

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA



جامعة باجي مختار – عنابة

Année : 2018

Faculté des sciences de l'ingénierat

Département de Génie Civil

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT Es-Sciences

**CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE PROPRIÉTÉS DES MORTIERS ET BÉTONS
À BASE DE GRANULATS RÉCYCLÉS ET LEURS DURABILITÉS**

Option

Matériaux et Structures

Par

BERREDJEM Layachi

Devant le Jury

Président	BEHIM Mourad	Pr	U. Badji Mokhtar - Annaba
Rapporteur	ARABI Nourredine	Pr	U. Badji Mokhtar- Annaba
Co-Rapporteur	MOLEZ Laurent	MC	INSA de Rennes, France
Examinateur	BENMARCE Abdelaziz	Pr	U. 8 Mai 1945 - Guelma
Examinateur	BENOUIS Abdelhalim	Pr	U. 8 Mai 1945 - Guelma
Examinateur	BELACHIA Mouloud	Pr	U. 20 Aout 1955 - Skikda

Layachi BERREDJEM

Contribution à l'étude de propriétés des mortiers et bétons à base de granulats recyclés et leurs durabilités

Thèse de doctorat présentée à l'Université Badji Mokhtar – Annaba
pour l'obtention du diplôme de Doctorat en sciences
en Structure et Matériaux



Département de génie civil
Faculté des Sciences de l'Ingénierat
Université Badji Mokhtar – Annaba, Algérie

**Laboratoire de recherche : Laboratoire Matériaux Géomatériaux et Environnement,
Université Badji Mokhtar - Annaba – Algérie.**

**Laboratoire d'accueil : Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, INSA de
Rennes – France.**

"Quand on a éliminé l'impossible,
ce qui reste est forcément la vérité,
aussi improbable qu'elle puisse paraître"

Conan Doyle

Dédicaces

À mes chers parents ;

À mes femmes et à mes aimables enfants :

Salah Fddine,

Jasmine,

Abdelmalek.

*À mon frère Slimane à mes Sœurs ainsi qu'à
leurs familles ;*

À Tous, Je Dédie ce Manuscrit.

الملخص

الخرسانة هي واحدة من أكثر المواد استخداماً عالمياً، غير أنها لا تعتبر مادة مضررة بالبيئة بسبب استخدامها للموارد الطبيعية الغير متعددة. واليوم، أصبح استهلاك هذه المادة في تزايد مستمر بسبب النمو الديمغرافي والتنمية الحضرية والذي يتطلب إعادة التأهيل والتشييد للأبنية والهيكلات الأساسية. ومع ذلك، فإن الإنتاج الملموس المرافق للتحضر يؤدي بلا شك إلى مشاكل بيئية تتعلق بالحفاظ على الموارد الطبيعية والحد من الإحتباس الحراري، التلوث واستهلاك الطاقة. تسيير واسترداد الملايين من الأطنان من نفايات البناء وعمليات الهدم، هي أحد المخاوف البيئية الرئيسية في جميع أنحاء العالم. وعلى الرغم من الجهود المبذولة لإعادة رسكلتها، إلا أن المعدل العالمي المتوسط للرسكلة لم يتجاوز 50 %، وأن معظم المواد المرسكلة تستخدم عموماً في أشغال تهيئة الطرقات أو في إشغال الردم.

هذه الأطروحة تهدف إلى تقييم قيمة الركام الحصى المرسكل الناتج من الخرسانة المهدمة والمفككة، لاستعمالها ودمجها سواءً جزئياً أو كلياً في مواد إسمنتية جديدة (ميلاط أو خرسانة). تحديد خصائص هذه المواد الإسمنتية في مختلف المراحل الطازجة والصلبة، يتم اختبار نوعين من الركام المرسكل، الرمل (رم) المتميز بالنسبة العالية للغبار والحصى (ح) الناتج عن هدم البناء وسحق الخرسانة.

يتناول الهدف الأول تأثير الرمل المرسكل على السلوك الريولوجي والميكانيكي وتأثيره على خصائص الميلاط الإسمنت. ويكرس هذا الجزء لدراسة سلوك الميلاط على المدى الطويل مع الأخذ بعين الاعتبار عوامل مختلفة، معدل استبدال الرمال الطبيعية بمثيلتها المرسكلة، وتأثير نسبة غبار الرمل المرسكل (> 125 ميكرومتر) وكذا تأثير الملاجنات. النتائج التي تم الحصول عليها ضمن السياق التجريبي تسمح لنا باقتراح توصيات بشأن المعدل الأمثل لدمج الرمل المرسكل مع وبدون غبار وكذا نسبة وكيفية إضافة المياه للرمال المرسكلة في صناعة الميلاط الإسمنت. أما الهدف الثاني فيتناول تقييم جدوى استخدام الركام المعاد تدويره بمختلف أحجامه ومكوناته (سواءً من الرمل أو الحصى) لإنجاز خرسانة عادية وبدون إضافات، فئة C35/45. من خلال النتائج المتحصل عليها، يمكن تقييم مدى توافق هذه المواد المرسكلة مع مختلف الحالات للخرسانة الطازجة والصلبة وديمومنتها. الجزء الثالث يقترح توصيات لحد من مشكلة مثانة المواد الإسمنتية التي تحتوي على الركام المرسكل، وخاصة الرمل بكل أجزائه.

كلمات البحث: البيئة، الحصى المرسكل، الريولوجي، الخصائص الميكانيكية، الديمومة.

Résumé

Le béton est l'un des matériaux le plus utilisé au monde, cependant le béton conventionnel n'est pas considéré comme un matériau non écologique vis à vis de l'environnement en raison de l'utilisation de ressources naturelles non renouvelables. Aujourd'hui, la consommation de béton devient de plus en plus importante en raison d'une urbanisation accrue nécessitant la réhabilitation et la construction de bâtiments et d'infrastructures. Néanmoins, la production de béton qui doit accompagner le développement urbain entraîne des problèmes environnementaux relatifs à la préservation des ressources naturelles, au réchauffement climatique, à la pollution et à la consommation d'énergie. La gestion et la valorisation de millions de tonnes déchets de construction et de déconstruction (C&DW) est une des principales préoccupations environnementales majeures dans le monde. Malgré des efforts de recyclage, dont le taux moyen n'a pas dépassé les 50%, la plupart des matériaux recyclés sont généralement utilisés pour les travaux routiers ou de remblai.

Ce travail de thèse a pour mission d'apprécier la valorisation des granulats recyclés issus des bétons de structure déconstruits, en les intégrant partialement ou entièrement dans de nouveaux matériaux cimentaires (mortiers et bétons). Quantifier les propriétés de ces matériaux cimentaires aux différents états frais et durci, deux sortes de granulats recyclés sont testées, sables (RS) caractérisés par fortes teneurs en fillers et graviers (GR) qui sont pour la plus grande part issus de la phase de concassage du béton de structure démolie.

Le premier objectif traite de l'influence du sable recyclé sur le comportement rhéologique et mécanique et de son incidence sur les propriétés de durabilité de mortiers. Cette partie est axée sur une étude de comportements à cours et à long termes de mortiers de maçonnerie en prenant en compte différents facteurs, taux de substitution du sable naturel (NS) par celui recyclé (RS), effets des fillers ($<125 \mu\text{m}$) du RS ainsi celui du superplastifiant. Les résultats obtenus dans la limite du contexte expérimental nous permettent de suggérer des recommandations sur le taux optimum d'incorporation du RS avec et sans fillers et l'état hydrique des sables recyclés dans la formulation des mortiers. Le second objectif traite de l'évaluation de la faisabilité d'utiliser les granulats recyclés avec différentes combinaisons granulaires (RS et GR) et différentes compositions de bétons ordinaires sans adjuvants, de classe C35/45. A partir des résultats obtenus, il est possible d'apprécier dans quelle mesure ces recyclés sont compatibles aux états frais et durci. La troisième partie propose des recommandations pour cerner le problème de durabilité des matériaux cimentaires à base de granulats recyclés, principalement celui du RS avec fillers.

