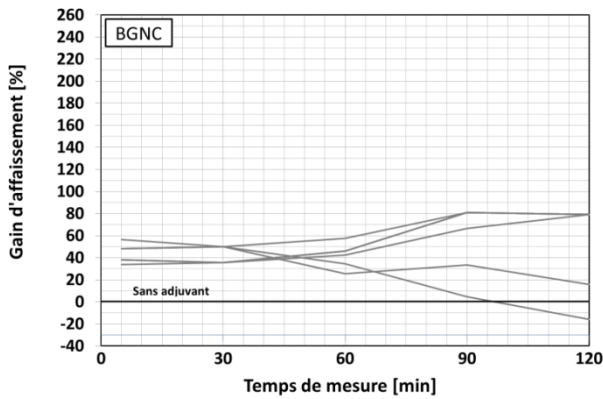
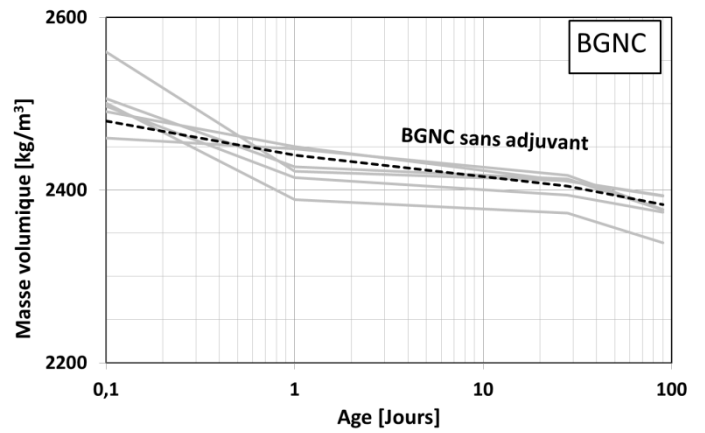


Figure 58 : Evolution de la masse volumique des BGNC et BGR réalisés avec le même type d'adjuvant

Figure 56 : Gain d'ouvrabilité des BGNC et BGR avec des adjuvants identiques

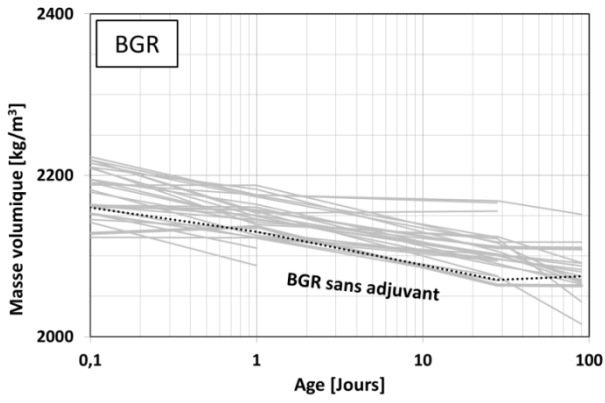


Figure 59 : Evolution de la masse volumique des bétons de granulats recyclés adjutants

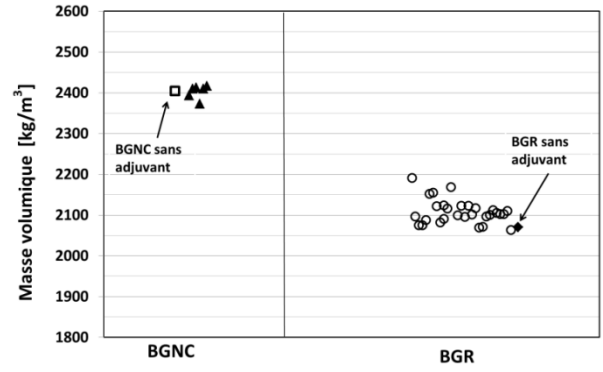


Figure 62 : Masses volumiques à l'état durcis des bétons à l'échéance 28 Jours

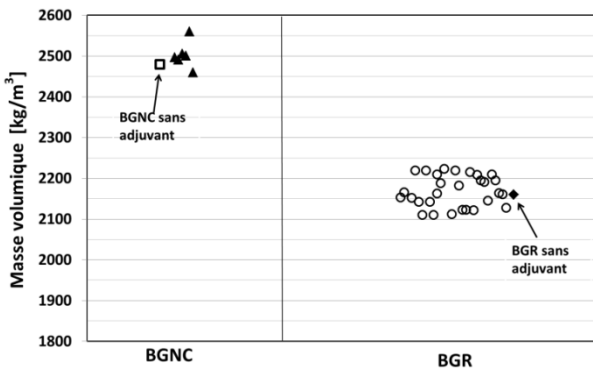


Figure 60 : Masses volumiques à l'état frais des bétons

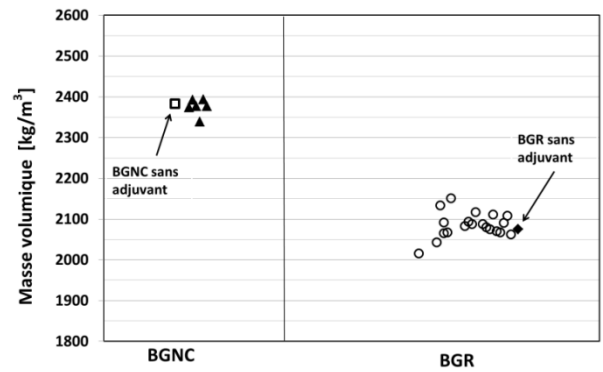


Figure 63 : Masses volumiques à l'état durcis des bétons à l'échéance 90 Jours

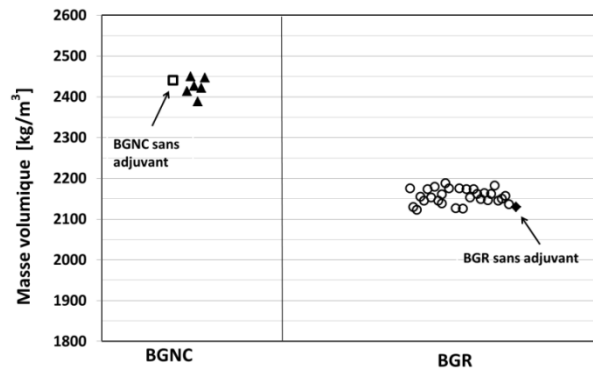


Figure 61 : Masses volumiques à l'état durcis des bétons à l'échéance 24 heures

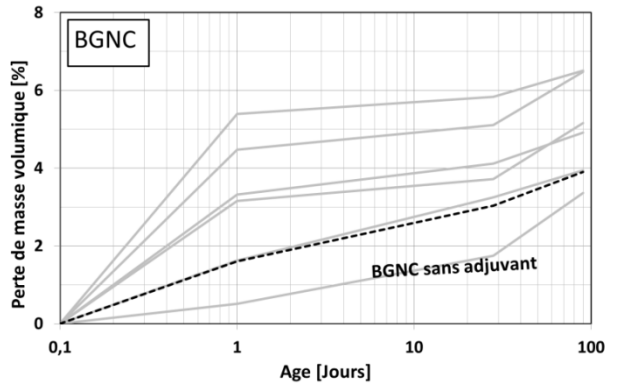


Figure 64 : Perte de masse volumique des BGN adjutants par rapport à la valeur à l'état frais

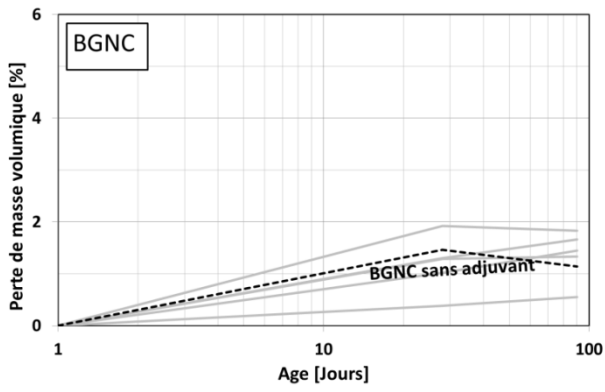


Figure 65 : Perte de masse volumique des BGN adjuvés

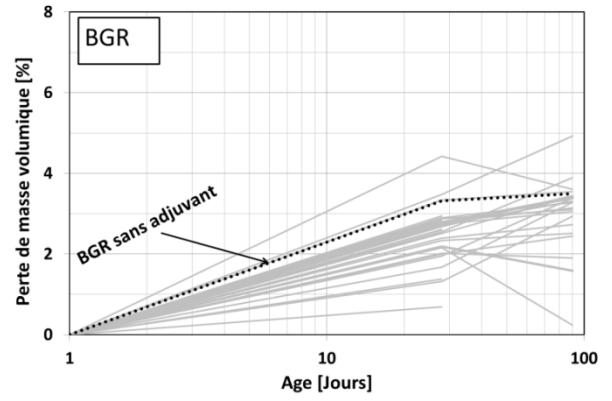


Figure 67 : Perte de masse volumique des BGR adjuvés

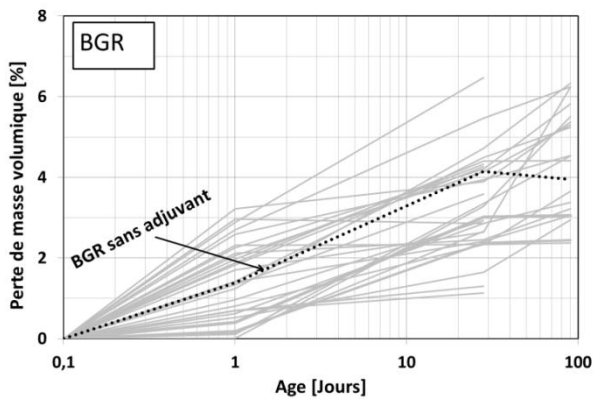


Figure 66 : Perte de masse volumique des BGR adjuvés

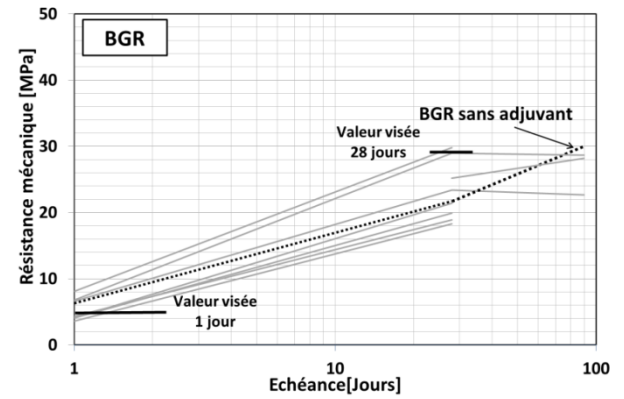
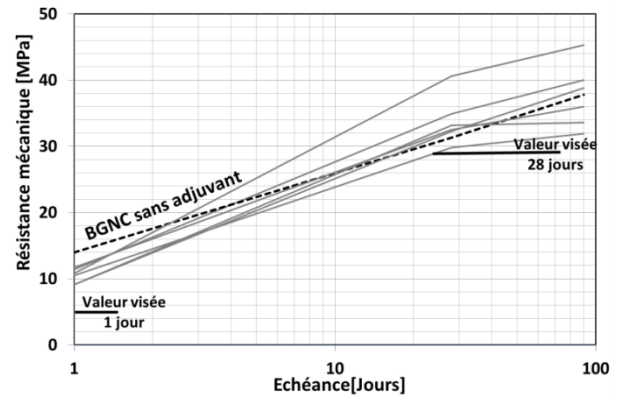
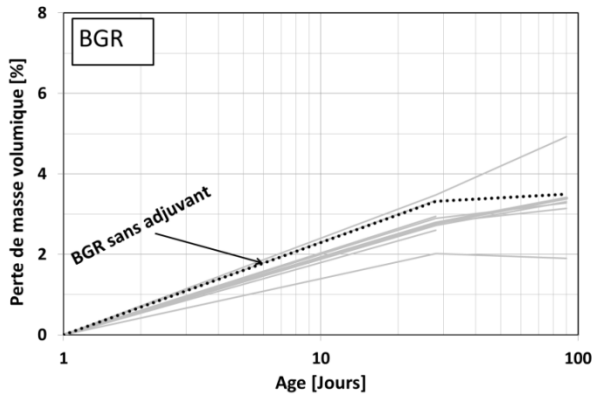


Figure 68 : Résistance mécanique des BGNC et BGR dosés avec le même type d'adjuvés