Mots-clés : Environnement, granulats recyclés, rhéologie, propriétés mécaniques, durabilité.

Abstract

Concrete is one of the most used materials in the world, however conventional concrete is not considered an environmentally friendly material because of the use of non-renewable natural resources. Today, concrete consumption is becoming increasingly important because of increased urbanization requiring the rehabilitation and construction of buildings and infrastructure. Nevertheless, the concrete production that must accompany urban development leads to environmental problems related to the preservation of natural resources, global warming, pollution and energy consumption. The management and recovery of millions of tons of construction and deconstruction waste (C&DW) is one of the major environmental concerns worldwide. Despite recycling efforts, the average rate of which has not exceeded 50%, most recycled materials are generally used for road works or embankments.

This thesis aims to assess the value of recycled aggregates from deconstructed concrete structure, integrating them partially or entirely in new cementitious materials (mortars and concretes). Quantify the properties of these cementitious materials with different fresh and hardened states, two kinds of recycled aggregates are tested, sands (RS) characterized by their most important content of fillers and gravel (GR) which are for the most part end of phase crushing of the demolished concrete structure.

The first objective deals with the influence of recycled sand on the rheological and mechanical behavior and its impact on the mortar durability properties. This part is dedicated to the current and long-term behavioral study of masonry mortars by taking into account various factors, substitution of natural sand rate (NS) by the recycled (RS), the effects of filler (<125 µm) of the RS and that of the superplasticizer. The results obtained within the experimental context allow us to suggest recommendations on the optimum rate of incorporation of RS with and without fillers and the water status of recycled sands in the formulation of mortars. The second objective deals with the evaluation of the feasibility of using recycled aggregates with different granular combinations (RS and GR) and different compositions of ordinary concrete without admixtures, class C35/45. From the results obtained, it is possible to assess the extent to which these recycled products are compatible, in fresh and hardened conditions. The third part offers recommendations to limit the materials durability problem cement with recycled aggregates, primarily that of the RS with fillers.

Keywords: Environment, recycled aggregates, rheology, mechanical behavior, durability.

Remerciements

Je tiens d'abord exprimer ma profonde reconnaissance à mon directeur de thèse le professeur **Nourredine ARABI** pour son soutien constant, son savoir, sa gentillesse, sa grande disponibilité et ses précieux conseils et pour les corrections minutieuses de ce manuscrit. Je ne saurais en quelques mots exprimer toute la reconnaissance que je vous porte.

Mes vifs remerciements et mes sincères reconnaissances s'adressent envers **Raoul Jauberthie** qui a suivi le lancement de la thèse et **Laurent Molez** qui a repris le flambeau, de m'accorder sa confiance et qui m'a fait l'honneur d'accepter d'être mon Co-encadreur et me faire profiter de ses connaissances. Je le remercie pour son encadrement, ses conseils avisés, son soutien et son aide dans l'interprétation des résultats. Je remercie également **Christophe LANOS**, pour m'avoir bien accueilli pendant mon séjour au sein de son laboratoire.

Aujourd'hui, je remercie bien évidemment tous les membres de mon jury, Merci **Mourad BEHIM**, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance. J'exprime ma reconnaissance à Messieurs **Abdelaziz BENMARCE**, **Abdelhalim BENOUIS** et **Mouloud BELACHIA**, qui ont accepté de faire partie de mon jury et d'évaluer mon travail, je vous remercie pour avoir jusqu'au bout décortiqué en détails mes analyses, mes suppositions et mes conclusions.

J'adresse mes remerciements à l'ensemble du personnel de département de Génie civil de L'INSA de Rennes, ainsi du LGCGM pour leur aide et leur enthousiasme. Je pense particulièrement à **Jean Yves Brossault**, **Jean Luc Métayer**, **Raphaël Léon**, **Christian Garand** et **Amandine Rojo** pour leur aide et leur soutien et qui participent activement à l'amélioration des essais du laboratoire, qu'ils trouvent ici l'expression de ma respectueuse gratitude.

Lors de mes passages au LGCGM, j'ai pu bénéficier du soutien d'amis, thésard et étudiants en Master : **Ilham, Yasmine, Brahim ben Ahmed, Edem Baite, Sambath, Nelson, Guillaume** et **Nguyen Van**, Merci à eux. Un grand merci à mes compatriotes **Mustapha, Mohamed, Mahdi, Fakhreddine** et **Sohaib** sans oublier l'iranien **Dawood** pour l'ambiance et tous les moments agréables que nous avons partagés durant notre séjour à Rennes. Merci à mes amis : **Abdelhak, Djamel, Hocine, Redha** et **Said**, pour leurs soutenu tout au long de ce travail. Je remercie aussi tous ceux que j'oublie.

Je tiens finalement à remercier très tendrement ma famille, mes parents, mes femmes, mes chers enfants, mon frère et mes sœurs, pour leur soutien assidu et leur encouragement pendant ces années de thèse... C'est en partie grâce à vous que j'y suis arrivé. Merci !

Sayachi Benedjem

Table des matières

الملخص.....	I
Résumé.....	II
Abstract.....	III
Remerciements	IV
Table des matières	V
Liste des formules	IX
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XIII
Liste des abréviations et symboles.....	XIV
Introduction Générale	1
1 Recyclage des granulats issus des matériaux de démolition	6
1.1 Contexte général de déchets de chantier	6
1.1.1 Introduction.....	6
1.1.2 Déchets de démolition et de déconstruction	6
1.1.3 Recyclage des granulats recyclés de béton.....	7
1.2 Caractéristiques et propriétés de granulats recyclés de béton	9
1.2.1 Principaux paramètres influant les caractéristiques des RCA.....	9
1.2.2 Caractéristiques chimiques et minéralogiques.....	10
1.2.3 Propriétés physiques et mécaniques des granulats	11
2 Influence des granulats recyclés sur les propriétés des matériaux cimentaires	15
2.1 Propriétés à l'état frais.....	15
2.2 Influence des granulats sur la maniabilité.....	15
2.2.1 Influence du gravier recyclé.....	15
2.2.2 Influence du sable recyclé	16
2.3 Propriétés de bétons de granulats recyclés.....	18
2.3.1 Propriétés du béton à l'état frais	18
2.4 Propriétés du béton à l'état durci.....	19
2.5 Propriétés Mécaniques des bétons recyclés	22
2.5.1 Résistance à la Compression	23
2.5.2 Résistance à la traction par flexion	28
2.5.3 Résistance à la traction par fendage.....	28
2.5.4 Module d'élasticité	30
2.6 Durabilité	31
2.6.1 Absorption d'eau.....	31
2.6.2 Propriétés de transfert (Perméabilité et Porosité)	33
2.6.3 Retrait libre total et endogène	35
2.6.4 Diffusion de chlorures	37

Table des matières

2.6.5	Résistance aux gel-dégel.....	38
2.6.6	Attaque au sulfate.....	39
2.7	Conclusions	40
3	Caractérisation expérimentale des matériaux employés.....	44
3.1	Introduction.....	44
3.2	Matériaux utilisés.....	44
3.2.1	Ciment	44
3.2.2	Granulats	44
3.3	Caractérisation des matériaux utilisés	45
3.3.1	Analyse chimique et minéralogique.....	45
3.3.2	Caractéristiques physiques et mécaniques	49
4	Préparation, formulations des matériaux cimentaires.....	50
4.1	Formulations des mortiers de maçonnerie.....	50
4.1.1	Pré-humidification des sables recyclés.....	50
4.1.2	Protocole de malaxage.....	51
4.1.3	Échantillonnage.....	52
4.2	Formulations des bétons ordinaire.....	52
4.2.1	Protocole de malaxage.....	53
4.2.2	Protocole d'échantillonnage	53
4.3	Caractérisation des composites à l'état frais.....	53
4.3.1	Détermination du volume d'air occlus.....	53
4.3.2	Evaluation des masses volumiques apparentes	54
4.3.3	Essais de Maniabilité.....	54
4.3.4	Mesure de la plasticité des mortiers.....	55
4.3.5	Résistance au cisaillement des mortiers	55
4.3.6	Mesure du temps de prise des mortiers	56
5	Dispositifs et essais de caractérisation mécanique et de durabilité	57
5.1	Essais mécaniques.....	57
5.1.1	Introduction.....	57
5.1.2	Mesure des propriétés mécaniques	57
5.1.3	Mesure du module élastique	58
5.1.4	Mesure du module d'élasticité dynamique.....	59
5.2	Essais relatifs à la durabilité.....	60
5.2.1	Introduction.....	60
5.2.2	Absorption d'eau par capillarité	61
5.2.3	Mesures de la porosité communicante et densité apparente	62
5.2.4	Mesures de la perméabilité au gaz	63
5.2.5	Mesure du retrait total libre et endogène.....	66
5.2.6	Cycles gel-dégel	68
5.2.7	Lixiviation.....	69
5.2.8	Cycles thermiques 20°C/80°C.....	71

5.2.9	Diffusion des ions chlorures	72
6	Caractérisation des matériaux et propriétés des mortiers à l'état frais	76
6.1	Introduction.....	76
6.2	Caractérisation des constituants de base	76
6.2.1	L'eau.....	76
6.2.2	Ciment	76
6.2.3	Adjuvant	77
6.2.4	Sables	77
6.3	Préparation et formulation des Mortiers	81
6.4	Caractérisation et propriétés des mortiers à l'état frais.....	83
6.4.1	Introduction.....	83
6.4.2	Volume d'air occlus	83
6.4.3	Masse volumique apparente	84
6.4.4	Maniabilité.....	85
6.4.5	Plasticité des mortiers.....	86
6.4.6	Résistance au cisaillement des mortiers	87
6.4.7	Temps de prise des mortiers	87
7	Caractérisation des mortiers à l'état durci.....	89
7.1	Caractéristiques mécaniques.....	89
7.1.1	Résistance à la Flexion.....	89
7.1.2	Résistance à la compression	90
7.1.3	Résistance à la traction par fendage.....	91
7.1.4	Evolution du module d'élasticité	92
7.1.5	Evolution Module d'élasticité dynamique	92
7.1.6	Analyse des résultats de résistances mécaniques	93
7.2	Propriétés relatives à la durabilité.....	95
7.2.1	Absorption d'eau par capillarité	95
7.2.2	Porosité communicante et Densité apparente	96
7.2.3	Perméabilité au gaz	96
7.2.4	Retrait libre total et endogène	98
7.2.5	Etude des effets des cycles gel-dégel.....	101
7.2.6	Etude des effets des cycles séchage-imbibition	103
7.2.7	Diffusion des ions chlorures	105
7.2.8	Lixiviation aux acides sulfuriques (0,5M/L)	106
7.3	Conclusion	107
8	Caractérisation et propriétés physiques des bétons à l'état fraî	110
8.1	Introduction.....	110
8.2	Constituants de base.....	111
8.2.1	L'eau.....	111
8.2.2	Ciment	111
8.2.3	Granulats	111

Table des matières

8.2.4	Caractérisation des granulats	112
8.3	Préparation et formulation des Bétons	114
8.4	Propriétés physiques des bétons à l'état frais.....	116
8.4.1	Introduction.....	116
8.4.2	Volume d'air occlus	116
8.4.3	Masse volumique apparente	116
9	Etude du comportement des bétons à l'état durci	119
9.1	Comportement mécanique des bétons	119
9.1.1	Introduction.....	119
9.1.2	Résistance à la flexion quatre points	119
9.1.3	Résistance en compression uni-axiale	120
9.1.4	Evaluation du module d'élasticité	121
9.1.5	Analyse des résultats de comportements mécaniques	122
9.2	Etude des indicateurs relatifs à la durabilité	123
9.2.1	Introduction.....	123
9.2.2	Mesure de l'absorption d'eau par capillarité.....	123
9.2.3	Mesures de la porosité accessible à l'eau et la densité apparente	124
9.2.4	Essai de perméabilité au gaz d'Hélium	125
9.2.5	Etude des effets des cycles séchage-imbibition	128
9.2.6	Essai de lixiviation au acide sulfurique.....	130
9.2.7	Diffusion des ions chlorures	131
9.3	Conclusions	132
	Conclusions générales.....	135
	Références bibliographiques	140
	Annexes	150
	Annexe 1-1:.....	151
	Fiche d'identification du ciment Portland artificiel CEM I 52,5 N.....	151
	Annexe 1-2 :.....	152
	Fiche technique du ciment Portland artificiel CEM I 52,5 N	152
	Annexe 2 :	153
	Photos des échantillons de mortiers après l'essai de diffusion de chlorures.....	155
	Annexe 3 :	156
	Photos microscopiques des différentes zones d'échantillons de béton.....	156

Liste des formules

[Eq. 3.1] Calcul des pics de diffraction.....	46
[Eq. 4.1] Calcul du débit massique (Q).....	55
[Eq. 4.2] Calcul de la résistance au cisaillement.....	55
[Eq. 5.1] Calcul du module d'élasticité (Young)	59
[Eq. 5.2] Calcul du coefficient de Poisson	60
[Eq. 5.3] Calcul du module dynamique	60
[Eq. 5.4] Calcul du coefficient d'absorption capillaire.....	61
[Eq. 5.5] Calcul de la porosité totale.....	62
[Eq. 5.6] Calcul de la variation de masse	62
[Eq. 5.7] Calcul de la masse volumique apparente	62
[Eq. 5.8] Calcul de la porosité communicante accessible à l'eau	62
[Eq. 5.9] Calcul de la perméabilité apparente au gaz	64
[Eq. 5.10] Calcul de la perméabilité intrinsèque	65
[Eq. 5.11] Interaction de l'acide sulfurique avec le Portlandite.....	69
[Eq. 5.12] Réaction de l'aluminate de calcium hydraté avec du gypse secondaire	69
[Eq. 5.13] Calcul des pertes de masses	71
[Eq. 5.14] Calcul du coefficient de diffusion apparent des ions chlorures	73
[Eq. 6.1] Décomposition de la Portlandite à (450 - 540°C)	79
[Eq. 6.2] Décomposition des calcaires à (700 – 900°C).....	79
[Eq. 6.3] Dissolutions du Portlandite dans l'acide chlorhydrique	80
[Eq. 6.4] Dissolutions de la calcite dans l'acide chlorhydrique.....	80