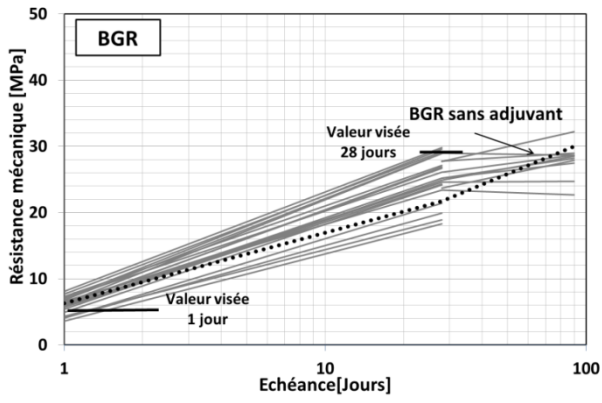


Figure 69 : Résistance mécanique de tous les BGR

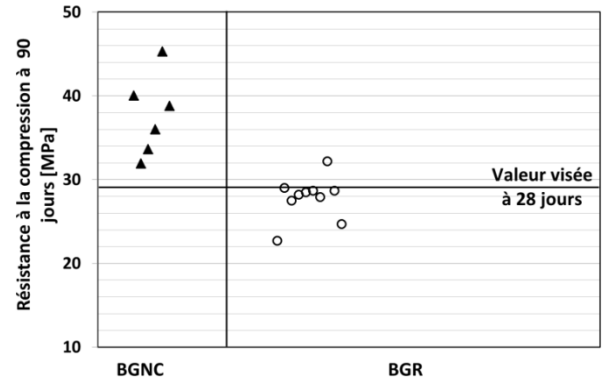


Figure 72 : Résistance mécanique des bétons adjuvantés à 90 jours

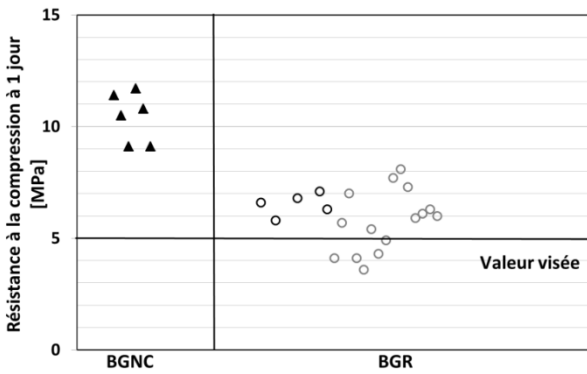


Figure 70 : Résistance mécanique des bétons adjuvantés à 1 jour

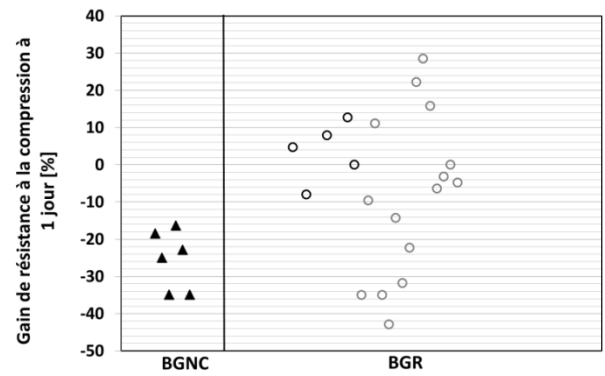


Figure 73 : Gain de résistance mécanique des bétons adjuvantés à 1 jour

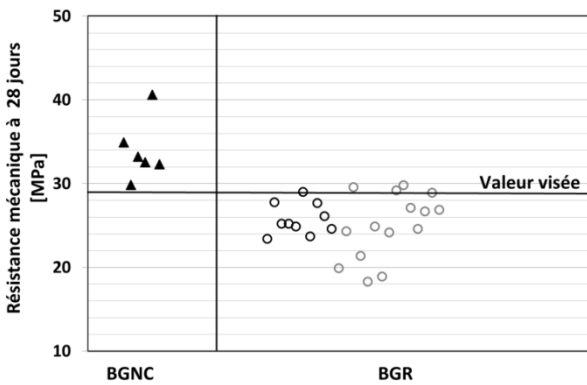


Figure 71 : Résistance mécanique des bétons adjuvantés à 28 jours

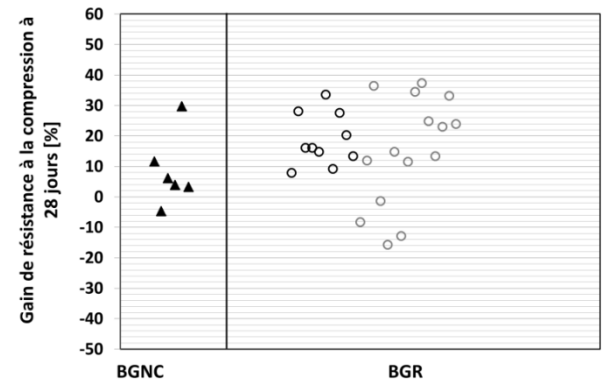


Figure 74 : Gain de résistance mécanique des bétons adjuvantés à 28 jours

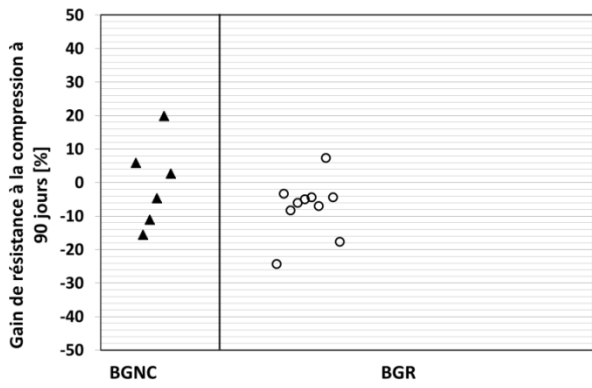


Figure 75 : Gain de résistance mécanique des bétons adjuvantés à 90 jours

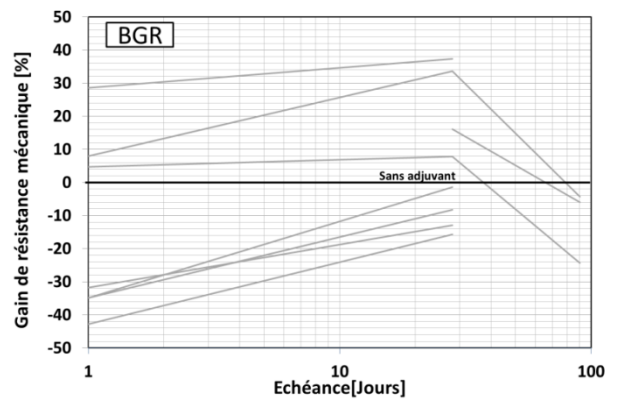


Figure 76 : Gain de résistance mécanique des BGNC et BGR à adjuvants identiques

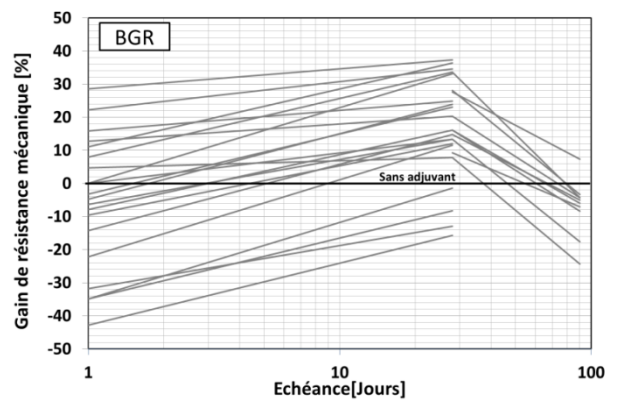
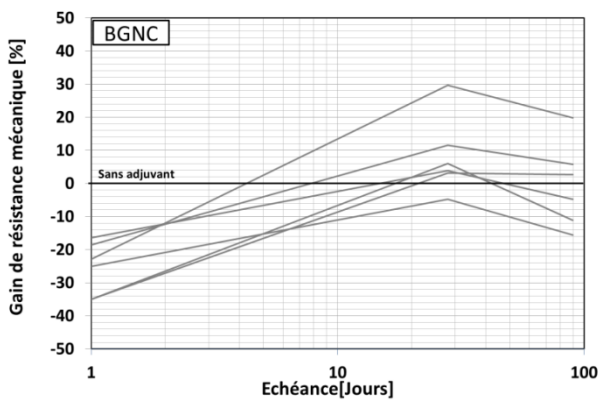


Figure 77 : Gain de résistance mécanique de tous les BGR

A.10.1.3 Bétons dont le squelette a été modifié

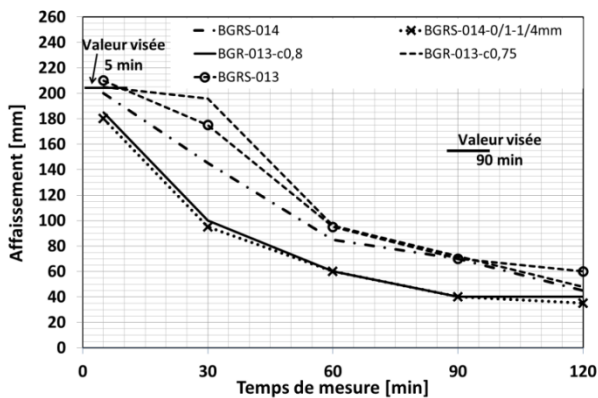


Figure 78 : Evolution d'ouvrabilité des bétons dont les squelettes ont été modifiés

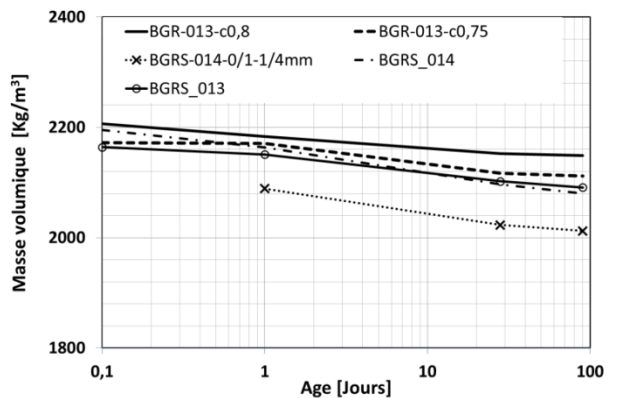


Figure 79 : Evolution de la masse volumique des bétons dont le squelette est modifié

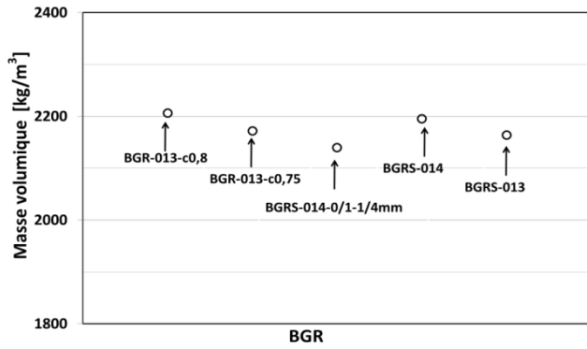


Figure 80 : Masse volumique à 5 minutes pour les bétons dont le squelette est modifié

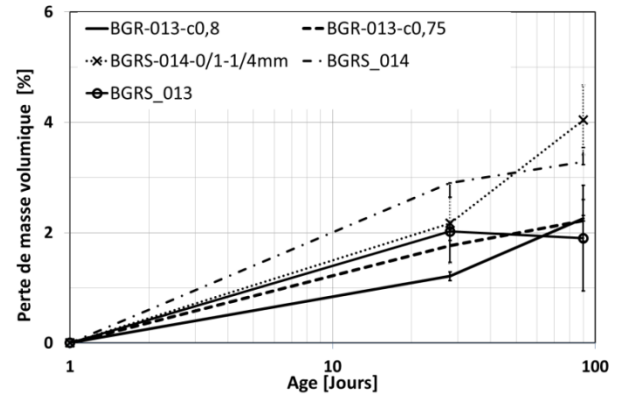


Figure 83 : Perte de masse volumique des bétons dont le squelette est modifié

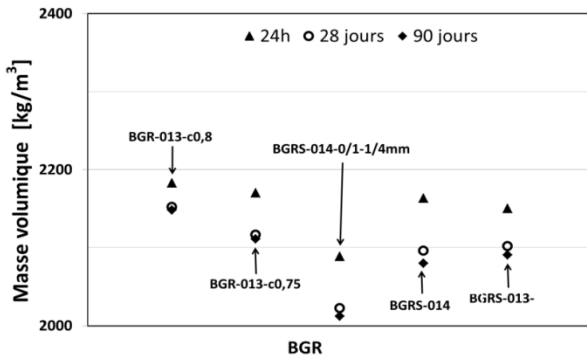


Figure 81 : Masse volumique aux différentes échéances pour les bétons - squelette est modifié

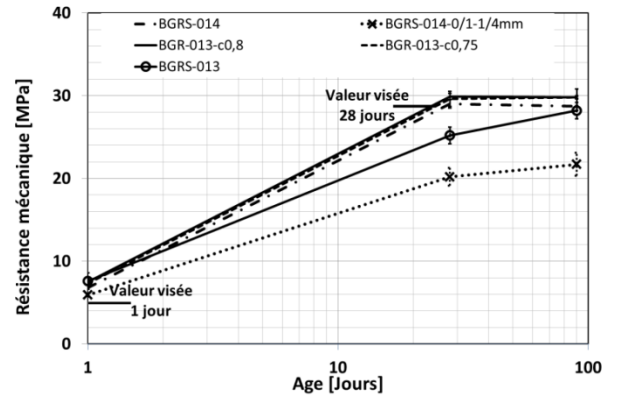


Figure 84 : Evolution des résistances mécaniques des bétons dont les squelettes ont été modifiés

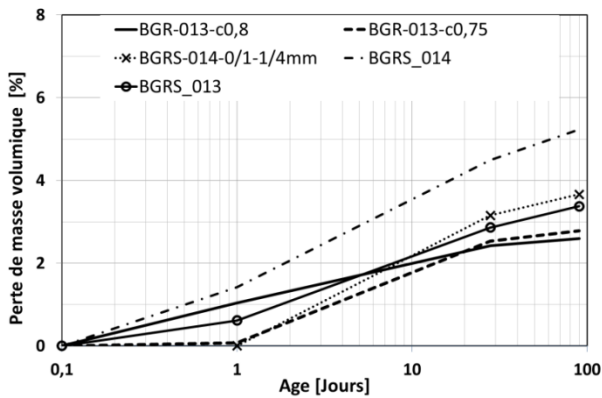


Figure 82 : Perte de masse volumique des bétons dont le squelette est modifié

A.10.1.4 Bétons dont la fraction sableuse a été modifiée

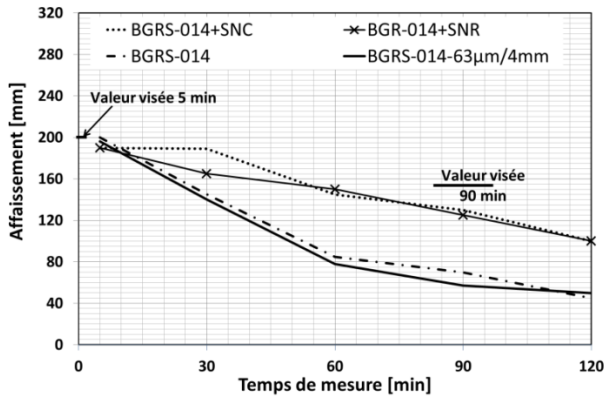


Figure 85 : Evolution de l'ouvrabilité des bétons adjuvantés dont la fraction sableuse a été modifiée

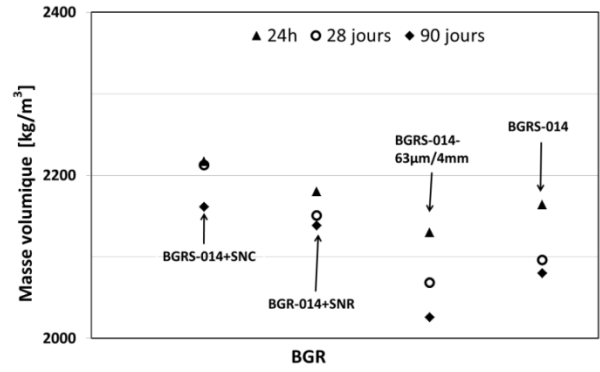


Figure 88 : Masse volumique aux différentes échéances pour les bétons dont le sable est substitué ou retiré

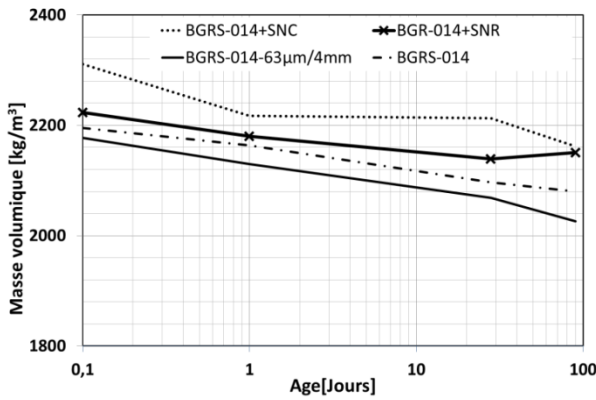


Figure 86 : Evolution de la masse volumique des bétons dont la fraction sableuse est modifiée

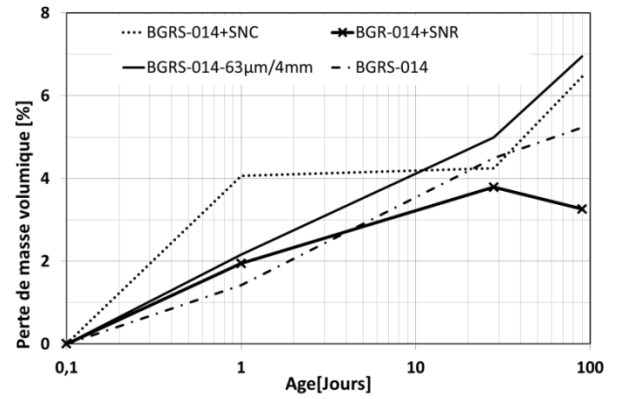


Figure 89 : Perte de masse volumique des bétons dont la fraction sableuse est modifiée par rapport à la valeur à l'état frais

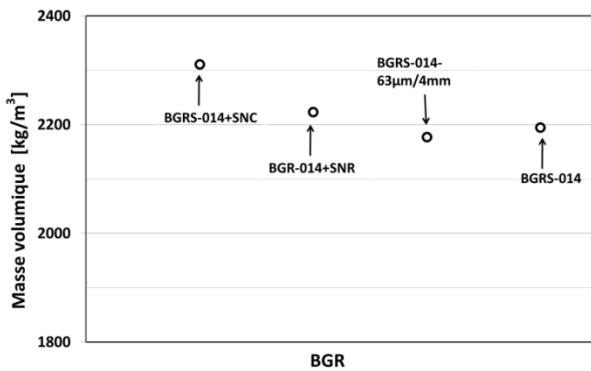


Figure 87 : Masse volumique à 5 minutes pour les bétons dont le sable est substitué ou retiré

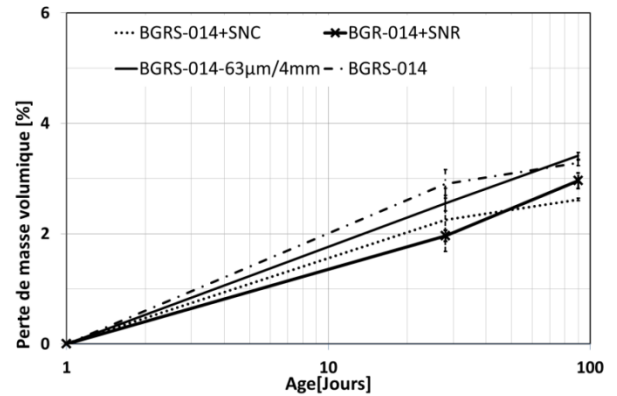


Figure 90 : Perte de masse volumique des bétons dont la fraction sableuse est modifiée par rapport à la valeur à 1 jour

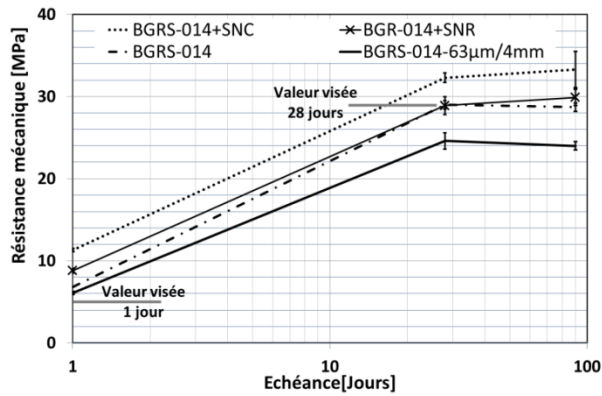


Figure 91 : Résistance mécanique des bétons adjuvantés dont la fraction sableuse a été modifiée

A.10.1.5 Bétons dont le dosage en ciment a été modifié

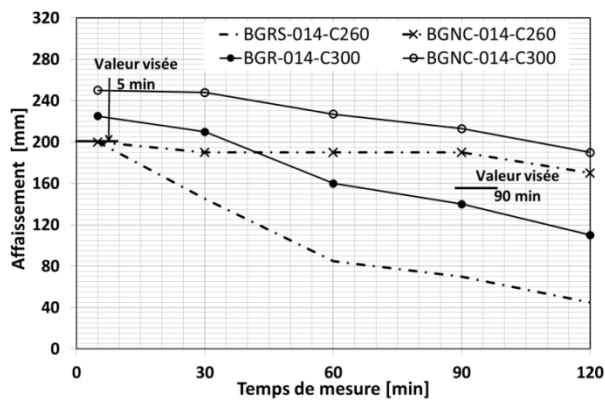


Figure 92 : Evolution de l'ouvrabilité des bétons adjuvantés dont la quantité de ciment a été modifiée

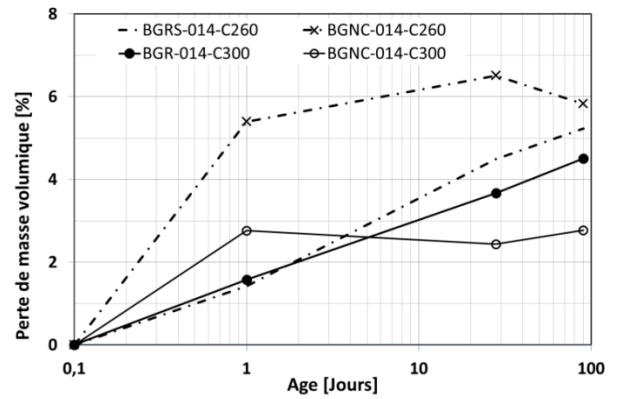


Figure 94 : Perte des masses des bétons adjuvantés dont la quantité de ciment a été modifiée par rapport à la valeur à l'état frais

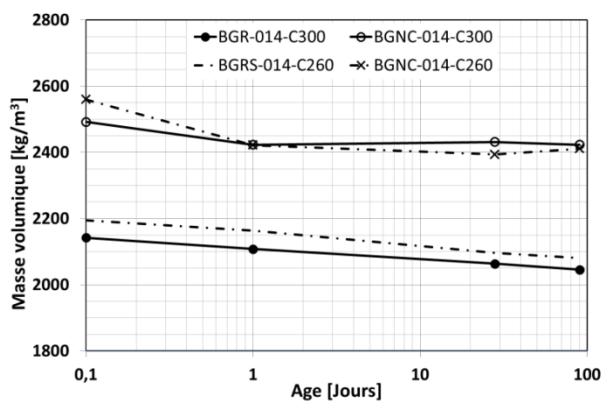


Figure 93 : Masses volumiques des bétons adjuvantés dont la quantité de ciment a été modifiée

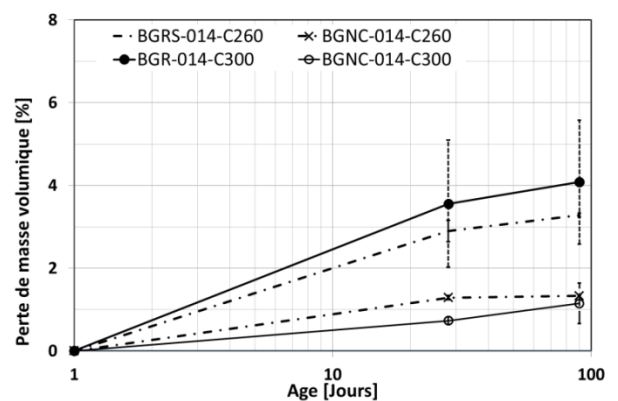


Figure 95 : Perte des masses des bétons adjuvantés dont la quantité de ciment a été modifiée par rapport à la valeur à 1 jour

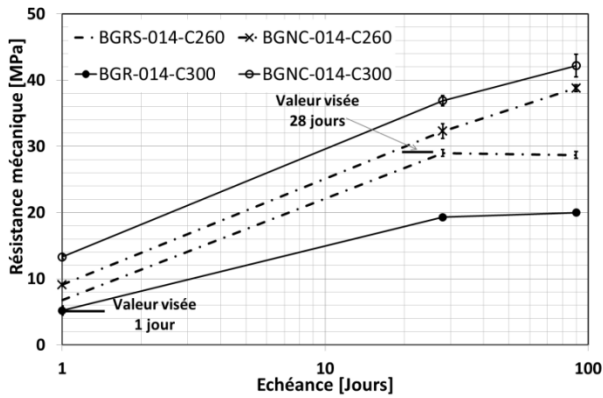


Figure 96 : Résistance mécanique des bétons adjuvantés dont la quantité de ciment a été modifiée

A.10.1.6 Bétons dont la mise en œuvre a été modifiée

- ◇ BGR-Gsat+EP24h
- BGR-(Gsat+EP+A)
- ⋯ BGR-(A)90sec
- ⋯ BGR-E+A-C-Gsat
- ⋯+ BGR-G-EA-C
- BGRS-014

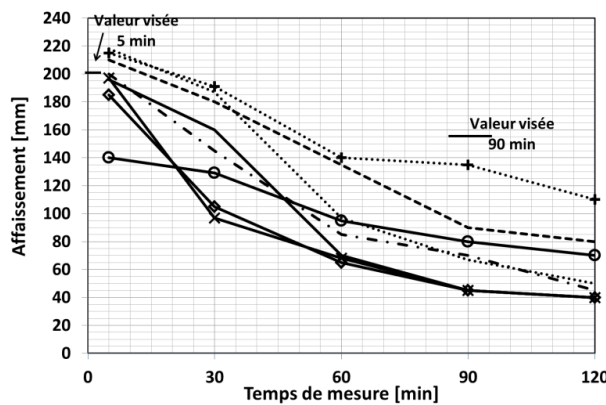


Figure 97 : Evolution de l'ouvrabilité des bétons adjuvantés dont la mise en œuvre a été modifiée

- ◇ BGR-Gsat+EP24h
- BGR-(Gsat+EP+A)
- ⋯ BGR-(A)90sec
- ⋯ BGR-E+A-C-Gsat
- ⋯+ BGR-G-EA-C
- BGRS-014

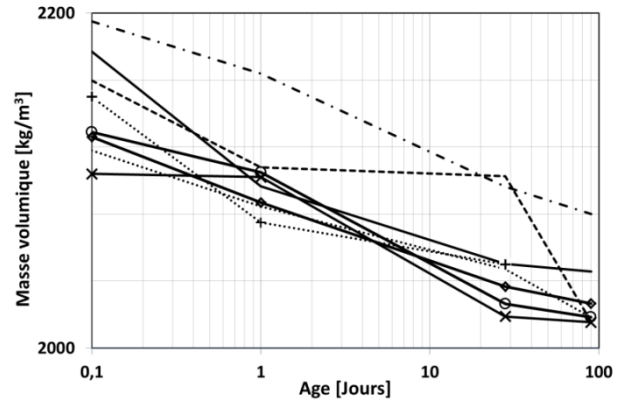


Figure 98 : Evolution de la masse volumique des bétons dont le mode de malaxage a été modifié

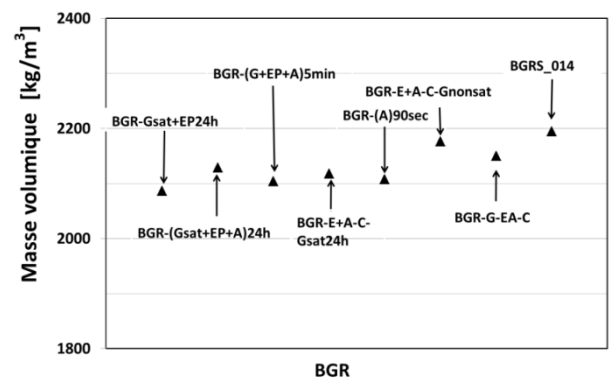


Figure 99 : Masse volumique à 5 minutes pour les bétons dont le malaxage est modifié

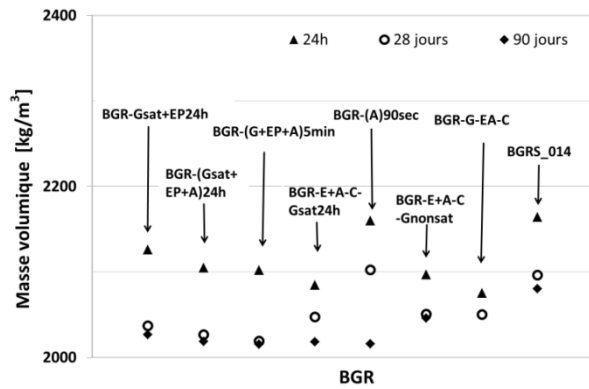


Figure 100 : Masse volumique aux échéances pour les bétons dont le malaxage est modifié

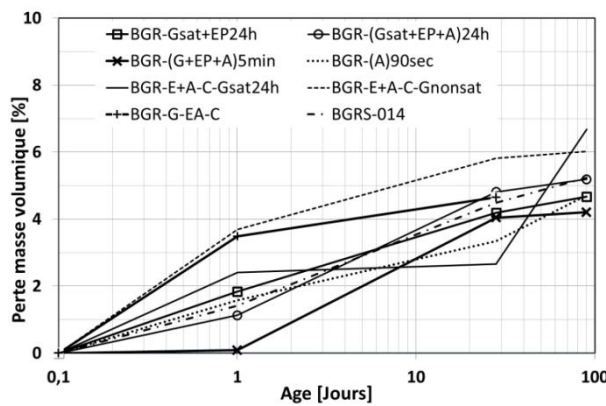


Figure 101 : Perte de masse volumique des bétons dont le mode de malaxage a été modifié par rapport à la valeur à l'état frais

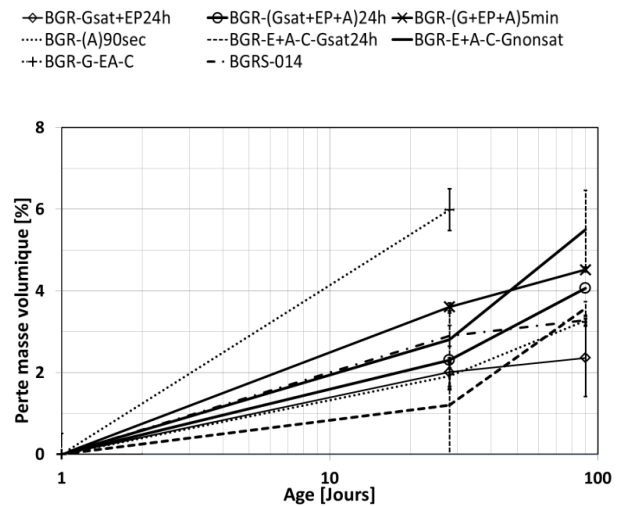


Figure 102 : Perte de masse volumique des bétons dont le mode de malaxage a été modifié par rapport à la valeur à 1 jour

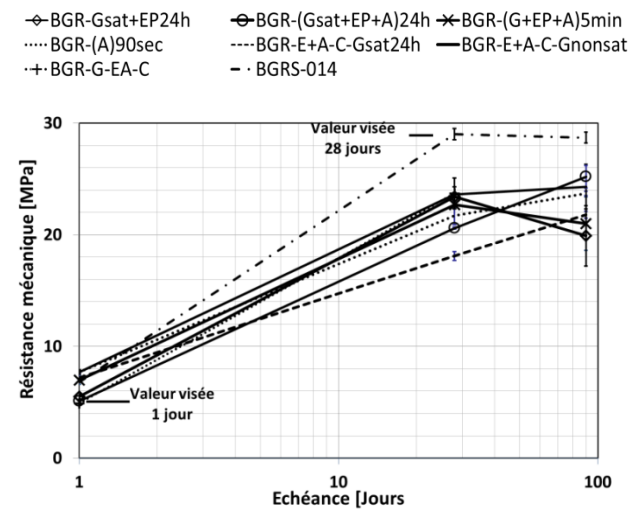


Figure 103 : Résistances mécaniques des bétons dont la mise en œuvre a été modifiée

Acronymes utilisés	Signification
BGR-(G+EP+A)5min	Béton BGR est formulé en préhumidifiant les granulats avec de l'eau de préhumidification adjuvantée 5 minutes avant malaxage
BGR-(A)90sec	Béton BGR est formulé en introduisant l'adjuvant 90 secondes avant la fin du malaxage sans être mélangé à de l'eau
BGR-E+A-C-Gsat24h	Béton BGR est formulé en introduisant progressivement de l'eau adjuvantée avec du ciment puis les granulats saturés 24 heures avant malaxage
BGR-E+A-C-Gnonsat	Béton BGR est formulé en introduisant progressivement de l'eau adjuvantée avec du ciment puis les granulats dans son état naturel
BGR-Gsat+EP24h	Béton BGR est formulé avec des granulats saturés avec de l'eau de préhumidification 24 heures avant malaxage
BGR-(Gsat+EP+A)24h	Béton BGR est formulé avec des granulats saturés avec de l'eau de préhumidification adjuvantée 24 heures avant malaxage
BGR-G-EA-C	Béton BGR formulé en introduisant les matériaux de la façon suivante: granulats ; eau adjuvanté puis du ciment

A.10.2 Graphes des affaissements, masses volumiques et résistances de MBEGNC et MBEGR

A.10.2.1 MBE non adjuvanté

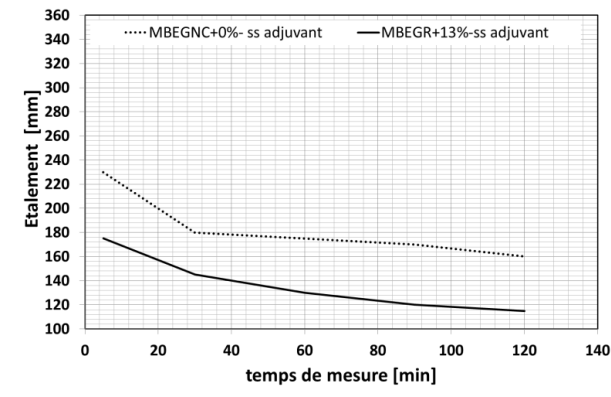


Figure 104 : Evolution de l'étalement des MBE non adjuvantés

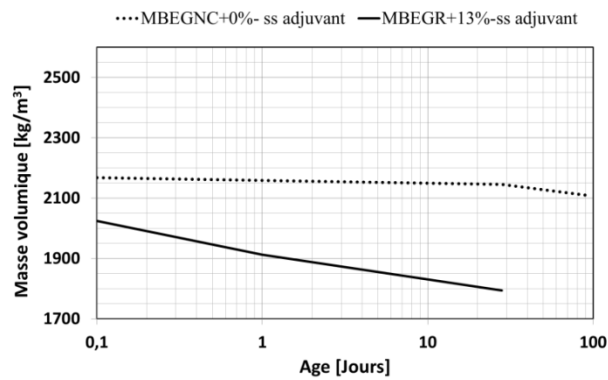


Figure 105 : Evolution de la masse volumique des MBE non adjuvantés

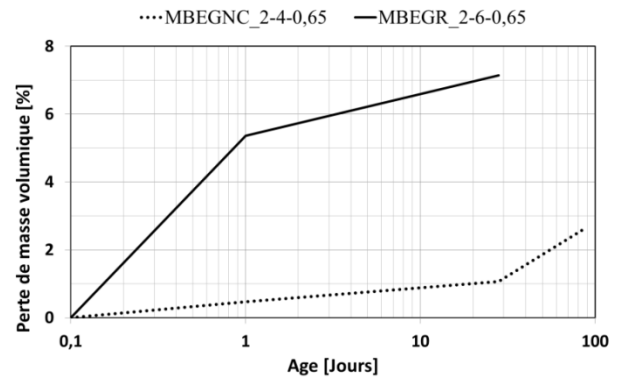
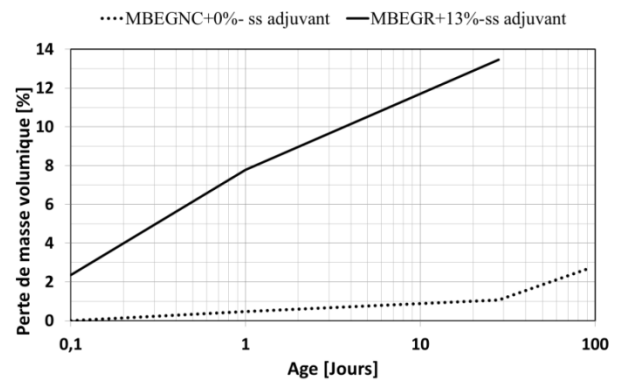
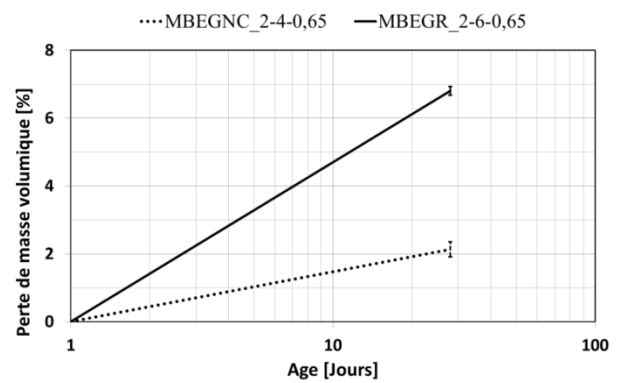
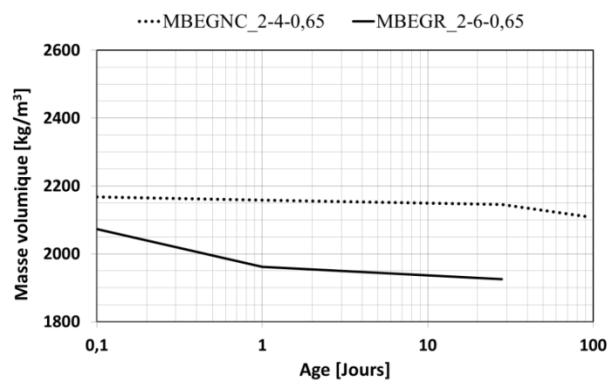


Figure 106 : Perte de masse volumique des MBE non adjuvantés par rapport à la valeur à l'état frais



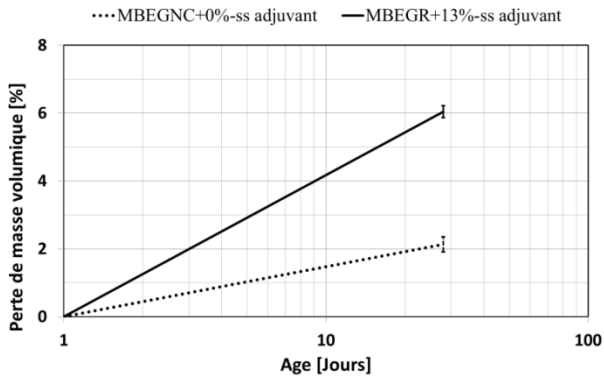


Figure 107 : Perte de masse volumique des MBE non adjuvés par rapport à la valeur à 1 jour