Liste des figures

Figure 1.1	Composition du granulat recyclé de béton (RCA)	7
Figure 1.2	Analyse DRX de trois types de sables recyclés d'usines	11
Figure 1.3	Relation entre l'absorption d'eau et la dimension maximale des granulats recyclés.	12
Figure 1.4	Cinétique d'absorption d'eau de RS	13
Figure 1.5	Relation entre l'absorption d'eau et la densité de particules sèches	13
Figure 1.6	Répartition granulométrique des granulats recyclés (fins et grossiers)	14
Figure 2.1	Densité, porosité et absorption de mortiers recyclés	16
Figure 2.2	Evolution dans le temps de l'affaissement des mortiers incorporant du SR	17
Figure 2.3	Relation entre l'affaissement et le taux de remplacement en masse en gravillons recyclés	18
Figure 2.4	Pourcentage de l'air occlus par rapport au taux de remplacement du RS dans le mortier de maçonnerie	19
Figure 2.5	Influence des performances mécaniques du béton d'origine sur la résistance à la compression de béton incorporant des gravillons recyclés	20
Figure 2.6	Evolution des résistances en compression dans le temps des bétons à base de graviers recyclés	21
Figure 2.7	Différentes types de zones de transition interfaciale	22
Figure 2.8	Relation entre (f_c RC) et (f_c CC) des différents mélanges	25
Figure 2.9	Observations de l'ITZ des mortiers à base de sable recyclé	26
Figure 2.10	Résistance de mortier incorporant différentes coupures de sable recyclé	27
Figure 2.11	Relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression.....	28
Figure 2.12	Relation entre la résistance à la compression des bétons recyclés en fonction de celle des bétons conventionnels	29
Figure 2.13	Variation des modules élastiques des bétons recyclés en fonction du taux de substitution en RG.....	30
Figure 2.14	Evolution du module élastique statique en fonction du taux de substitution en recyclés et le rapport E/C.	31
Figure 2.15	Absorption d'eau par capillarité	33
Figure 2.16	Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton.	34
Figure 2.17	Retrait des RAC par rapport béton de référence.....	37
Figure 3.1	Photographie de l'analyseur XTF Thermo Scientific Niton XL3t.....	46
Figure 3.2	Illustration de la Loi de Bragg	46
Figure 3.3	Photographie de la diffractométrie de rayons X.....	47
Figure 3.4	Photographie de l'analyseur thermogravimétrique utilisé	48
Figure 3.5	Photographie du MEB utilisé.....	48
Figure 4.1	Photos des états de sables utilisé.....	51
Figure 4.2	Malaxeur à vitesse variable pour la confection des mortiers	51
Figure 4.3	Photos d'états des mortiers réalisés	52

Figure 4.4	Affaissement au mini cône (MBE) d'Abra... ms.....	54
Figure 4.5	Photographie de mesure de la plasticité du mortier (plasticmèt... re).....	55
Figure 4.6	Scissomètre de laboratoire (VJT5300). 56	56
Figure 4.7	Appareil de Vicat automatique (Vicatronic) muni de l'aiguille avec une surcharge	56
Figure 5.1	Photographies des presses hydrauliques utilisées	57
Figure 5.2	Photographie des différents essais destructifs effectués sur les mortiers	58
Figure 5.3	Photographie de l'essai de détermination du module d'Young des mortiers.....	59
Figure 5.4	Photo de mesure du temps d'une onde dans une éprouvette de mortier.....	60
Figure 5.5	Photo des dispositifs de mesures de la porosité communicante et densité apparente.....	63
Figure 5.6	Représentation schématique d'un matériau poreux	63
Figure 5.7	Détermination de KV pour un mortier normalisé par la méthode de Klinkenberg	65
Figure 5.8	Schéma représentatif du dispositif expérimental pour les mesures de perméabilité au gaz	66
Figure 5.9	Photographie des éprouvettes entreposées dans différents environnement	67
Figure 5.10	Photographies des essais de mesure du retrait total et endogène libre	68
Figure 5.11	Bacs d'immersion des échantillons dans la solution d'acide sulfurique	71
Figure 5.12	Préparation des éprouvettes pour l'essai de diffusion des chlorures.....	73
Figure 6.1	Analyse des sables utilisés par DRX.....	78
Figure 6.2	Analyse thermogravimétrique du sable recyclé et sable calcaire.....	79
Figure 6.3	Courbes granulométriques des sables utilisés (Par tamisage et par Laser).....	81
Figure 6.4	Masses volumiques à l'état frais des différents mortiers à base de RSB.	84
Figure 6.5	Masses volumiques à l'état frais des différents mortiers à base de RSB-F.	84
Figure 6.6	Affaissement des mortiers sans superplastifiant.....	85
Figure 6.7	Affaissement des mortiers avec du superplastifiant.....	86
Figure 6.8	Débit d'écoulement des mortiers recyclés sans superplastifiant.	86
Figure 6.9	Résistance au cisaillement des mortiers formulés.....	87
Figure 6.10	Temps de prise des mortiers à base de RSB.....	88
Figure 7.1	Résistance à la flexion des différents mortiers sans adjuvant	89
Figure 7.2	Résistance à la flexion des différents des mortiers adjuvants	90
Figure 7.3	Résistance en compression simple des mortiers sans superplastifiant	90
Figure 7.4	Résistance en compression simple des mortiers avec superplastifiant.....	91
Figure 7.5	Résistance à la traction par fendage des mortiers avec superplastifiant.....	91
Figure 7.6	Résistance à la traction par fendage des mortiers sans superplastifiant.	92
Figure 7.7	Evolution du module de Young de différents mortiers confectionnés	92
Figure 7.8	Modules d'élasticité dynamique de différents mortiers à base de RSB	93
Figure 7.9	Evolution d'absorption d'eau des différents mortiers en fonction du temps	95
Figure 7.10	Densité apparente et porosité accessible à l'eau des différents mortiers	96
Figure 7.11	Perméabilité apparente au gaz des mortiers recyclés âgés de 56 jours	97
Figure 7.12	Perméabilité intrinsèque des différents mortiers après 56 jours de maturation.....	98
Figure 7.13	Evolution du retrait endogène des différents mortiers.....	99

Liste des figures

Figure 7.14 Evolution du retrait libre des différents mortiers.....	99
Figure 7.15 Evolution du retrait libre des différents mortiers dans la salle labo	100
Figure 7.16 Evolution du retrait libre des différents mortiers dans la salle humide.....	100
Figure 7.17 Comparaison des retraits des différents mortiers dans quatre environnements (après 28 jours d'exposition).....	101
Figure 7.18 Résistance à la flexion des mortiers avant et après effets au gel-dégel.....	102
Figure 7.19 Résistance en compression des mortiers avant et après effets au gel-dégel	102
Figure 7.20 Evolution du module d'élasticité dynamique (Ed) en fonction du nombre de cycles gel-dégel.....	103
Figure 7.21 Evolution de la perte de masses des mortiers en fonction du nombre de cycles séchage-mouillage.	103
Figure 7.22 Evaluation des résistances en compression des mortiers recyclés sous l'effet des cycles thermiques	104
Figure 7.23 Comparaison des résistances en compression des mortiers saints et lixiviés.....	106
Figure 7.24 Evolution de la perte de masse en fonction du temps d'immersion	106
Figure 7.25 Photographie des états des éprouvettes avant et après attaques acide	107
Figure 8.1 Courbes granulométriques des granulats utilisés	114
Figure 8.2 Evaluation des masses volumiques à l'état frais des différents bétons.....	117
Figure 9.1 Evolution de la résistance en flexion des bétons en fonction du temps.....	120
Figure 9.2 Evolution de la résistance en compression en fonction du temps.	120
Figure 9.3 Evaluation de la résistance en compression des différents bétons à 28 jours.....	121
Figure 9.4 Relations entre le module d'élasticité et la résistance en compression à 28 jours... <td>122</td>	122
Figure 9.5 Evolution de l'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps	124
Figure 9.6 Densité apparente et porosité communicante des différents bétons âgées de 56 jours	125
Figure 9.7 Photographie d'un échantillon de béton destinée pour la mesure de la perméabilité au gaz	126
Figure 9.8 Perméabilité apparente au gaz des bétons âgés de 56 jours	126
Figure 9.9 Détermination de KV pour les bétons à base GRG par la méthode de Klinkenberg	127
Figure 9.10 Détermination de KV pour les bétons à base RSG par la méthode de Klinkenberg	127
Figure 9.11 Evaluation de la perméabilité intrinsèque des bétons âgés de 56 jours.....	128
Figure 9.12 Evolution de la perte de masses des bétons en fonction du nombre de cycles séchage-mouillage.	129
Figure 9.13 Evaluation de la résistance en compression après 12 cycles séchage-imbibition ...	130
Figure 9.14 Evaluation de la résistance en compression après attaque sulfurique après 28 jours	130
Figure 9.15 Photos d'attaque d'acide sulfurique (0,5 M) sur les bétons après 28 jours.	131

Liste des tableaux

Tableau 3.1	Caractérisation physiques et mécaniques des granulats utilisés.....	49
Tableau 6.1	Composition minéralogique du ciment CEM I 52,5 N utilisé.	77
Tableau 6.2	Composition chimique du ciment CEM I 52,5 N utilisé.....	77
Tableau 6.3	Caractéristiques principales un Superplastifiant utilisé.....	77
Tableau 6.4	Compositions chimiques des sables utilisés.....	78
Tableau 6.5	Dosage de la teneur en carbonate de calcium par calcimétrie.....	79
Tableau 6.6	Dissolution des différentes fractions du RSB dans l'acide chlorhydrique (0,1N)	79
Tableau 6.7	Caractéristiques physiques des sables utilisés	80
Tableau 6.8	Différentes Compositions des mortiers formulés à base de RSB.....	82
Tableau 6.9	Différentes Compositions des mortiers formulés à base de RSB-F.....	82
Tableau 6.10	Le volume d'Air Occlus dans les mortiers.	83
Tableau 7.1	Perméabilité apparente de chaque mortier aux différentes pressions.....	97
Tableau 7.2	Résultats de la profondeur de pénétration des ions chlorures	105
Tableau 8.1	Compositions chimiques des granulats utilisés.....	112
Tableau 8.2	Principales Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats utilisés.....	112
Tableau 8.3	Différentes compositions des bétons ordinaires formulés	115
Tableau 8.4	Volume d'Air occlus dans les différents bétons confectionnés.	116
Tableau 9.1	Module d'élasticité des différents bétons confectionnés.	121
Tableau 9.2	Profondeur de pénétration des ions chlorures et le coefficient de diffusion apparent des bétons.....	132

Liste des symboles et abréviations

SIGLE	DENOMINATION
C&DW :	Déchets de construction et de démolition
RECYBETON	RECYclage complet des BETONs, Projet National Français
ANR ECOREB	Eco-construction par le recyclage du béton, Projet de recherche
RILEM :	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages
LERM :	Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux, France
LCPC :	Laboratoire central des ponts et chaussées
BTP :	Bâtiment et des travaux publics
RMC :	Mortier de ciment résiduel collé au granulat recyclé
NA :	Granulats naturels
RA :	Granulats recyclés
RCA :	Granulats recyclés de béton
BP :	Béton parent origine des RCA
RC :	Béton recyclé
NAC :	Béton de granulats naturels
RAC :	Béton de granulats recyclés
RG :	Granulat recyclé
GRG :	Gravier recyclé
NS :	Sable naturel
NSB :	Sable alluvionnaire
NGB :	Graviers naturel concassés
RS :	Sable recyclé
RSB :	Sable recyclé d'éprouvettes
RSB-F :	Sable recyclé d'éprouvette sans fillers
RSG :	Sable recyclé de structure
RGB :	Gravier recyclé de structure
ITZ :	Zone de Transition Interfaciale
Ec :	Module d'élasticité (Module de Yong)
Ed :	Module dynamique
ϑ :	Coefficient de Poisson
E/C :	Eau/ciment
E_{eff}/C :	Eau efficace/ciment
Rc	Résistance en compression
CaO :	Oxyde de calcium
SiO ₂ :	Silice
Al ₂ O ₃ :	Alumine
Fe ₂ O ₃ :	Oxyde de fer
MnO :	Oxyde de magnésium
TiO ₂ :	Dioxyde de titane
P ₂ O ₅ :	Pentoxyde de phosphore
Na ₂ O :	Oxyde de sodium
K ₂ O :	Oxyde de potassium
SO ₃ :	Trioxyde de soufre
PAF :	Perte au feu

SIGLE	DENOMINATION
ATG :	Analyse thermogravimétrique
MEB :	Microscopie électronique à balayage
CaCO_3 :	Carbonates de calcium
Ca(OH)_2 :	Portlandite
CSH :	Silicates de calcium hydratés
Ca :	Calcium
Mg :	Magnésium
Na :	Sodium
K :	Potassium
Cl^- :	Ions de chlorures
SO_4^{2-} :	sulfates
NO_3^- :	Nitrates
T ($^{\circ}\text{C}$) :	Température (degré Celsius)
H_2SO_4 :	Acide sulfurique
HCl :	Acide chlorhydrique
FM :	Module de finesse des sables
Aff :	Affaissement au cône d'Abrams
SE :	Equivalent de sable
Fil :	Teneur en fillers ($< 125 \mu\text{m}$)
TF :	Teneur en fines ($< 63 \mu\text{m}$)
W :	Teneur en eau
Ab :	Absorption d'eau
LA :	Coefficient Los Angeles
MDE :	Coefficient Micro-Deval
SSS :	Saturé à surface sèche
MBE :	Mortier Béton Equivalent
δ :	Porosité totale
\emptyset_{com} :	Porosité accessible à l'eau
M_{eau} :	Masse saturée dans l'eau
M_{air} :	Masse dans l'air (saturée à surface sèche)
M_{sec} :	Masse sèche
ρ_{eau} :	Masse volumique de l'eau
ρ_{app}	Masse volumique apparente
ρ_d :	Masse volumique apparente à sec
K_a	Perméabilité apparente au gaz
K_v :	Perméabilité intrinsèque au gaz
X_d :	Profondeur de pénétration des ions chlorures
$D_{ns \ (\text{dif})}$:	Coefficient de diffusion apparent des ions chlorures

Impossible de partir de rien ;
pour créer il faut d'abord détruire ce qui est,
puis bâtir avec des débris.

Jean-Yves Soucy

Introduction Générale

En développement durable, l'environnement est l'un des objectifs de sa réussite, par la diminution d'émissions des gaz à effet de serre, la réduction de la consommation énergétique, l'utilisation rationnelle des ressources naturelles et le recyclage des déchets [1]. L'industrie de la construction est connue pour consommer la majeure partie des ressources naturelles et générer de grandes quantités de déchets de construction et de démolition (C&DW) [2]. Nonobstant les avantages, l'impact négatif des activités de construction sur l'environnement a des répercussions graves dans le monde entier [3 et 4]. La valorisation de ces déchets solides dans le circuit de la construction constitue aujourd'hui les nouvelles opportunités d'approvisionnement en ressources granulaires comme une alternative aux granulats naturels qui ont tendance à un épuisement. Avec l'augmentation du coût des projets de construction et les préoccupations environnementales croissantes, l'industrie de la construction est sous une pression immense des organismes gouvernementaux et environnementaux pour réduire au minimum les déchets de construction et d'adopter des pratiques plus durables [4].

En Europe, les activités de la construction génèrent 531 millions de tonnes de C&DW par an, dont la majorité de 85% sont des déchets de béton et de maçonnerie. Le taux de recyclage a dépassé les 85% dans certains pays comme la Hollande et l'Allemagne, cependant le taux moyen européen est seulement de 46%, [5 et 6]. Un objectif a été ciblé d'ici 2020 par l'Union Européen, pour la valorisation de 70% en poids des C&DW [7]. En France, sur un total d'environ 300 millions de tonnes de déchets de chantier produits annuellement, seule une partie du béton incluse dans ces déchets est recyclée [8]. Cependant, le projet national RECYBETON et le projet ANR ECOREB s'intéressent à lever les verrous technologiques concernant ce type de granulat afin de mieux maîtriser leur utilisation comme constituants des nouveaux bétons et de les introduire encore d'avantage dans le contexte normatif [7 - 10].