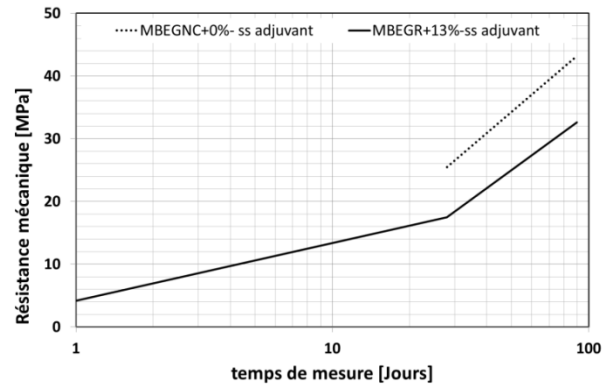


Figure 108 : Evolution de la résistance mécanique des MBE non adjuvés

A.10.2.2 Screening des MBE

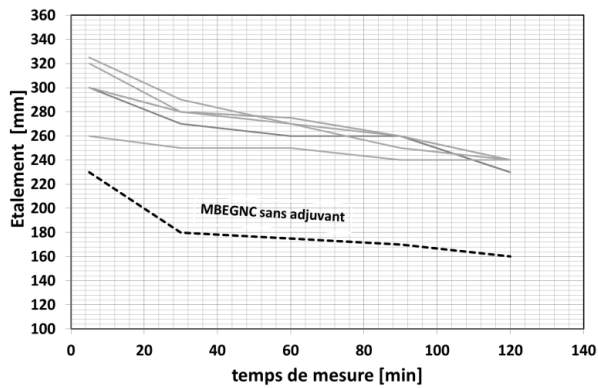


Figure 109 : Evolution de l'étalement des MBEGNC

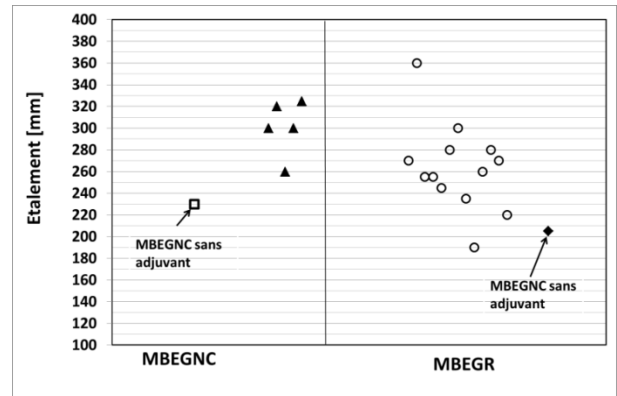


Figure 111 : Evolution de l'étalement des MBE à 5 minutes

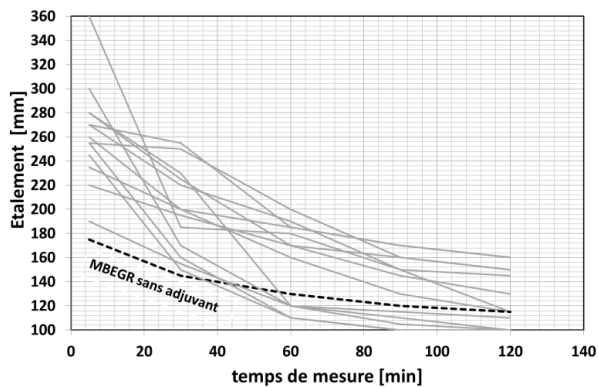


Figure 110 : Evolution de l'étalement des MBEGR

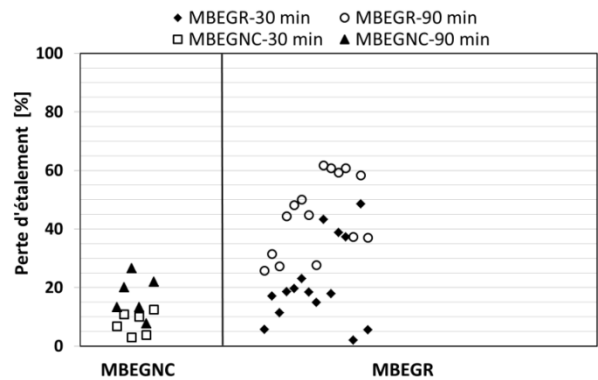


Figure 112 : Perte d'étalement des MBE déterminée à 30 et à 90 minutes

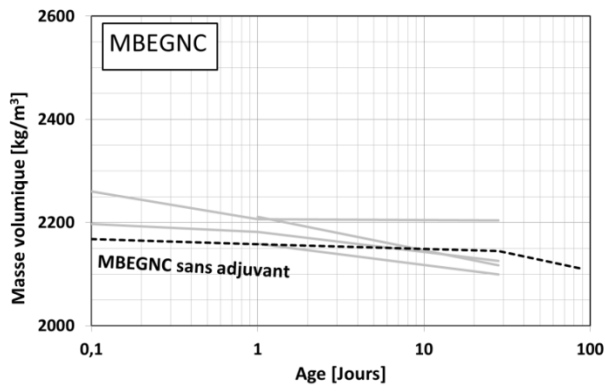


Figure 113 : Evolution de la masse volumique des MBEGNC adjuvés

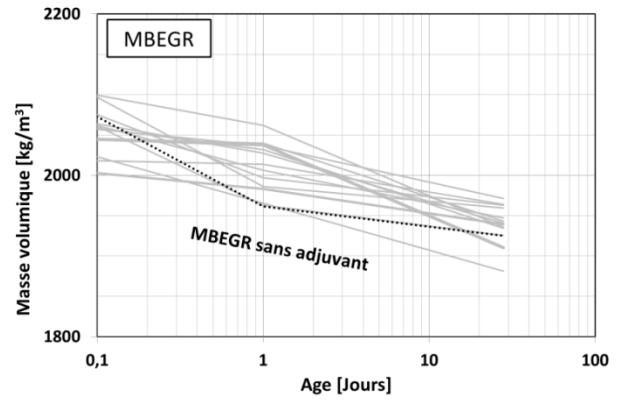


Figure 116 : Evolution de la masse volumique des MBEGR adjuvés

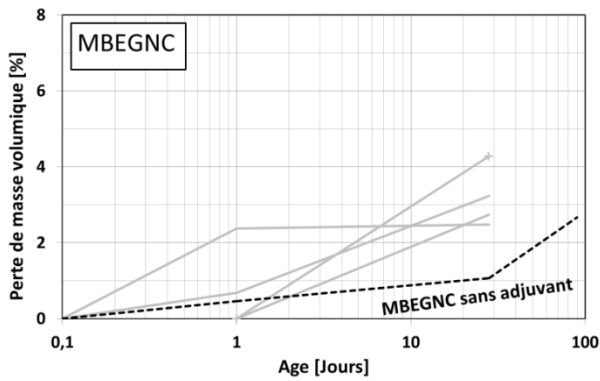


Figure 114 : Perte de masse volumique des MBEGNC adjuvés par rapport à l'état frais

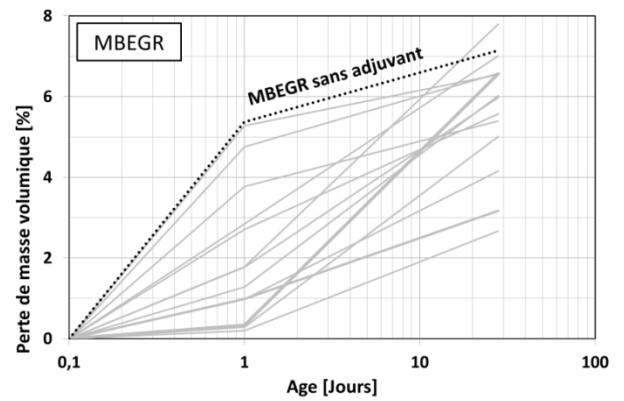


Figure 117 : Perte de masse volumique des MBEGR adjuvés par rapport à l'état frais

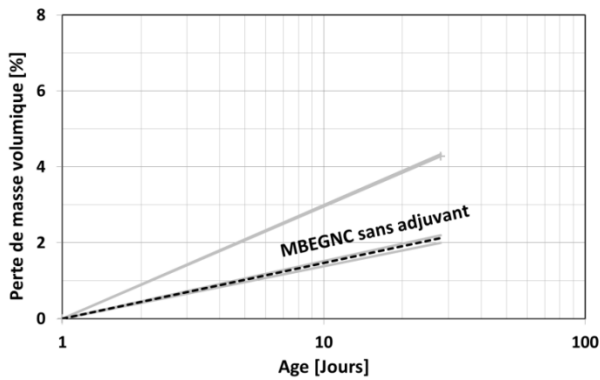


Figure 115 : Perte de masse volumique des MBEGNC adjuvés par rapport à 1 jour

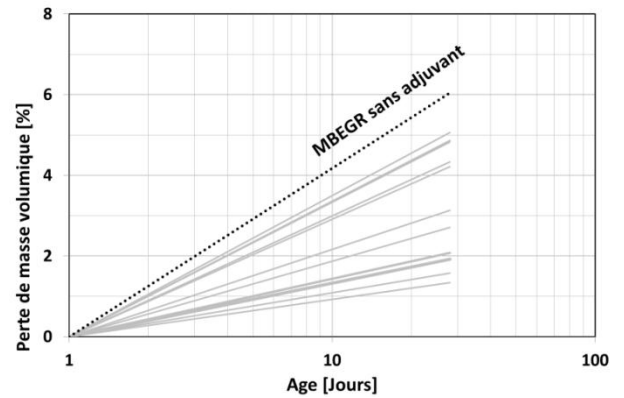


Figure 118 : Perte de masse volumique des MBEGR adjuvés par rapport à 1 jour

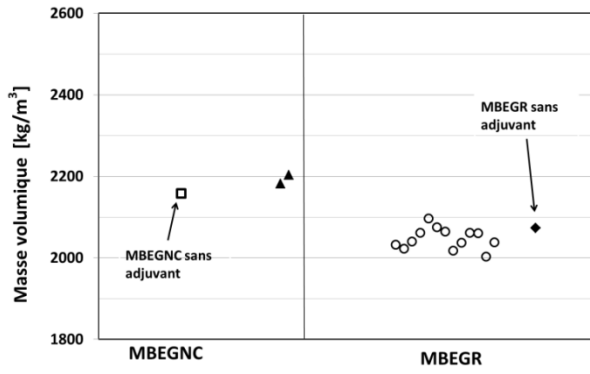


Figure 119 : Masses volumiques à l'état frais des MBE

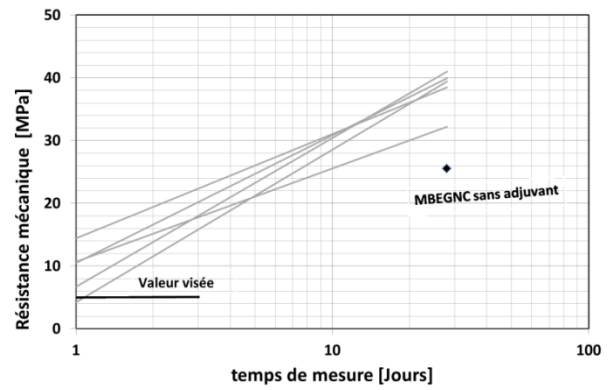


Figure 122 : Evolution des résistances mécaniques des MBEGNC

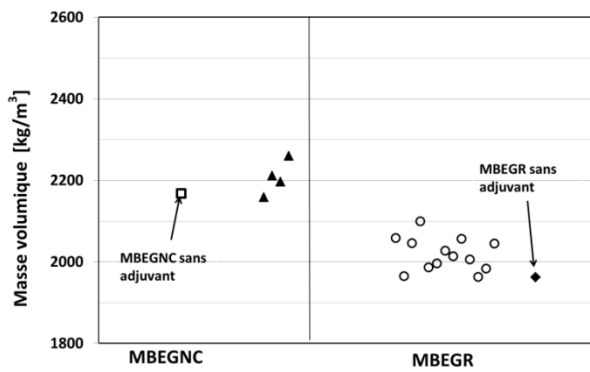


Figure 120 : Masses volumiques des MBE à 24 heures

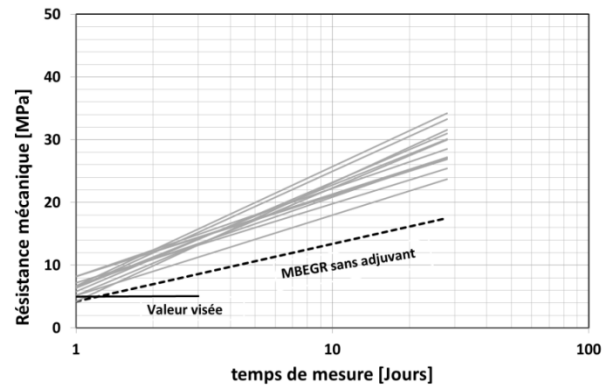


Figure 123 : Evolution des résistances mécaniques des MBEGR

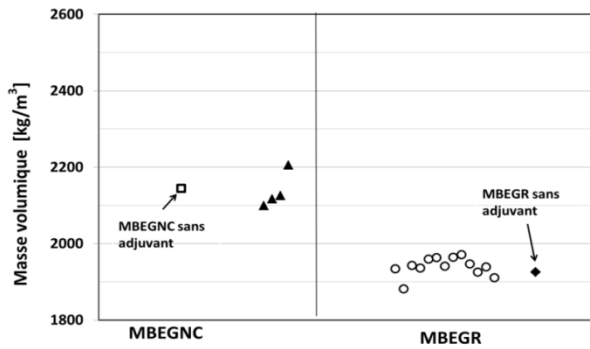


Figure 121 : Masses volumiques des MBE à 28 jours

A.10.2.3 MBE dont le squelette a été modifié

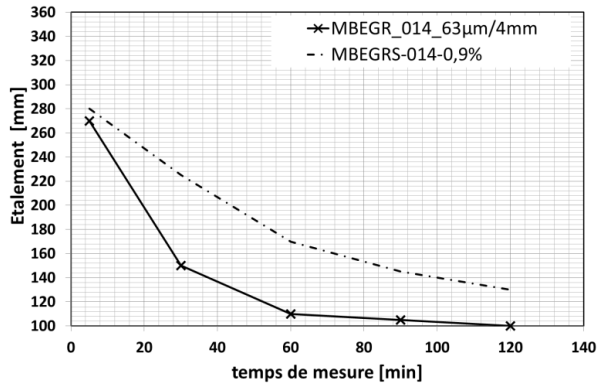


Figure 124 : Evolution de l'étalement des MBEGR dont le squelette est modifié

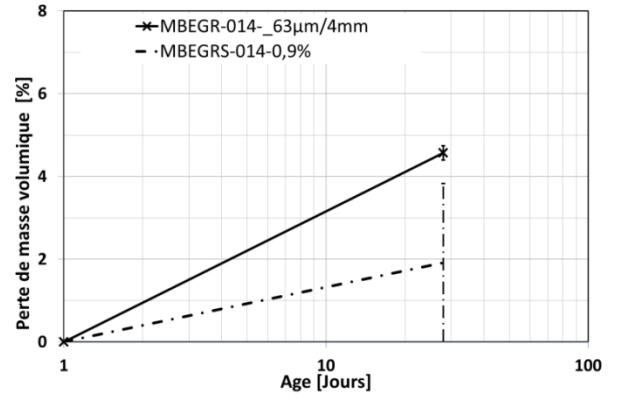


Figure 127 : Perte de masse volumique des MBE dont le squelette est modifié par rapport à 1 jour

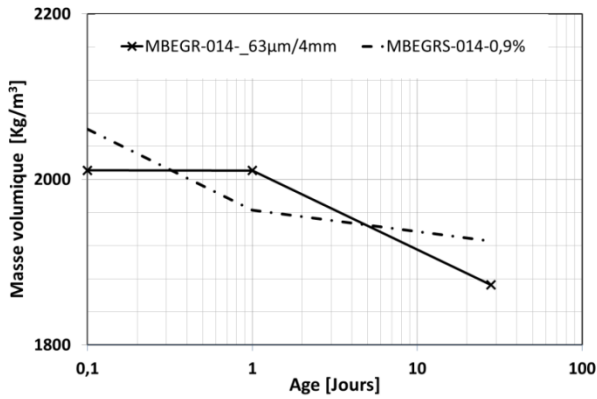


Figure 125 : Evolution de la masse volumique des MBE dont le squelette est modifié

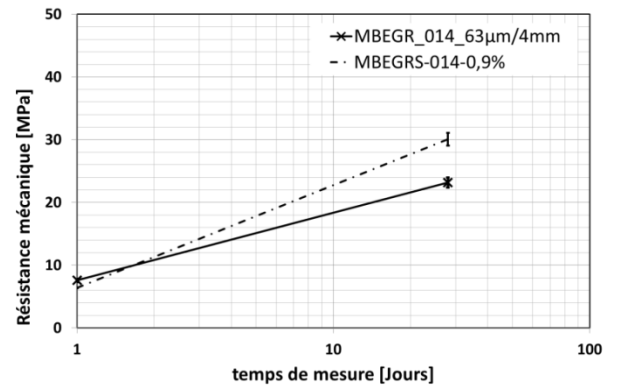


Figure 128 : Evolution des résistances mécaniques des MBEGR dont le squelette est modifié

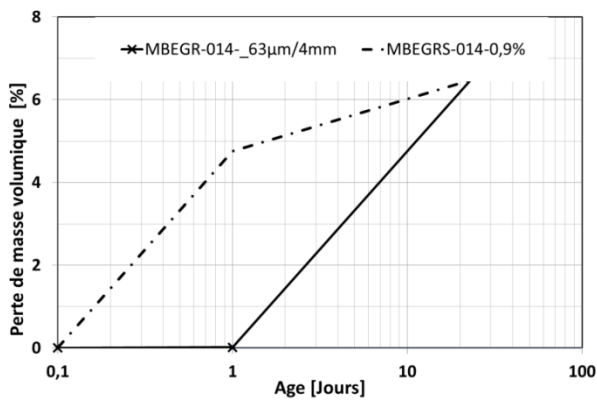


Figure 126 : Perte de masse volumique des MBE dont le squelette est modifié par rapport à l'état frais

A.10.2.4 MBE dont le dosage en ciment a été modifié

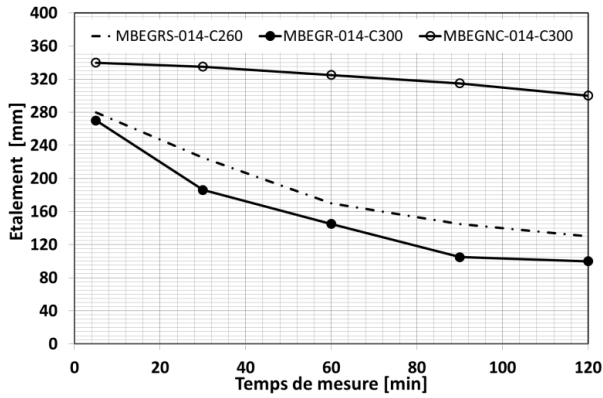


Figure 129 : Evolution de l'ouvrabilité des MBE dont la quantité de ciment a été modifiée

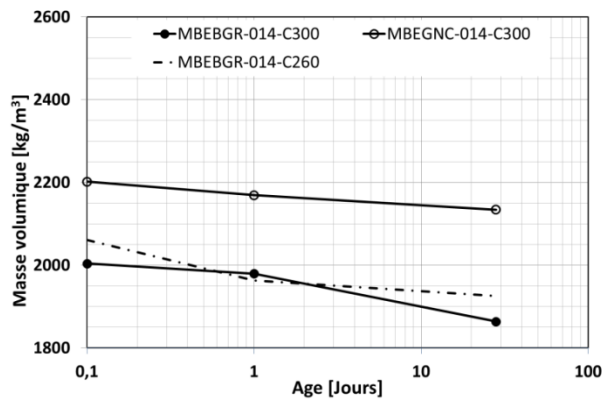


Figure 130 : Masses volumiques des MBE dont la quantité de ciment a été modifiée

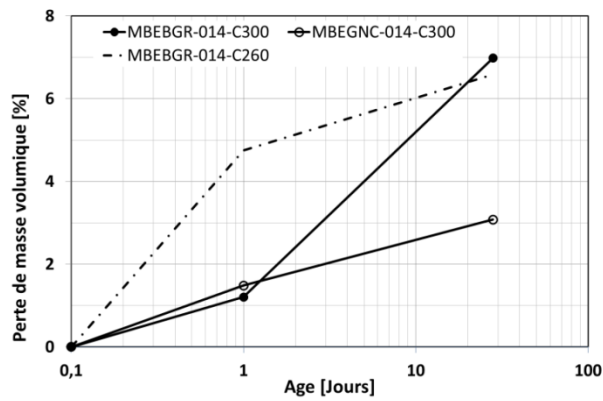


Figure 131 : Perte de masses volumiques des MBE dont la quantité de ciment a été modifiée par rapport à l'état frais

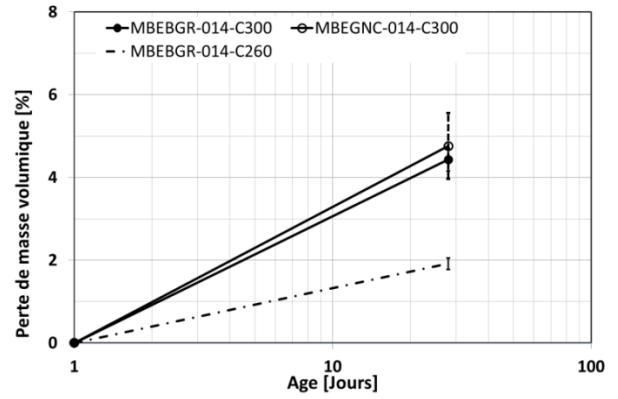


Figure 132 : Perte de masses volumiques des MBE dont la quantité de ciment a été modifiée par rapport à 1 jour

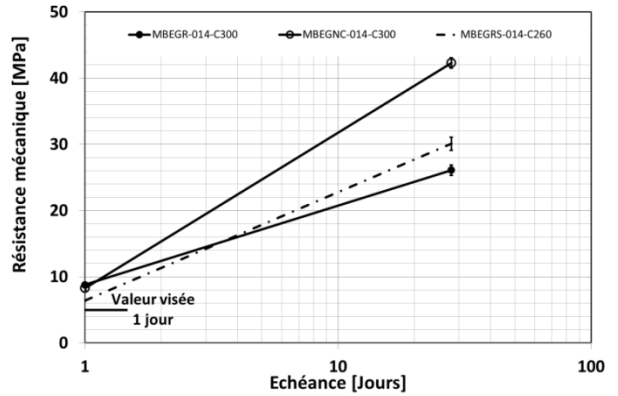


Figure 133 : Résistance mécanique des MBE adjuvantés dont la quantité de ciment a été modifiée

A.10.2.5 MBE dont la mise en œuvre a été modifiée

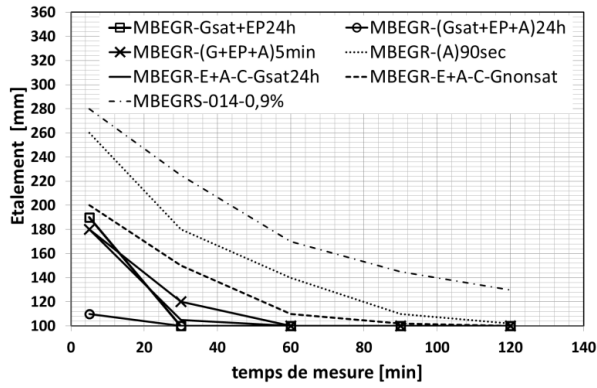


Figure 134 : Evolution de l'étalement des MBE dont le mode de malaxage a été modifié

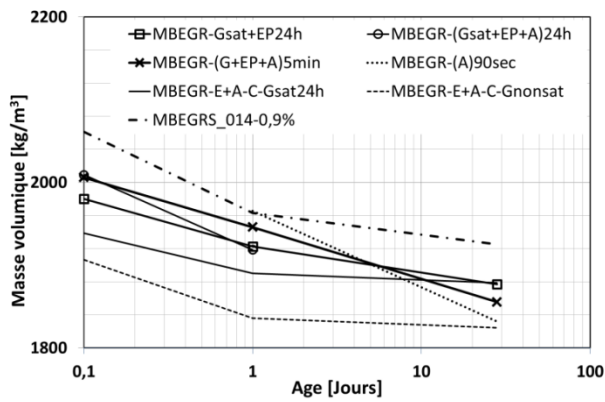


Figure 135 : Evolution de la masse volumique des MBE dont le mode de malaxage a été modifié

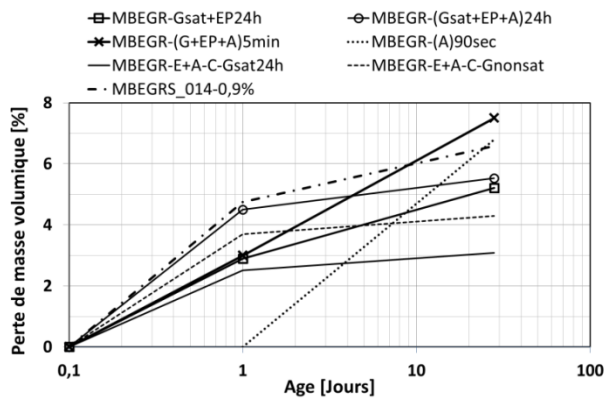


Figure 136 : Perte de masse volumique des MBE dont le mode de malaxage a été modifié par rapport à l'état frais

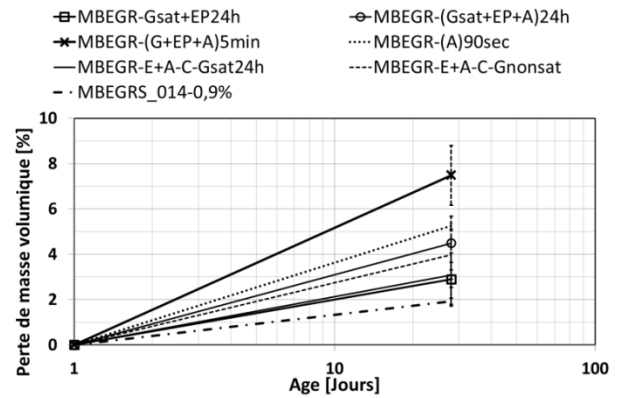


Figure 137 : Perte de masse volumique des MBE dont le mode de malaxage a été modifié par rapport à 1 jour

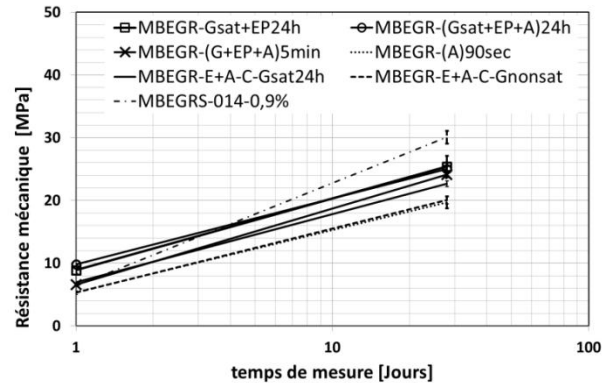


Figure 138 : Résistance mécanique des MBE dont le mode de malaxage a été modifié

A.10.3 Graphes des corrélations entre valeurs des bétons et celles des mortiers

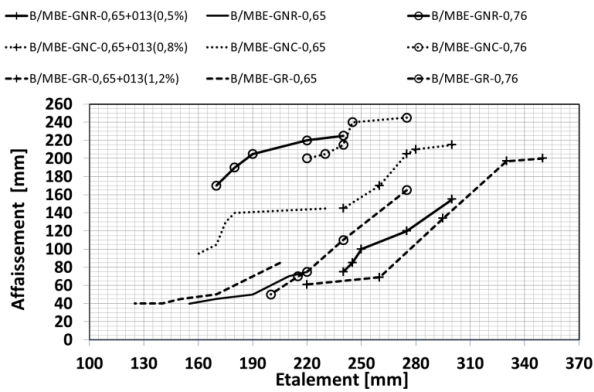


Figure 139 : corrélation béton et MBE adjuvanté ou non et sans correction en sable

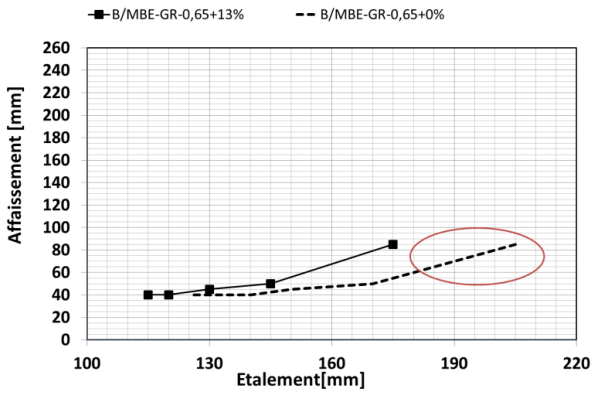
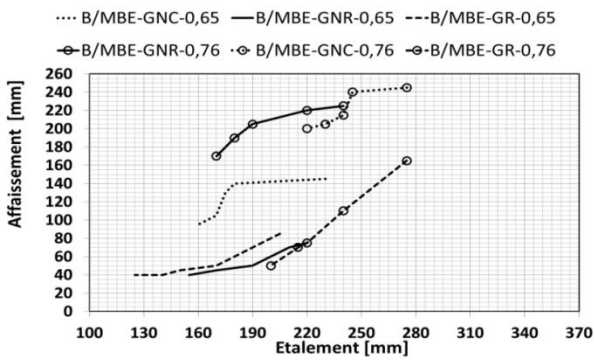


Figure 140 : corrélation béton et MBE non adjuvanté avec et sans correction en sable

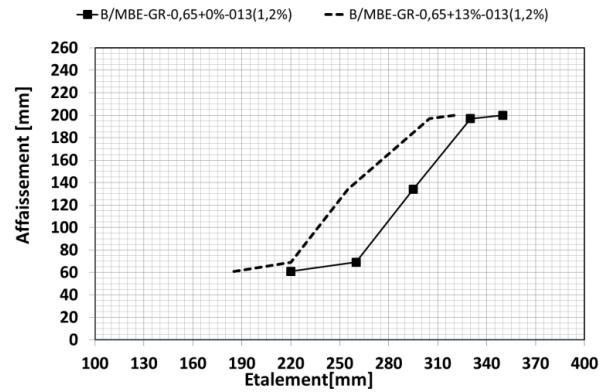


Figure 141 : corrélation béton et MBE adjuvanté avec et sans correction en sable

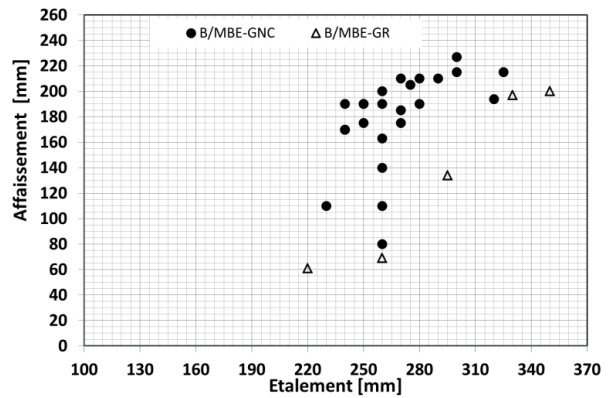


Figure 142 : corrélation béton et MBE adjuvanté et sans correction en sable

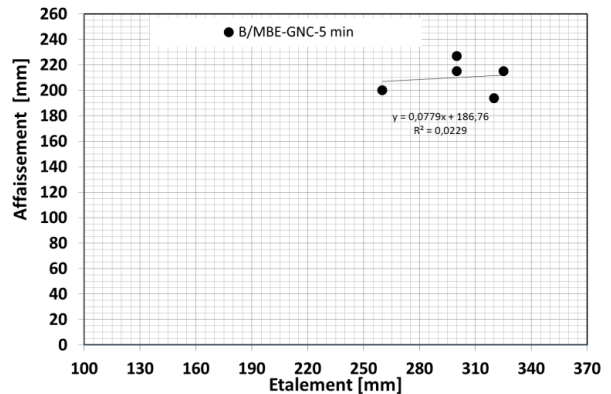


Figure 143 : corrélation béton et MBE adjuvanté et sans correction en sable à 5 min

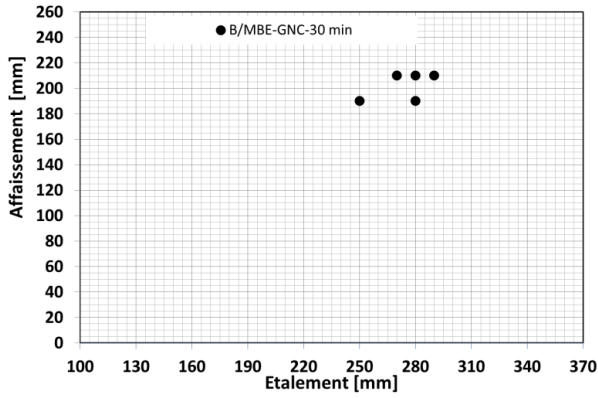


Figure 144 : corrélation béton et MBE adjuvanté et sans correction en sable à 30 min

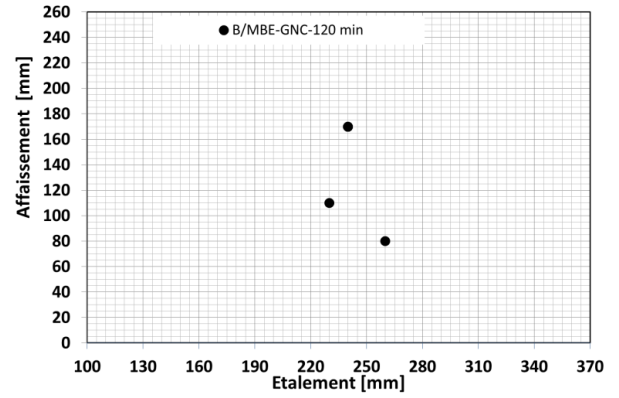


Figure 147 : corrélation béton et MBE adjuvanté et sans correction en sable à 120 min

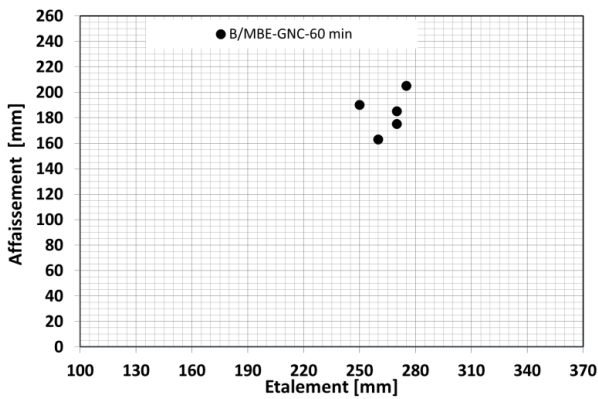


Figure 145 : corrélation béton et MBE adjuvanté et sans correction en sable à 60 min

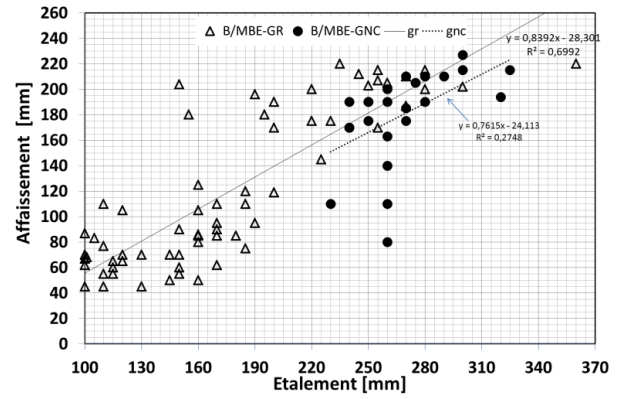


Figure 148 : corrélation des bétons et MBE adjuvantés

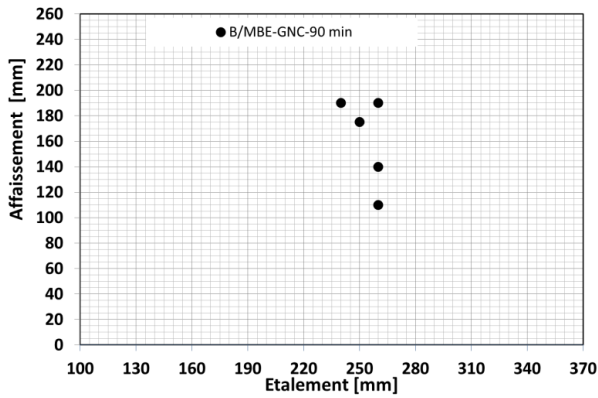


Figure 146 : corrélation béton et MBE adjuvanté et sans correction en sable à 90 min