De nos jours, le recyclage des C&DW a dépassé le stade d'expérimentation à travers le monde et connaît un développement assez important. Les granulats recyclés (RA) sont déjà utilisés dans les différentes applications de travaux de génie civil et leur faisabilité en travaux routiers a été prouvée par des projets expérimentaux et même dans les ouvrages d'arts. Au cours des dernières années, les propriétés des RA du C&DW en général, en particulier celles du béton (RCA) et les propriétés mécaniques et de durabilité de leur incorporation partielle ou totale dans la composition du béton structurel ont attiré l'attention de divers chercheurs universitaires et professionnels [2 ; 3 et 11].

L'expérience mondiale dans le domaine de recyclage des C&DW, peut être élargie à un pays en développement comme l'Algérie. Où l'interdiction d'extraction des matériaux alluvionnaires, la saturation des décharges publiques, particulièrement dans les grandes villes du pays comme Alger (la capitale), suite à des sinistres naturels comme les crues en 2001 et le séisme en 2003, et les difficultés de mise en place de nouvelles exploitations de carrières imposent de rechercher de

nouvelles sources d'approvisionnement en granulats pour béton afin de répondre aux besoins des grands chantiers mis en œuvre. Ce pays dispose d'un gisement significatif de matériaux de déconstruction, de nombreux bâtiments publics, des installations industrielles en dégradations et arrivent en fin de vie et devraient générer de conséquentes quantités de C&DW, principalement du béton, dans les années à venir. Malheureusement, les travaux de recherche sur la valorisation de ces déchets dans le bâtiment ou dans les travaux publics sont rares [8, 12 et 13].

Les travaux de recherches ont été effectués au laboratoire de matériaux géomatériaux et environnement (LMGE) à l'Université Badji Mokhtar – Annaba (Algérie) et en collaboration avec le laboratoire de génie civil et génie mécanique (LGCGM) à l'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes (France). Ces travaux ont pu être réalisés en France grâce à la bourse Algérienne PNE15-16 du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique (MESRS).

Objectifs principaux

Notre travail de recherche s'inscrit dans le contexte du développement durable et les résultats présentés dans ce mémoire de thèse de doctorat ont pour but une meilleure compréhension du comportement à court et à long termes des matériaux cimentaires à base de granulats recyclés. Il est aussi envisagé d'évaluer l'effet des différents paramètres recensés influençant ces comportements. Notamment, nous voulons étudier les conséquences de fillers ($<125\text{ }\mu\text{m}$) du sable recyclé sur les propriétés des mortiers de maçonnerie avec et sans superplastifiant, en prenant en compte le taux de substitution du sable naturel par celui recyclé. Nous étudierons les effets des granulats recyclés avec différentes combinaisons granulaires (sables et gravier) sur les propriétés rhéologiques, physiques et mécaniques de différentes compositions de bétons ordinaires sans adjuvants (classe C35/45). Nous nous pencherons plus particulièrement sur l'évaluation de la faisabilité d'utiliser ces recyclés sur la durabilité de ces composites en environnement agressif.

Démarche de l'étude

Dans un premier temps, nous effectuerons une étude bibliographique afin de référencer et d'analyser les potentialités de valorisation des déchets de construction et de démolition comme nouvelle source de matériaux pour le secteur de la construction et la réglementation concernant le recyclage de C&DW dans les matériaux cimentaires. Ensuite, une importante étude expérimentale sera décrite. Cette étude a pour but d'étudier le comportement des matériaux cimentaires (mortiers et bétons), à base de granulats recyclés (sable et gravier), à l'état frais et durci. Elle nécessitera la caractérisation préliminaire des propriétés chimiques, physiques et mécaniques des matériaux utilisés. Nous utiliserons pour cela des techniques élémentaires classiques (Affaissement, compression, fendage, retrait...) et des méthodes innovantes (analyses microstructurales).

Contenu de la thèse

Le manuscrit comporte quatre parties réparties en neuf chapitres.

Première partie : nous présentons une synthèse bibliographique qui dresse tout d'abord l'état actuel du contexte de l'industrie du béton et à la nécessité de recyclage de déchets de constructions

et de démolition, particulièrement ceux du béton. Nous mettant l'accent sur les différentes caractéristiques et propriétés chimiques, physiques et mécaniques des granulats recyclés de béton, (chapitre 1). Une vue globale est donnée, résumant les études relatives à l'incorporation des granulats recyclés dans de nouveaux matériaux cimentaires, tout en mettant en évidence les problèmes sous-jacents. En distinguant l'incorporation des gravillons recyclés de celle des sables recyclés, sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci (chapitre 2).

Deuxième partie : dans cette partie nous abordons le choix et les démarches de la caractérisation expérimentale des matériaux employés (chapitre 3), la méthodologie de la formulation des matériaux cimentaires (mortier et béton) et leur étude rhéologique (chapitre 4). Les essais et dispositifs de caractérisation de ces composites à l'état durci y compris leur durabilité (chapitre 5).

Troisième partie : cette partie est consacrée à l'étude des mortiers de maçonnerie, nous définissons les matériaux utilisés, en déterminant leurs principales propriétés chimiques, minéralogiques et physiques. Par la suite, nous effectuons différents essais expérimentaux sur les mortiers à l'état frais (chapitre 6). Enfin, nous effectuons les essais de caractérisation du mortier durci, notamment ces propriétés physiques relatives à la durabilité (chapitre 7).

Quatrième partie : dans cette dernière partie, nous initions les caractéristiques des granulats recyclés employés dans la formulation et la composition du béton ordinaire recyclé sans adjuvant, suivi par l'étude des propriétés rhéologiques (chapitre 8). L'analyse et la discussion des résultats de l'influence des granulats recyclés, avec différents pourcentages, sur le comportement mécanique et de la durabilité du béton recyclé sont présentées dans le chapitre 9.

A partir des résultats obtenus, une synthèse partielle des résultats expérimentaux pourra être trouvée à la fin de chaque partie. Une synthèse générale englobe les résultats les plus saillants se trouve dans la conclusion générale ainsi que des perspectives de recherche envisagées et à la fin de ce mémoire de thèse une liste de références bibliographiques est dressée.

**"Les musées préservent notre passé ;
le recyclage préserve notre avenir".**

Theodor Wiesengrund-Adorno

Première Partie

Généralités et synthèse bibliographique

Chapitre 1

Recyclage des granulats issus des matériaux de démolition

1.1 Contexte général de déchets de chantier

1.1.1 Introduction

L'environnement, la protection de la nature, le développement durable jouent un rôle essentiel dans la satisfaction des exigences modernes pour les travaux de construction. Avec l'augmentation constante de la population mondiale une urbanisation accrue se développe et par surcroît les déchets en général augmentent. Le secteur de bâtiment, lié au développement économique et industriel, génère une grande diversité et de quantités importantes de déchets de chantiers qui constituent une part importante des coûts de production des déchets solides dans le monde [14]. Les déchets de construction et de démolition (C&DW) représentent 90 % de ces déchets de chantiers, 65 % de ces déchets proviennent de la démolition, 28 % de la réhabilitation des ouvrages et seulement 7 % de la construction neuve [14]. Une petite partie de ces déchets qu'on y trouve est recyclée, et environ 90 % d'entre eux sont aujourd'hui encore trop souvent déposés en installation de stockage ou même sont éliminés en décharges sauvages. Face aux quantités toujours croissantes des déchets, les capacités des décharges s'épuisent de plus en plus, surtout aux alentours des grandes agglomérations. Réduire le volume des C&DW en les réutilisant est un enjeu majeur.