Figure 149 : corrélation des bétons et MBE de GR adjuvantés

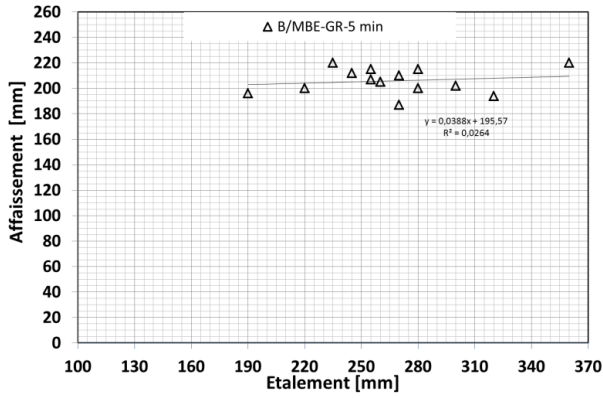


Figure 150 : corrélation béton et MBE GR adjuvantés à 5 min

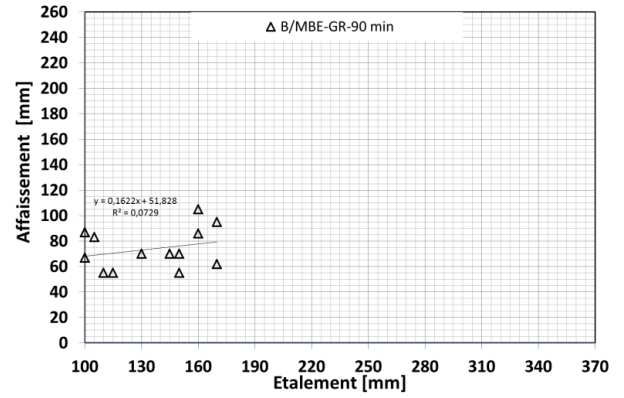


Figure 153 : corrélation béton et MBE GR adjuvantés à 90 min

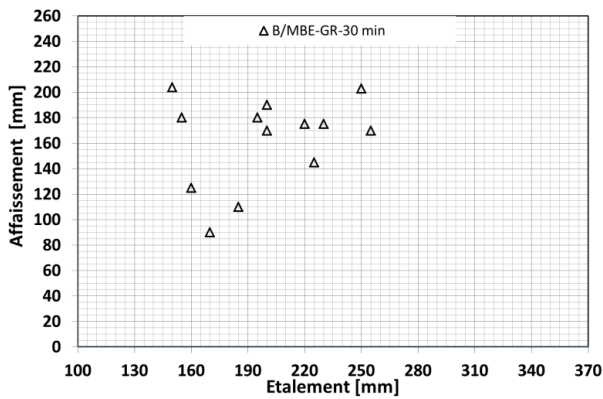


Figure 151 : corrélation béton et MBE GR adjuvantés à 30 min

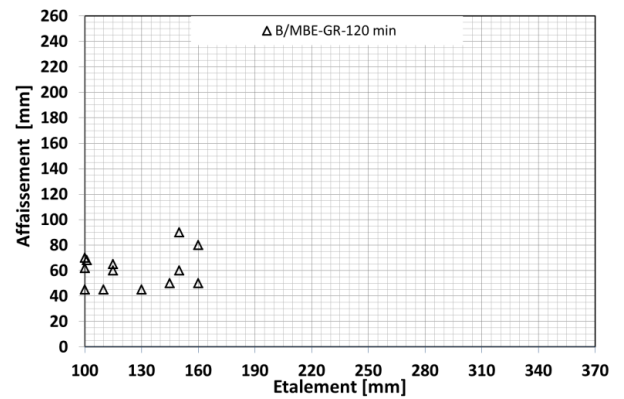


Figure 154 : corrélation béton et MBE GR adjuvantés à 120 min

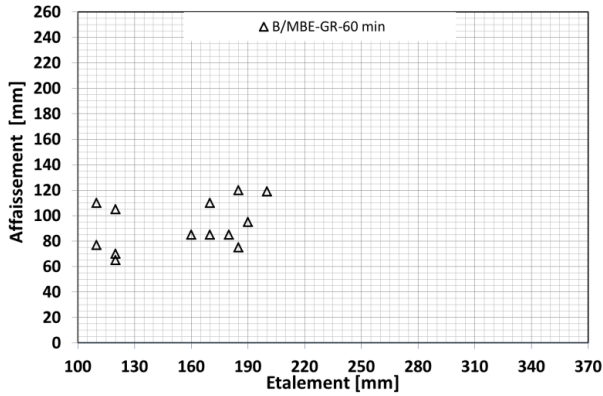


Figure 152 : corrélation béton et MBE GR adjuvantés à 60 min

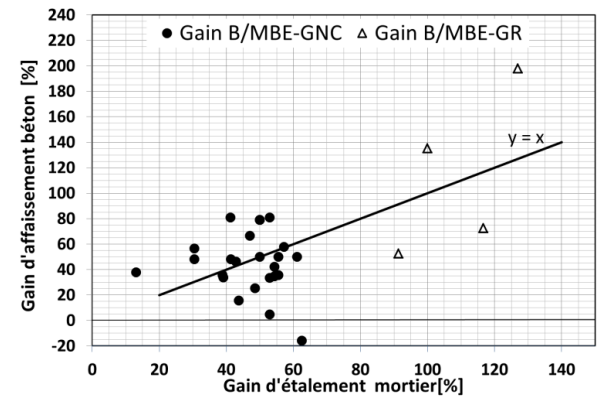


Figure 155 : corrélation entre les gains d'ouvrabilité des bétons et MBE adjuvanté et sans correction en sable

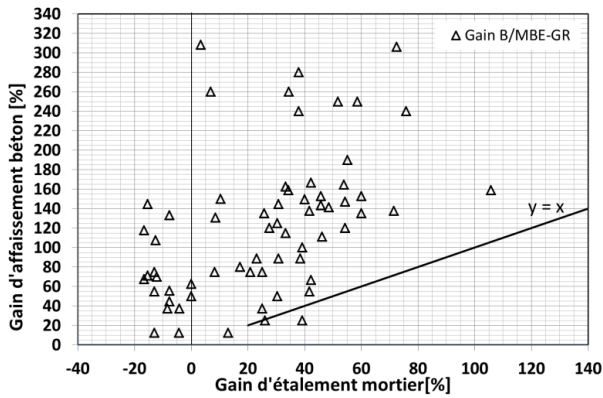


Figure 156 : corrélation entre les gains d'ouvrabilité des bétons et MBE adjuvanté et avec correction en sable

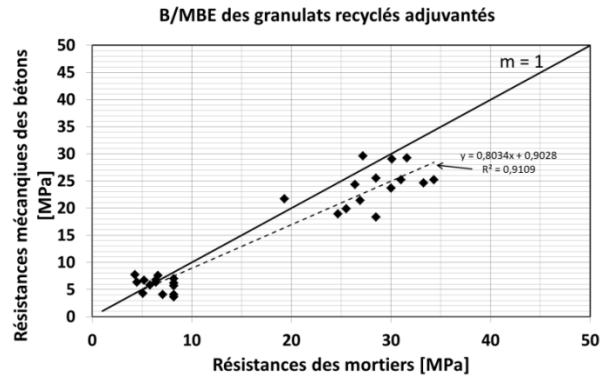


Figure 159 : corrélation entre les valeurs de résistances mécaniques des bétons et MBE de GR

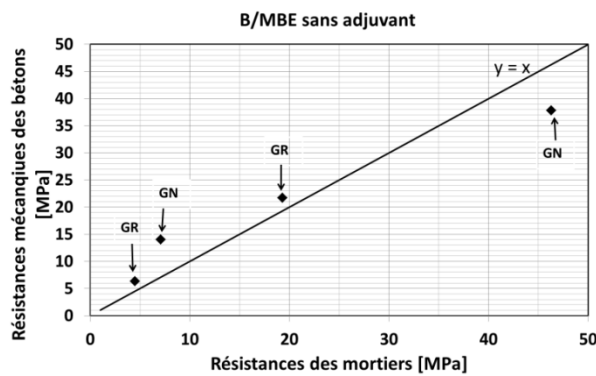


Figure 157 : corrélation entre les valeurs de Résistances mécaniques

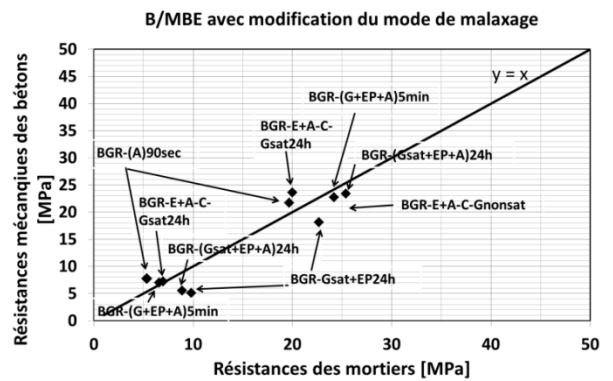


Figure 160 : corrélation entre les valeurs de résistances mécaniques des bétons et MBE de GR dont le mode de malaxage a été modifié

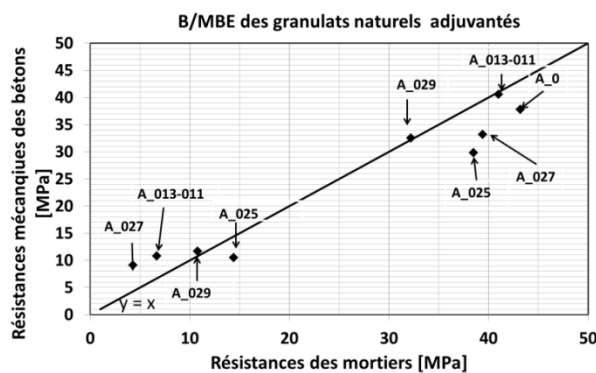


Figure 158 : corrélation entre les valeurs de résistances mécaniques des bétons et MBE de GN

A représente l'adjuvant et le chiffre le type d'adjuvant utilisé

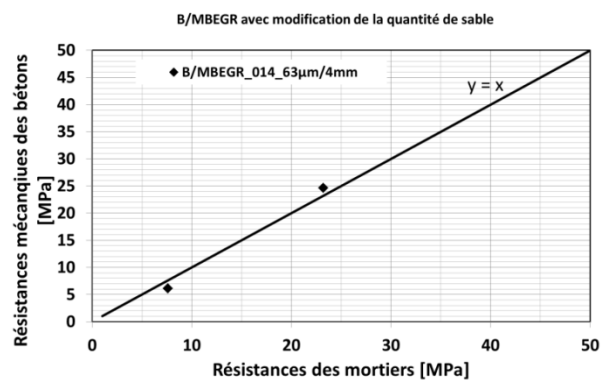


Figure 161 : corrélation entre les valeurs de résistances mécaniques des bétons et MBE de GR dont le squelette granulaire a été modifié

A.10.4 Graphes des résultats obtenus sur bétons et MBE en fonction de l'air entrainé

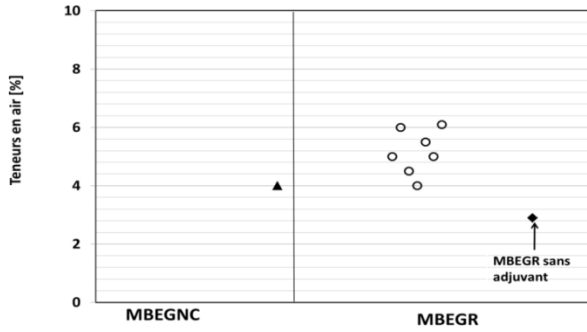


Figure 162 : Teneurs en air des MBE

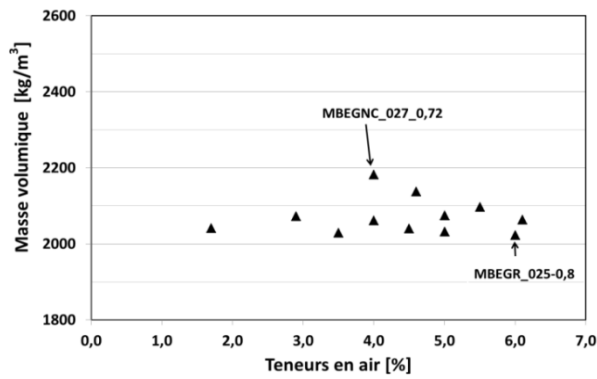


Figure 163 : Evolution de la masse volumique à 5 minutes avec la teneur en air

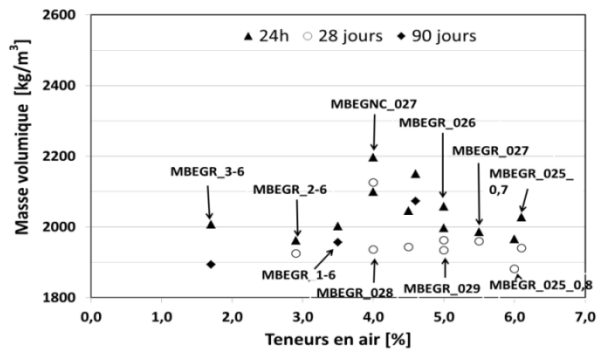


Figure 164 : Evolution de la masse volumique aux différentes échéances avec la teneur en air

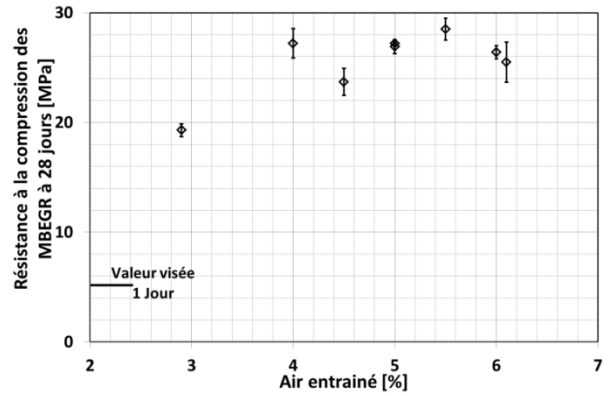


Figure 165 : Evolution des résistances à la compression des MBEs selon le pourcentage d'air entrainé

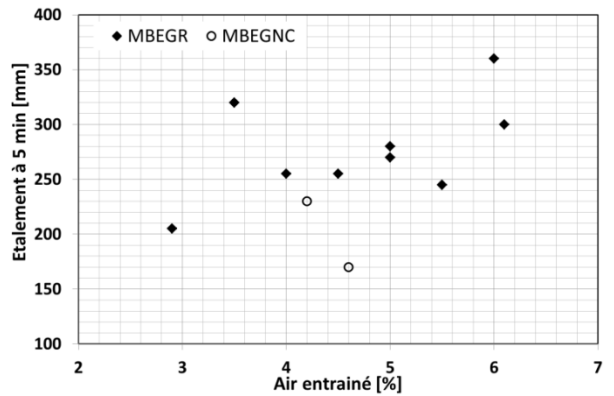


Figure 166 : Evolution de l'étalement des MBEs à 5 minutes avec la quantité d'air entrainé

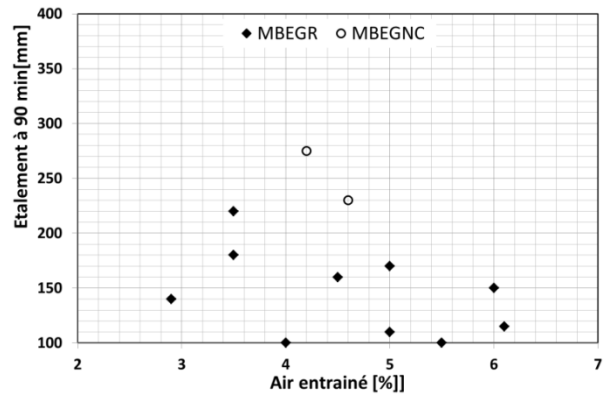


Figure 167 : Evolution de l'étalement des MBEs à 90 minutes avec la quantité d'air entrainé

A.10.5 Résultat sur mortier 0/2 mm

Tableau 34 : Résistances mécaniques obtenues sur les mortiers 0/2 mm

Essai mécanique à 28 jours					
Désignation	Charge (N)		Contrainte (MPa)		Rc/Rt
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	
C0 flexion	2239,7	± 300	5,2	± 0,6	10,49
C0 compression	88135,9	± 6000	55,1	± 3,6	
C1 flexion	2842	± 200	6,7	± 0,6	8,33
C1 compression	88804,7	± 5000	55,5	± 3,4	
C2 flexion	1866,1	± 150	4,4	± 0,3	10,77
C2 compression	75353,8	± 6000	47,1	± 3,0	
C4 flexion	1366,1	± 300	3,2	± 0,5	16,12
C4 compression	82597,1	± 4000	51,6	± 2,3	
C5 flexion	1733,5	± 150	4,1	± 0,3	9,39
C5 compression	61021,8	± 4000	38,1	± 3,0	
C6 flexion	1736	± 50	4,1	± 0,2	9,25
C6 compression	60189,3	± 7000	37,6	± 4,4	
C8 flexion	1441,6	± 100	3,4	± 0,2	4,76
C8 compression	25904,3	± 9178	16,2	± 5,7	
C9 flexion	2679,4	± 79,4	6,3	± 0,19	5,7
C9 compression	57398,7	± 1497,2	35,9	± 0,94	
C10 flexion	2592,1	± 140,17	6,1	± 0,33	5,7
C10 compression	55405,2	± 2393,73	34,6	± 1,50	
C11 flexion	2237,1	± 106,36	5,2	± 0,25	6,4
C11 compression	53 203	± 2771,87	33,3	± 1,73	

Essai mécanique à 90 jours					
Désignation	Charge (N)		Contrainte (MPa)		Rc/Rt
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	
C0 flexion	2949,6	± 450	6,9	± 1,1	8,24
C0 compression	91139,1	± 6300	57,0	± 4,0	
C2 flexion	2295,2	± 120	5,4	± 0,3	8,61
C2 compression	74082,6	± 11000	46,3	± 6,8	
C4 flexion	1967,4	± 130	4,6	± 0,4	11,61
C4 compression	85679,2	± 2600	53,5	± 6300	
C5 flexion	1596,1	± 390	3,7	± 450	11,73
C5 compression	70197,7	± 17500	43,9	± 6300	
C6 flexion	1367,8	± 50	3,2	± 450	12,83
C6 compression	65810,1	± 2300	41,1	± 6300	
C8 flexion	1457,9	± 59	3,4	± 420	6,53
C8 compression	35572,1	± 4591,4	22,2	± 6300	
C9 flexion	2787,7	± 147,38	6,5	± 0,35	5,6
C9 compression	58665,4	± 3367,2	36,7	± 1,39	
C10 flexion	2761,4	± 168,61	6,5	± 0,40	5,7
C10 compression	59719,2	± 4211,53	37,3	± 2,62	
C11 flexion	2742,1	± 340,68	6,4	± 0,8	5,67
C11 compression	58005,3	± 1448,21	36,3	± 0,54	

ANNEXE.11 Résultats complets des Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires « FDES » des bétons

Tableau 35 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGNC 4

N°	Impact environnemental	Valeur de l'indicateur pour l'unité fonctionnelle		Valeur de l'indicateur pour toute la DVT	
1	Consommation de ressources énergétiques				
	Energie primaire totale	4,24	MJ/UF	424	MJ
	Energie renouvelable	0,253	MJ/UF	25,3	MJ
	Energie non renouvelable	3,98	MJ/UF	398	MJ
2	Epuisement de ressources (ADP)	0,00162	kg équivalent antimoine (Sb)/UF	0,162	kg équivalent antimoine (Sb)
3	Consommation d'eau totale	1,87	litre/UF	187	litre
4	Déchets solides				
	Déchets valorisés (total)	3,51	kg/UF	351	kg
	Déchets éliminés				
	Déchets dangereux	0,000209	kg/UF	0,0209	kg
	Déchets non dangereux	0,00105	kg/UF	0,105	kg
	Déchets inertes	1,18	kg/UF	118	kg
Déchets radioactifs	2,54 E-05	kg/UF	0,00254	kg	
5	Changement climatique	0,556	kg équivalent CO ₂ /UF	55,6	kg équivalent CO ₂
6	Acidification atmosphérique	0,00193	kg équivalent SO ₂ /UF	0,193	kg équivalent SO ₂
7	Pollution de l'air	30,0	m ³ /UF	3004	m ³
8	Pollution de l'eau	0,140	m ³ /UF	14,0	m ³
9	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	0	kg CFC équivalent R11/UF	0	kg CFC équivalent R11
10	Formation d'ozone photochimique	0,000141	kg équivalent éthylène/UF	0,0141	kg équivalent éthylène

Tableau 36 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGNC 5

N°	Impact environnemental	Valeur de l'indicateur pour l'unité fonctionnelle		Valeur de l'indicateur pour toute la DVT	
1	Consommation de ressources énergétiques				
	Energie primaire totale	4,24	MJ/UF	424	MJ
	Energie renouvelable	0,253	MJ/UF	25,3	MJ
	Energie non renouvelable	3,99	MJ/UF	399	MJ
2	Epuisement de ressources (ADP)	0,00162	kg équivalent antimoine (Sb)/UF	0,162	kg équivalent antimoine (Sb)
3	Consommation d'eau totale	1,89	litre/UF	189	litre
4	Déchets solides				
	Déchets valorisés (total)	3,53	kg/UF	353	kg
	Déchets éliminés				
	Déchets dangereux	0,000209	kg/UF	0,0209	kg
	Déchets non dangereux	0,00105	kg/UF	0,105	kg
	Déchets inertes	1,18	kg/UF	118	kg
Déchets radioactifs	2,54 E-05	kg/UF	0,00254	kg	
5	Changement climatique	0,556	kg équivalent CO ₂ /UF	55,6	kg équivalent CO ₂
6	Acidification atmosphérique	0,00193	kg équivalent SO ₂ /UF	0,193	kg équivalent SO ₂
7	Pollution de l'air	30,1	m ³ /UF	3007	m ³
8	Pollution de l'eau	0,141	m ³ /UF	14,1	m ³
9	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	0	kg CFC équivalent R11/UF	0	kg CFC équivalent R11
10	Formation d'ozone photochimique	0,000142	kg équivalent éthylène/UF	0,0142	kg équivalent éthylène

Tableau 37 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGNC 7

N°	Impact environnemental	Valeur de l'indicateur pour l'unité fonctionnelle		Valeur de l'indicateur pour toute la DVT	
1	Consommation de ressources énergétiques				
	Energie primaire totale	4,32	MJ/UF	432	MJ
	Energie renouvelable	0,253	MJ/UF	25,3	MJ
	Energie non renouvelable	4,06	MJ/UF	406	MJ
2	Epuisement de ressources (ADP)	0,00165	kg équivalent antimoine (Sb)/UF	0,165	kg équivalent antimoine (Sb)
3	Consommation d'eau totale	1,90	litre/UF	190	litre
4	Déchets solides				
	Déchets valorisés (total)	3,53	kg/UF	353	kg
	Déchets éliminés				
	Déchets dangereux	0,000211	kg/UF	0,0211	kg
	Déchets non dangereux	0,00114	kg/UF	0,114	kg
	Déchets inertes	1,18	kg/UF	118	kg
Déchets radioactifs	2,54 E-05	kg/UF	0,00254	kg	
5	Changement climatique	0,559	kg équivalent CO ₂ /UF	55,9	kg équivalent CO ₂
6	Acidification atmosphérique	0,00196	kg équivalent SO ₂ /UF	0,196	kg équivalent SO ₂
7	Pollution de l'air	30,4	m ³ /UF	3036	m ³
8	Pollution de l'eau	0,142	m ³ /UF	14,2	m ³
9	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	0	kg CFC équivalent R11/UF	0	kg CFC équivalent R11
10	Formation d'ozone photochimique	0,000142	kg équivalent éthylène/UF	0,0142	kg équivalent éthylène

Tableau 38 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGNC 17

N°	Impact environnemental	Valeur de l'indicateur pour l'unité fonctionnelle		Valeur de l'indicateur pour toute la DVT	
1	Consommation de ressources énergétiques				
	Energie primaire totale	5,38	MJ/UF	538	MJ
	Energie renouvelable	0,253	MJ/UF	25,3	MJ
	Energie non renouvelable	5,13	MJ/UF	513	MJ
2	Epuisement de ressources (ADP)	0,00215	kg équivalent antimoine (Sb)/UF	0,215	kg équivalent antimoine (Sb)
3	Consommation d'eau totale	2,00	litre/UF	200	litre
4	Déchets solides				
	Déchets valorisés (total)	3,53	kg/UF	353	kg
	Déchets éliminés				
	Déchets dangereux	0,000237	kg/UF	0,0237	kg
	Déchets non dangereux	0,00116	kg/UF	0,116	kg
	Déchets inertes	1,18	kg/UF	118	kg
Déchets radioactifs	4,25 E-05	kg/UF	0,00425	kg	
5	Changement climatique	0,644	kg équivalent CO ₂ /UF	64,4	kg équivalent CO ₂
6	Acidification atmosphérique	0,00266	kg équivalent SO ₂ /UF	0,266	kg équivalent SO ₂
7	Pollution de l'air	39,0	m ³ /UF	3899	m ³
8	Pollution de l'eau	0,167	m ³ /UF	16,7	m ³
9	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	0	kg CFC équivalent R11/UF	0	kg CFC équivalent R11
10	Formation d'ozone photochimique	0,000253	kg équivalent éthylène/UF	0,0253	kg équivalent éthylène

Tableau 39 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGNR 4

N°	Impact environnemental	Valeur de l'indicateur pour l'unité fonctionnelle		Valeur de l'indicateur pour toute la DVT	
1	Consommation de ressources énergétiques				
	Energie primaire totale	4,24	MJ/UF	424	MJ
	Energie renouvelable	0,253	MJ/UF	25,3	MJ
	Energie non renouvelable	3,99	MJ/UF	399	MJ
2	Epuisement de ressources (ADP)	0,00161	kg équivalent antimoine (Sb)/UF	0,161	kg équivalent antimoine (Sb)
3	Consommation d'eau totale	2,44	litre/UF	244	litre
4	Déchets solides				
	Déchets valorisés (total)	3,45	kg/UF	345	kg
	Déchets éliminés				
	Déchets dangereux	0,000206	kg/UF	0,0206	kg
	Déchets non dangereux	0,00149	kg/UF	0,149	kg
	Déchets inertes	1,15	kg/UF	115	kg
Déchets radioactifs	2,55 E-05	kg/UF	0,00255	kg	
5	Changement climatique	0,555	kg équivalent CO ₂ /UF	55,5	kg équivalent CO ₂
6	Acidification atmosphérique	0,00182	kg équivalent SO ₂ /UF	0,182	kg équivalent SO ₂
7	Pollution de l'air	29,2	m ³ /UF	2921	m ³
8	Pollution de l'eau	0,139	m ³ /UF	13,9	m ³
9	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	0	kg CFC équivalent R11/UF	0	kg CFC équivalent R11
10	Formation d'ozone photochimique	0,000141	kg équivalent éthylène/UF	0,0141	kg équivalent éthylène

Tableau 40 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGNR 5

N°	Impact environnemental	Valeur de l'indicateur pour l'unité fonctionnelle		Valeur de l'indicateur pour toute la DVT	
1	Consommation de ressources énergétiques				
	Energie primaire totale	4,24	MJ/UF	424	MJ
	Energie renouvelable	0,253	MJ/UF	25,3	MJ
	Energie non renouvelable	3,99	MJ/UF	399	MJ
2	Epuisement de ressources (ADP)	0,00162	kg équivalent antimoine (Sb)/UF	0,162	kg équivalent antimoine (Sb)
3	Consommation d'eau totale	1,89	litre/UF	189	litre
4	Déchets solides				
	Déchets valorisés (total)	3,53	kg/UF	353	kg
	Déchets éliminés				
	Déchets dangereux	0,000209	kg/UF	0,0209	kg
	Déchets non dangereux	0,00105	kg/UF	0,105	kg
	Déchets inertes	1,18	kg/UF	118	kg
Déchets radioactifs	2,54 E-05	kg/UF	0,00254	kg	
5	Changement climatique	0,556	kg équivalent CO ₂ /UF	55,6	kg équivalent CO ₂
6	Acidification atmosphérique	0,00193	kg équivalent SO ₂ /UF	0,193	kg équivalent SO ₂
7	Pollution de l'air	30,1	m ³ /UF	3007	m ³
8	Pollution de l'eau	0,141	m ³ /UF	14,1	m ³
9	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	0	kg CFC équivalent R11/UF	0	kg CFC équivalent R11
10	Formation d'ozone photochimique	0,000142	kg équivalent éthylène/UF	0,0142	kg équivalent éthylène

Tableau 41 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGNR 7

N°	Impact environnemental	Valeur de l'indicateur pour l'unité fonctionnelle		Valeur de l'indicateur pour toute la DVT	
1	Consommation de ressources énergétiques				
	Energie primaire totale	4,29	MJ/UF	429	MJ
	Energie renouvelable	0,253	MJ/UF	25,3	MJ
	Energie non renouvelable	4,04	MJ/UF	404	MJ
2	Epuisement de ressources (ADP)	0,00163	kg équivalent antimoine (Sb)/UF	0,163	kg équivalent antimoine (Sb)
3	Consommation d'eau totale	2,48	litre/UF	248	litre
4	Déchets solides				
	Déchets valorisés (total)	3,47	kg/UF	347	kg
	Déchets éliminés				
	Déchets dangereux	0,000208	kg/UF	0,0208	kg
	Déchets non dangereux	0,00155	kg/UF	0,155	kg
	Déchets inertes	1,16	kg/UF	116	kg
Déchets radioactifs	2,55 E-05	kg/UF	0,00255	kg	
5	Changement climatique	0,557	kg équivalent CO ₂ /UF	55,7	kg équivalent CO ₂
6	Acidification atmosphérique	0,00184	kg équivalent SO ₂ /UF	0,184	kg équivalent SO ₂
7	Pollution de l'air	29,4	m ³ /UF	2942	m ³
8	Pollution de l'eau	0,141	m ³ /UF	14,1	m ³
9	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	0	kg CFC équivalent R11/UF	0	kg CFC équivalent R11
10	Formation d'ozone photochimique	0,000142	kg équivalent éthylène/UF	0,0142	kg équivalent éthylène

Tableau 42 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGNR 17

N°	Impact environnemental	Valeur de l'indicateur pour l'unité fonctionnelle		Valeur de l'indicateur pour toute la DVT	
1	Consommation de ressources énergétiques				
	Energie primaire totale	4,79	MJ/UF	479	MJ
	Energie renouvelable	0,253	MJ/UF	25,3	MJ
	Energie non renouvelable	4,54	MJ/UF	454	MJ
2	Epuisement de ressources (ADP)	0,00187	kg équivalent antimoine (Sb)/UF	0,187	kg équivalent antimoine (Sb)
3	Consommation d'eau totale	2,52	litre/UF	252	litre
4	Déchets solides				
	Déchets valorisés (total)	3,47	kg/UF	347	kg
	Déchets éliminés				
	Déchets dangereux	0,000220	kg/UF	0,0220	kg
	Déchets non dangereux	0,00155	kg/UF	0,155	kg
	Déchets inertes	1,16	kg/UF	116	kg
Déchets radioactifs	3,35 E-05	kg/UF	0,00335	kg	
5	Changement climatique	0,597	kg équivalent CO ₂ /UF	59,7	kg équivalent CO ₂
6	Acidification atmosphérique	0,00217	kg équivalent SO ₂ /UF	0,217	kg équivalent SO ₂
7	Pollution de l'air	33,5	m ³ /UF	3348	m ³
8	Pollution de l'eau	0,153	m ³ /UF	15,3	m ³
9	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	0	kg CFC équivalent R11/UF	0	kg CFC équivalent R11
10	Formation d'ozone photochimique	0,000194	kg équivalent éthylène/UF	0,0194	kg équivalent éthylène

Tableau 43 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGR 4

N°	Impact environnemental	Valeur de l'indicateur pour l'unité fonctionnelle		Valeur de l'indicateur pour toute la DVT	
1	Consommation de ressources énergétiques				
	Energie primaire totale	4.10	MJ/UF	410	MJ
	Energie renouvelable	0.252	MJ/UF	25.2	MJ
	Energie non renouvelable	3.85	MJ/UF	385	MJ
2	Epuisement de ressources (ADP)	0.00158	kg équivalent antimoine (Sb)/UF	0.158	kg équivalent antimoine (Sb)
3	Consommation d'eau totale	1.85	litre/UF	185	litre
4	Déchets solides				
	Déchets valorisés (total)	2.94	kg/UF	294	kg
	Déchets éliminés				
	Déchets dangereux	0.000219	kg/UF	0.0219	kg
	Déchets non dangereux	0.00115	kg/UF	0.115	kg
	Déchets inertes	0.986	kg/UF	98,6	kg
Déchets radioactifs	2.35 E-05	kg/UF	0.00235	kg	
5	Changement climatique	0.549	kg équivalent CO ₂ /UF	54,9	kg équivalent CO ₂
6	Acidification atmosphérique	0.00177	kg équivalent SO ₂ /UF	0,177	kg équivalent SO ₂
7	Pollution de l'air	28,0	m ³ /UF	2799	m ³
8	Pollution de l'eau	0.125	m ³ /UF	12,5	m ³
9	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	0	kg CFC équivalent R11/UF	0	kg CFC équivalent R11
10	Formation d'ozone photochimique	0.000133	kg équivalent éthylène/UF	0,0133	kg équivalent éthylène

Tableau 44 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGR 5

N°	Impact environnemental	Valeur de l'indicateur pour l'unité fonctionnelle		Valeur de l'indicateur pour toute la DVT	
1	Consommation de ressources énergétiques				
	Energie primaire totale	4.12	MJ/UF	412	MJ
	Energie renouvelable	0.252	MJ/UF	25.2	MJ
	Energie non renouvelable	3.87	MJ/UF	387	MJ
2	Epuisement de ressources (ADP)	0.00159	kg équivalent antimoine (Sb)/UF	0.159	kg équivalent antimoine (Sb)
3	Consommation d'eau totale	2.09	litre/UF	209	litre
4	Déchets solides				
	Déchets valorisés (total)	3.11	kg/UF	311	kg
	Déchets éliminés				
	Déchets dangereux	0.000219	kg/UF	0.0219	kg
	Déchets non dangereux	0.00116	kg/UF	0.116	kg
	Déchets inertes	1.04	kg/UF	104	kg
Déchets radioactifs	2.38 E-05	kg/UF	0.00238	kg	
5	Changement climatique	0.551	kg équivalent CO ₂ /UF	55,1	kg équivalent CO ₂
6	Acidification atmosphérique	0.00179	kg équivalent SO ₂ /UF	0,179	kg équivalent SO ₂
7	Pollution de l'air	28.2	m ³ /UF	2822	m ³
8	Pollution de l'eau	0.130	m ³ /UF	13,0	m ³
9	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	0	kg CFC équivalent R11/UF	0	kg CFC équivalent R11
10	Formation d'ozone photochimique	0.000135	kg équivalent éthylène/UF	0,0135	kg équivalent éthylène