1.1.2 Déchets de démolition et de déconstruction

Les C&DW sont une sous-catégorie des déchets du bâtiment qui regroupent tous les matériaux de déconstruction ou de réhabilitation. Comme le béton est le deuxième matériau le plus consommé dans le monde après l'eau, il constitue presque 75 % en poids de tous les matériaux de construction, il s'en suit donc que les fortes proportions des rebuts de démolition soient du béton [5]. L'épuisement de sources naturelles disponibles des granulats, les lois plus strictes relatives à la protection de l'environnement et les problèmes posés par la destruction des déchets sont tous des facteurs qui favorisent la valorisation de ces déchets.

Le recyclage des granulats issus des matériaux de démolition, déjà bien engagé dans le secteur des travaux publics mais moins dans les travaux de génie civil, semble être une solution idéale, la plus prometteuse pour les problèmes de déchets. Il a connu une grande évolution dans les pays développés, répond aux soucis de manque de granulats naturels pour les besoins de fonctionnement des chantiers et de promouvoir le respect de l'environnement par l'élimination des décharges sauvages de gravats. Leur recyclage dans le circuit de la construction constitue aujourd'hui les nouvelles opportunités d'approvisionnement en ressources granulaires comme une

alternative aux granulats naturels et leur incorporation peut être envisagée dans la formulation des matériaux cimentaires.

Au cours des dernières années, le recyclage des C&DW est désormais en marche, cependant avec un taux de recyclage variable d'un pays à l'autre. Par exemple, le maximum est atteint en Suisse avec 95% de béton recyclé, l'Allemagne suit avec 80% et en France le taux de recyclage est de 62% [15].

1.1.3 Recyclage des granulats recyclés de béton

Les granulats recyclés (RA) sont définis comme des granulats obtenus à partir du traitement d'un matériau inorganique qui a été précédemment utilisés dans la construction. La matière première est la matière de déchets générés pendant le processus de construction et de démolition. Un autre facteur peut influencer significativement la qualité des granulats recyclés provenant de sites de démolition, il s'agit de la présence des impuretés et des contaminants, soit de déchets de chantier de nature non cimentaire. On peut trouver parmi les granulats recyclés du verre, du bois, du plastique, du bitume, du gypse, des matières organiques ou des contaminations sous forme de chlorures ou de sulfates [16]. La présence de ces contaminants peut induire une diminution de résistance en compression pouvant aller jusqu'à 15% de perte par rapport à un béton sans contaminant [17]. La composition des granulats recyclés, obtenus à partir de la littérature mesurée selon la Norme NF EN 933-11 : 2012 «Test de classement des agrégats recyclés en fonction de leur composition», dépend du type de déchets d'origine, le processus de production de l'usine de recyclage et de la fraction de taille obtenue par le procédé de broyage, et peut varier en fonction de ces trois facteurs.

En ce qui concerne le cas particulier de granulats de béton recyclé (RCA), ceci est obtenu à partir du procédé de recyclage de déchets de béton. Par conséquent, les RCA sont principalement constitués de granulats naturels, du mortier et de la pâte de ciment résiduel collé au granulat (RMC), figure 1.1.

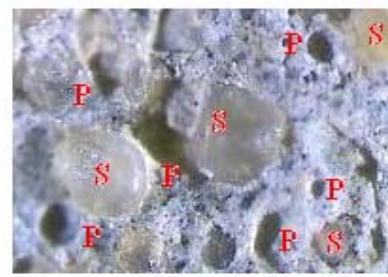
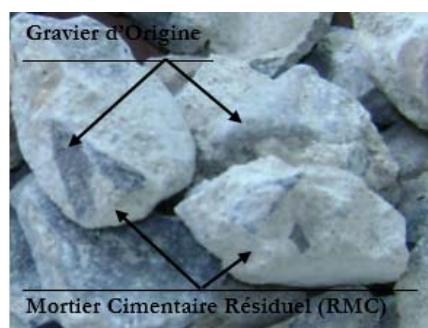


Figure 1.1 Composition du granulat recyclé de béton (RCA)

Les granulats recyclés provenant des déchets de béton sont les granulats les plus appropriés pour produire un béton recyclé structural en raison de ses caractéristiques favorables. Dans ce cas, généralement la présence d'impuretés est faible, où le RMC est le paramètre clé qui contrôle la qualité du RAC, qui est également lié aux caractéristiques du béton source « béton parent » (BP) de

I.1 Recyclage des granulats issus des matériaux de démolition

ces granulats. Deuxièmement, le processus de recyclage est également important car il influe sur la quantité de mortier attaché, qui diminue à mesure que les étapes du processus de concassage augmentent [18].

La réutilisation des RCA, comme substitution aux granulats naturels (NA), a été largement étudiée, ce qui a réduit l'incertitude liée à ses performances [14]. Bien que le potentiel de l'utilisation de RCA dans le béton a été démontré avec succès dans les études de laboratoire, l'utilisation de RCA dans l'application pratique est généralement limitée au béton non structurelle, et le taux de remplacement des NA par les RCA est recommandé de ne pas dépasser les 30% [3 et 6].

La plupart des recherches effectuées, à travers le monde, sont orientées beaucoup plus sur l'utilisation du gravier recyclé du béton (GR) dans la formulation des nouveaux bétons structurels, elles ont largement étudié l'impact de ces graviers recyclés, avec différents pourcentages de substitution, sur les performances mécaniques du béton recyclé et leur mise en œuvre [9].

En Europe, le dispositif normatif est le même pour les granulats naturels et recyclés, bien que certaines caractéristiques spécifiques à ces derniers induisent une réflexion autour de son applicabilité. Selon la norme NF EN 206-1/CN : 2014, l'utilisation des granulats recyclés a été autorisée, mis à part dans les bétons précontraints, mais dans des proportions limitées qui dépendent de leur qualité et de la classe de résistance souhaitée pour le béton. Trois types de gravillons recyclés sont définis :

- ➡ Type 1 : Au moins 95 % de béton ou granulats non liés
- ➡ Type 2 : Au moins 90 % de béton ou granulats non liés
- ➡ Type 3 : Au moins 70 % de béton ou granulats non liés

Le taux de substitution maximal autorisé de granulats recyclés en % par rapport à la masse totale de gravillon ou de sable varie de 30% pour les gravillons de type 1, à 15% pour les gravillons de type 2 et 5% pour les gravillons de type 3. De plus, les gravillons recyclés de types 2 et 3 ainsi que les sables recyclés ne peuvent être utilisés que pour des bétons de résistances inférieures ou égales à C25/30 [15].

Un manque de données fiables doit être souligné sur l'utilisation du sable recyclé (RS), car ce dernier est composé en majorité du RMC. En conséquence, peu d'études existent sur l'utilisation du sable recyclé dans le béton [4 ; 9 ; 18 et 20]. Cependant, lors du concassage des C&DW une quantité importante de fraction fine est inévitable qui dépasse les 50% de la quantité totale de granulats recyclés produite [20]. Quelques études [9 ; 21 et 22] ont conclu que cette fraction (RS) est nocive à la durabilité des bétons, suite à sa forte demande en eau et il contient plus d'impuretés, dont son ressort est la décharge, par contre d'autres études limitent son utilisation dans le nouveau béton à un seuil de 20% à 30% comme pourcentage de remplacement des sables naturels [23 et 24]. En effet, l'utilisation de granulats recyclés de tous genres est fortement recommandée d'augmenter le processus de recyclage des C&DW. Néanmoins, peu d'études se sont intéressées à l'étude des propriétés à long terme du béton de granulats recyclés et peu d'études se sont intéressées à la problématique de la durabilité des bétons formulés avec une intégration totale des granulats recyclés, sable et graviers [25 et 26].