Tableau 45 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGR 7

N°	Impact environnemental	Valeur de l'indicateur pour l'unité fonctionnelle		Valeur de l'indicateur pour toute la DVT	
1	Consommation de ressources énergétiques				
	Energie primaire totale	4,23	MJ/UF	423	MJ
	Energie renouvelable	0,252	MJ/UF	25,2	MJ
	Energie non renouvelable	3,98	MJ/UF	398	MJ
2	Epuisement de ressources (ADP)	0,00164	kg équivalent antimoine (Sb)/UF	0,164	kg équivalent antimoine (Sb)
3	Consommation d'eau totale	2,09	litre/UF	209	litre
4	Déchets solides				
	Déchets valorisés (total)	3,12	kg/UF	312	kg
	Déchets éliminés				
	Déchets dangereux	0,000222	kg/UF	0,0222	kg
	Déchets non dangereux	0,00129	kg/UF	0,129	kg
	Déchets inertes	1,04	kg/UF	104	kg
Déchets radioactifs	2,38 E-05	kg/UF	0,00238	kg	
5	Changement climatique	0,556	kg équivalent CO ₂ /UF	55,6	kg équivalent CO ₂
6	Acidification atmosphérique	0,00184	kg équivalent SO ₂ /UF	0,184	kg équivalent SO ₂
7	Pollution de l'air	28,7	m ³ /UF	2866	m ³
8	Pollution de l'eau	0,131	m ³ /UF	13,1	m ³
9	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	0	kg CFC équivalent R11/UF	0	kg CFC équivalent R11
10	Formation d'ozone photochimique	0,000135	kg équivalent éthylène/UF	0,0135	kg équivalent éthylène

Tableau 46 : Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 : cas du BGR 17

N°	Impact environnemental	Valeur de l'indicateur pour l'unité fonctionnelle		Valeur de l'indicateur pour toute la DVT	
1	Consommation de ressources énergétiques				
	Energie primaire totale	4,57	MJ/UF	457	MJ
	Energie renouvelable	0,252	MJ/UF	25,2	MJ
	Energie non renouvelable	4,32	MJ/UF	432	MJ
2	Epuisement de ressources (ADP)	0,00180	kg équivalent antimoine (Sb)/UF	0,180	kg équivalent antimoine (Sb)
3	Consommation d'eau totale	2,12	litre/UF	212	litre
4	Déchets solides				
	Déchets valorisés (total)	3,12	kg/UF	312	kg
	Déchets éliminés				
	Déchets dangereux	0,000230	kg/UF	0,0230	kg
	Déchets non dangereux	0,00129	kg/UF	0,129	kg
	Déchets inertes	1,05	kg/UF	105	kg
Déchets radioactifs	2,93 E-05	kg/UF	0,00293	kg	
5	Changement climatique	0,583	kg équivalent CO ₂ /UF	58,3	kg équivalent CO ₂
6	Acidification atmosphérique	0,00206	kg équivalent SO ₂ /UF	0,206	kg équivalent SO ₂
7	Pollution de l'air	31,4	m ³ /UF	3141	m ³
8	Pollution de l'eau	0,139	m ³ /UF	13,9	m ³
9	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	0	kg CFC équivalent R11/UF	0	kg CFC équivalent R11
10	Formation d'ozone photochimique	0,000171	kg équivalent éthylène/UF	0,0171	kg équivalent éthylène

N°	Impact environnemental	Valeur de l'indicateur pour l'unité fonctionnelle		Valeur de l'indicateur pour toute la DVT	
1	Consommation de ressources énergétiques				
	Energie primaire totale	4,57	MJ/UF	457	MJ
	Energie renouvelable	0,252	MJ/UF	25,2	MJ
	Energie non renouvelable	4,32	MJ/UF	432	MJ
2	Epuisement de ressources (ADP)	0,00180	kg équivalent antimoine (Sb)/UF	0,180	kg équivalent antimoine (Sb)
3	Consommation d'eau totale	2,12	litre/UF	212	litre
4	Déchets solides				
	Déchets valorisés (total)	3,12	kg/UF	312	kg
	Déchets éliminés				
	Déchets dangereux	0,000230	kg/UF	0,0230	kg
	Déchets non dangereux	0,00129	kg/UF	0,129	kg
	Déchets inertes	1,05	kg/UF	105	kg
Déchets radioactifs	2,93 E-05	kg/UF	0,00293	kg	
5	Changement climatique	0,583	kg équivalent CO ₂ /UF	58,3	kg équivalent CO ₂
6	Acidification atmosphérique	0,00206	kg équivalent SO ₂ /UF	0,206	kg équivalent SO ₂
7	Pollution de l'air	31,4	m ³ /UF	3141	m ³
8	Pollution de l'eau	0,139	m ³ /UF	13,9	m ³
9	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	0	kg CFC équivalent R11/UF	0	kg CFC équivalent R11
10	Formation d'ozone photochimique	0,000171	kg équivalent éthylène/UF	0,0171	kg équivalent éthylène

Références bibliographiques

- Abbas, A., Fathifazl, G., Fournier, B., Isgor, O.B., Zavadil, R., Razaqpur, A.G., Foo, S., 2009. Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis. *Materials Characterization* 60, 716–728. doi:10.1016/j.matchar.2009.01.010
- Afnor, NF P 18-545, 2011. Granulats: Elements de définition, conformité et codification. Septembre 2011 p 74.
- Afnor, Norme NF EN 206-1, 2014. Béton: Spécification, performances, production et conformité (Indice de classement : P18-325) 99.
- Afnor, Norme NF EN 206-1, 2004. Béton: Spécification, performances, production et conformité 95.
- Afnor, Norme NF EN 206-1/CN, 2012. Béton-Partie 1 : Spécification, performance, production et conformité- Complément national à la norme NF EN 206-1 (Indice de classement : P18-325-1/CN) 108.
- Afnor, Norme NF EN 933-11, 2009. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats 11.
- Afnor, Norme NF EN 12620, 2003. Granulats pour béton 1–47.
- Ann, K.Y., Moon, H.Y., Kim, Y.B., Ryou, J., 2008. Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials. *Waste Management* 28, 993–999. doi:10.1016/j.wasman.2007.03.003
- Barbudo, A., de Brito, J., Evangelista, L., Bravo, M., Agrela, F., 2013. Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete. *Journal of Cleaner Production* 59, 93–98. doi:10.1016/j.jclepro.2013.06.022
- Bernier, G., 1983. Le recyclage de béton sous forme de granulats (Thèse 3ième cycle Génie Mécanique). Pierre et Marie Curie, Paris . p.306.
- Braymand, S., 2012. Study of rheological and mechanical properties of recycled brick aggregate concrete.
- Braymand, S., 2010. Influence de l'utilisation de granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques et physiques des bétons.
- Braymand, S., Feugeas, F., Serres, N., Kunwufine, D., Munzer, C., Haniche, R., 2013. Bétons de granulats recyclés (et aux laitiers de hauts fourneaux).
- Braymand, S., François, P., Feugeas, F., Fond, C., 2015. Rheological properties of recycled aggregate concrete using superplasticizers. *JCEA "sous presse"* 15.
- Braymand, S., François, P., Feugeas, F., Fond, C., 2012a. Rheological properties of recycled aggregate concrete using superplasticizers, in: Tenth International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. Prague (Czech republic), p. 15.
- Braymand, S., François, P., Grondin, A., Feugeas, F., Fond, C., 2012b. Propriétés rhéologiques, physiques et mécaniques des bétons de granulats recyclés. Presented at the XXXe Rencontres AUGC-IBPSA, Chambéry, Savoie, p. 10.P.
- Braymand, S., Grondin, A., François, P., Feugeas, F., 2012. Rheological properties of recycled aggregate concrete using superplasticizers, in: Twelfth International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues. Prague (Czech republic), p. 15.
- Brito, J. de, Saikia, N., 2013. Recycled aggregate in concrete use of industrial, construction and demolition waste. Springer, London; New York.

- Butler, L., West, J.S., Tighe, S.L., 2013. Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength. *Construction and Building Materials* 47, 1292–1301. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.074
- Butler, L., West, J.S., Tighe, S.L., 2011. The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. *Cement and Concrete Research* 41, 1037–1049. doi:10.1016/j.cemconres.2011.06.004
- Buyle-Bodin, F., Hadjieva-Zaharieva, 2002. Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete. *Materials and Structures* 35, 504–509.
- Casuccio, M., Torrijos, M.C., Giaccio, G., Zerbino, R., 2008. Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials* 22, 1500–1506. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.03.032
- Charonnat, Y., 2011. Etude de faisabilité pour un Projet National de R&D sur le recyclage complet des bétons.
- Coquillat, G., 1982. Recyclage des matériaux de démolition dans la confection du béton.
- Corinaldesi, V., Moriconi, G., 2010. Recycling of rubble from building demolition for low-shrinkage concretes. *Waste Management* 30, 655–659. doi:10.1016/j.wasman.2009.11.026
- Corinaldesi, V., Moriconi, G., 2009. Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials* 23, 2869–2876. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004
- CYR, M., 1999. Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires. L'INSA de Toulouse et L'Université de SHERBROOKE.
- Cyr, M., 1999. Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires. L'INSA de Toulouse et L'Université de SHERBROOKE.
- Dao, D.-T., 2012. (Multi-) recyclage du béton hydraulique (Thèse de Doctorat de Génie Civil). Ecole centrale de Nantes, Nantes, 2012, 312 p.
- Debieb, F., Kenai, S., 2008. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials* 22, 886–893. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013
- De Juan, M.S., Gutiérrez, P.A., 2009. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials* 23, 872–877. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012
- De Juan, M.S., Gutiérrez, P.A., 2004. Influence of recycled aggregate quality on concrete properties, in: *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*. 545-553, Barcelona, Spain.
- El Dalati, R., 2007. recommendations for recycling processing and reuse of concrete, in: *Proceeding of IMECE2007, 2007 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 545-553, USA.
- Escadeillas, G., 2010. Hydratation, Structuration des matériaux cimentaires. Cours UPS-INSA Toulouse.
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., Barra, M., 2007. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research* 37, 735–742. doi:10.1016/j.cemconres.2007.02.002

- Evangelista, L., de Brito, J., 2007. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites* 29, 397–401. doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004
- Evangelista, L.R., de Brito, J.C., 2004. Criteria for the use of fine recycled concrete aggregates in concrete production, in: *Proc. Int. RILEM Conference: The Use of Recycled Materials in Building and Structures*, RILEM. pp. 8–11.
- Foissy, A., Pierre, A., 1990. Les mécanismes d'action des fluidifiants . *Ciments, Bétons, Plâtres et Chaux*. (Ciments, Bétons, Plâtres et Chaux No. 782).
- García-González, J., Rodríguez-Robles, D., Juan-Valdés, A., Morán-del Pozo, J., Guerra-Romero, M., 2014. Pre-Saturation Technique of the Recycled Aggregates: Solution to the Water Absorption Drawback in the Recycled Concrete Manufacture. *Materials* 7, 6224–6236. doi:10.3390/ma7096224
- Gokce, A., Nagataki, S., Saeki, T., Hisada, M., 2004. Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete. *Cement and Concrete Research* 34, 799–806. doi:10.1016/j.cemconres.2003.09.014
- Gómez-Soberón, J.M., 2002. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. *Cement and Concrete Research* 32, 1301–1311. doi:10.1016/S0008-8846(02)00795-0
- González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F., 2008. Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. *Materials and mechanical properties. Building and Environment* 43, 429–437. doi:10.1016/j.buildenv.2007.01.008
- González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F., Eiras-López, J., Seara-Paz, S., 2011. Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete. *Materials and Structures* 44, 1759–1771. doi:10.1617/s11527-011-9736-7
- Hansen, T.C., 1986. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. *Materials and structures* 19, 201–246.
- Hasaba, S., Kawamura, M., Toriik, K., Takemoto, K., 1981. Drying shrinkage and durability of the concrete made of recycled concrete aggregate, in: *Trans, of the Japan Concrete Institute. Japan*, pp. 55–60.
- International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Lauritzen, E.K., RILEM Technical Committee 121-DRG., Staten byggeforskningsinstitut (Denmark), 1994. *Demolition and reuse of concrete and masonry guidelines for demolition and reuse of concrete and masonry: proceedings of the Third International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry held in Odense, Denmark, organized by RILEM TC 121-DRG and the Danish Building Research Institute, Odense, Denmark 24-27 October 1993*. E & FN Spon, London.
- International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, 1992. *Recycling of demolished concrete and masonry: report of Technical Committee 37-DRC, Demolition and Reuse of Concrete*, 1st ed. ed, RILEM report. E & FN Spon, London ; New York.
- Katz, A., 2003. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research* 33, 703–711. doi:10.1016/S0008-8846(02)01033-5
- Khatib, J.M., 2005. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research* 35, 763–769. doi:10.1016/j.cemconres.2004.06.017

- Kou, S.C., Poon, C.S., 2009. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites* 31, 622–627. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.06.005
- Limbachiya, M.C., 2005. Performance of recycled aggregate concrete. RILEM Publications SARL, pp. 127–136. doi:10.1617/2912143640.015
- López-Gayarre, F., Serna, P., Domingo-Cabo, A., Serrano-López, M.A., López-Colina, C., 2009. Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste Management* 29, 3022–3028. doi:10.1016/j.wasman.2009.07.010
- Malhotra, V.M., 1976. The use of recycled concrete as new aggregate, in: *Proc. of Symposium, Energy and Resource Conservation in the Cement and Concrete Industry*. Ottawa.
- Marta Sanchez de Juan, Pilar Alocjos Gutiérrez, 2004. Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, in: *International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structure*. RILEM, Barcelona, Spain, pp. 536–544.
- Mas, B., Cladera, A., Olmo, T. del, Pitarch, F., 2012. Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use. *Construction and Building Materials* 27, 612–622. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.073
- Maximilien, S., 1995. Contribution à l'étude du comportement rhéologique des bétons fluides. INSA de Lyon, 1995, 217p, Lyon.
- Meftah, H., Arabi, N., 2011. Les granulats recyclés humidifiés : comportements des bétons frais et durcis, in: *XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil*. Tlemcen, p. 10.
- Meftah, H., Kebaili, O., Oucief, H., Berredjem, L., Arabi, N., 2013. Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. *Journal of Cleaner Production* 54, 282–288. doi:10.1016/j.jclepro.2013.05.009
- Nagataki, S., Gokce, A., Saeki, T., Hisada, M., 2004. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research* 34, 965–971. doi:10.1016/j.cemconres.2003.11.008
- Nixon, P.J., 1978. Recycled concrete as an aggregate for concrete. *Materials and Structures* 11, 371–378.
- Padmini, A.K., Ramamurthy, K., Mathews, M.S., 2009. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials* 23, 829–836. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.03.006
- Pagé, M., Spiratos, N., 2000. The role of superplasticizers in the development of environmentally-friendly concrete, in: *Two Day CANMET/ACI International Symposium on Concrete Technology for Sustainable Development*. Vancouver, Canada.
- Pereira, P., Evangelista, L., de Brito, J., 2012. The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials* 28, 722–729. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.050
- Poon, C.S., Lam, C.S., 2008. The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks. *Cement and Concrete Composites* 30, 283–289. doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.10.005
- Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L., Fok, H., Kou, S.C., 2004. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research* 34, 31–36. doi:10.1016/S0008-8846(03)00186-8

- Québaud, M., Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., 1998. Le comportement des bétons incluant des granulats recyclés. *Revue Française de Génie Civil* 2, 969–984. doi:10.1080/12795119.1998.9692222
- Sagoe-Crentsil, K.K., Brown, T., Taylor, A.H., 2001. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research* 31, 707–712. doi:10.1016/S0008-8846(00)00476-2
- Sani, D., Moriconi, G., Fava, G., Corinaldesi, V., 2005. Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates. *Waste Management* 25, 177–182. doi:10.1016/j.wasman.2004.12.006
- Seo, D.S., Choi, H.B., 2014. Effects of the old cement mortar attached to the recycled aggregate surface on the bond characteristics between aggregate and cement mortar. *Construction and Building Materials* 59, 72–77.
- Spiratos, N., 2003. Superplasticizers for concrete: fundamentals, technology, and practice. *Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development*, Inc., Ottawa, Ontario.
- Sri Ravindrarajah, R., Tam, C.T., 1987a. Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete. *Magazine of Concrete Research* 39.
- Sri Ravindrarajah, R., Tam, C.T., 1987b. Recycling concrete as fine aggregate in concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 9, 235–241. doi:10.1016/0262-5075(87)90007-8
- Sri Ravindrarajah, R., Tam, C.T., 1985. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of Concrete Research* 37, 29–38. doi:10.1680/mac.1985.37.130.29
- Tomasawa, F., 1975. Studies on the reuses of demolished concrete.
- Topçu, İ.B., Şengel, S., 2004. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research* 34, 1307–1312. doi:10.1016/j.cemconres.2003.12.019
- Torben, C.H., Erik Boegh, 1985. Elasticity and Drying Shrinkage Concrete of Recycled-Aggregate. *ACI Journal Proceedings* 82. doi:10.14359/10374
- Torben, C.H., Hendriks, N., 1983. strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete International* 5, 79–83.
- Vieira, J.P.B., Correia, J.R., de Brito, J., 2011. Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. *Cement and Concrete Research* 41, 533–541. doi:10.1016/j.cemconres.2011.02.002
- Xiao, J., Huang, Y., Yang, J., Zhang, C., 2012. Mechanical properties of confined recycled aggregate concrete under axial compression. *Construction and Building Materials* 26, 591–603. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.062
- Yang, J., Du, Q., Bao, Y., 2011. Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Construction and Building Materials* 25, 1935–1945. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.063
- Yaprak, H., Yilmaz aruntas, H., Demir, I., Simsek, O., Durmus, G., 2011. Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties. *International Journal of physique sciences* 2455–2461.
- Zagurskij, V., Zhadanovskij, B., 1985. Breaking reinforced concrete and recycling crushed materials, special technical report, in: Research Institute for Concrete and Reinforced Concrete (GOSSTROY). European Demolition association, Wassenaarseweg 80, 2596 CZ, Den Haag, the Netherlands, Moscow.

- Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., Skoczylas, F., Wirquin, E., 2003. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites* 25, 223–232. doi:10.1016/S0958-9465(02)00010-0
- Zhao, Z., 2014. Valorisation des sables de béton recyclé pour la fabrication des mortiers (Thèse de Doctorat de Génie Civil). Ecole des mines de Douai et l'université Lille 1, Douai et Lille.
- Zhen Hua Duan, Chi Sun Poon, 2014. properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. *Materials & Design* 58, 19–29.