Dans cette optique, ce travail de thèse a pour objectif de répondre à deux problématiques liées à la faisabilité de la valorisation des granulats recyclés, principalement le sable recyclé, dans les matériaux cimentaires (mortier et béton), et leurs propriétés spécifiques dans un contexte de développement durable. L'étude bibliographique qui suit, après avoir effectué un rappel sur les déchets de chantier et sur la classification des granulats recyclés, s'articulera autour des trois volets suivants :

- ▶ Propriétés chimiques, physiques et mécaniques des granulats recyclés (RCA) ;
- ▶ Propriétés rhéologiques des mortiers et bétons à base de ces recyclés (sable et gravillons) ;
- ▶ Propriétés physiques et mécaniques relatives à la durabilité de ces matériaux cimentaires recyclés.

1.2 Caractéristiques et propriétés de granulats recyclés de béton

En général, on peut s'attendre à ce que les propriétés de granulats recyclés de béton (RCA) soient inférieures à celles de granulats naturels (NA). Cela est dû au mortier attaché sur les granulats (RMC) qui est la cause des principales différences entre les NA et les RCA, qui à son tour peut conduire à une baisse des propriétés mécaniques du mortier et du béton lorsque ces granulats recyclés sont utilisés [27 et 28]. Sans aucun doute, les RCA possèdent des propriétés hétérogènes et distinctes de celles de granulats naturels qui ont entravé leur utilisation fréquente, particulièrement si leur granularité est fine [12]. Cette variation significative de la qualité de ces recyclés dépendrait de plusieurs paramètres de production : premièrement, elle est liée à la qualité et aux propriétés du béton d'origine (BP). Deuxièmement, le processus de recyclage est également important car il influe sur la quantité du RMC, qui diminue à mesure que les étapes du processus de concassage augmentent. Enfin, il convient de noter qu'il existe une différence significative entre les différentes fractions granulométrique, entre les propriétés des graviers recyclés et les sables recyclés qui contiennent toujours une proportion beaucoup plus élevée de RMC [14]. Par conséquent, ces trois problèmes les plus importants qui doivent être contrôlés lors de la production de granulats de béton recyclés.

1.2.1 Principaux paramètres influant les caractéristiques des RCA

1.2.1.1 Morphologie et texture de surface

Les granulats recyclés (RCA) diffèrent principalement des granulats naturels par leur propriétés de surface, pour le granulat naturel et ce malgré une pétrographie pouvant être variable d'un grain à l'autre, il est admis que la masse volumique, l'absorption d'eau, la résistance mécanique etc..., d'une coupure sont des propriétés intrinsèques. En revanche, lorsque l'on s'intéresse au granulat recyclé, les propriétés citées peuvent varier notamment avec le mode de son obtention. En effet, le granulat recyclé présente généralement deux phases qui proviennent d'une part du squelette granulaire de l'ancien béton « béton parent » (BP) et d'autre part de sa matrice cimentaire. La gangue cimentaire entourant le grain initial est connue pour posséder une forte porosité et qui peut être accentuée par la phase de concassage, en raison de la création de fissurations internes [29].

I.1 Recyclage des granulats issus des matériaux de démolition

Tandis que, certains chercheurs [30 - 32] ont conclu que la texture rugueuse des RAC, alliée à leur porosité élevée, peut conduire à une plus grande teneur en produits d'hydratation dans les pores des granulats, permettant une densification de la zone de transition interfaciale (ITZ) et conduit à l'amélioration de la performance finale du béton [33 et 34].

Le sable recyclé possède des formes plus anguleuses et plus irrégulières comparativement à un sable naturel [35]. Le RS se caractérise par la présence d'une quantité importante de RMC, principalement sa partie fines (<63 µm). La morphologie du RS peut influencer d'une part la compacité du squelette granulaire et l'empilement granulaire et d'autre part les propriétés du matériau cimentaire aux états frais (capacité d'absorption d'eau élevée) et qui peut avoir des répercussions négatives sur les performances mécaniques à l'état durci.

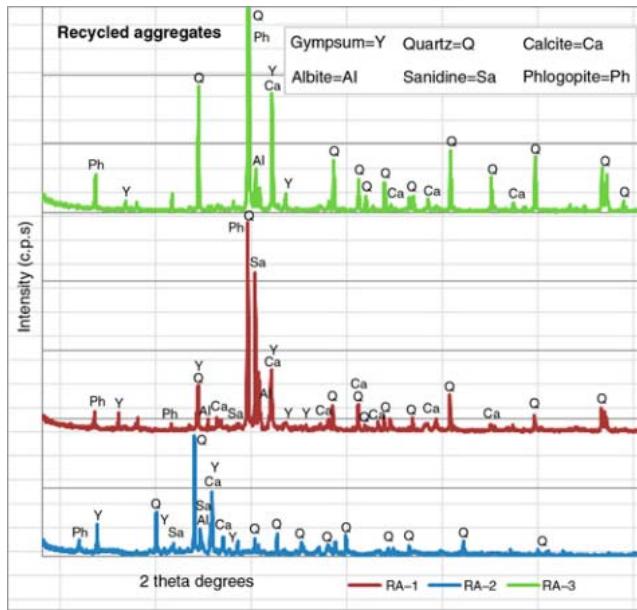
1.2.1.2 Ancien mortier collé au granulat recyclé

Une des tares des RCA, est la présence aléatoire de l'ancien mortier collé au granulat (RMC) et qui ne peut être éliminé facilement. Par conséquent, la qualité et la quantité de RMC sont les facteurs clés qui contrôlent la qualité des RCA et, en fait, la performance du béton recyclé [9 et 14]. Les propriétés du RMC sont fortement liées au rapport E/C initialement adopté pour le béton d'origine, sa résistance mécanique, type de ciment utilisé et l'âge de maturation [32 et 36], ainsi qu'elles dépendent de la méthode de préparation, du mode de concassage et les dimensions des RCA [2 ; 31, 37 et 38]. Selon la littérature, la quantité massique de ce résidu cimentaire est évaluée entre 20% et 70% [39 et 40]. Elle est comprise entre 23 à 44 % pour la fraction 8/16 mm et 33 à 55% pour 4/8 mm de leur volume [31 et 41].

Il est largement admis qu'une plus grande quantité de RMC conduit à une plus grande capacité d'absorption d'eau qui modifie en grande partie les propriétés du béton recyclé (RAC) et porte atteinte à sa résistance à long terme. Par conséquent, les recommandations pour produire des bétons recyclés structuraux proposent l'utilisation seulement du gravier recyclé, caractérisé par sa faible teneur en RMC. Sánchez de Juan et al. (2009) [31] ont conclu dans leurs étude que seuls des granulats recyclés avec une teneur en mortier inférieure à 44% pourraient être utilisés pour le béton structural. Cependant, des études récentes [42] ont fourni d'autres informations sur le RS pour promouvoir son utilisation dans le RAC.

1.2.2 Caractéristiques chimiques et minéralogiques

Peu d'auteurs ont abordé la caractérisation chimique et minéralogique des granulats recyclés [9 ; 43 et 44]. En relation avec la phase granulaire initiale, il ressort de l'étude de granulats recyclés que les phases granulaires initiales sont essentiellement de nature calcaire, siliceuse ou silico-calcaire. A partir des phases provenant des vestiges du RMC sont la calcite, dolomite et le quartz et, d'autres phases telles que l'albite et le gypse peuvent également être observées [9 et 45] (Figure 1.2).



RA-1 et RA-2 : Sables recyclés (céramique + béton) et RA-3 : sable recyclé du béton.

Figure 1.2 Analyse DRX de trois types de sables recyclés d'usines [45]

Finalement, on observe la présence de phases plus problématiques pour la durabilité du béton, tels que les chlorures (risque de corrosion des armatures) ou encore le gypse (risque d'expansion dans le béton) provenant soit du ciment soit de déchet de plâtre.

1.2.3 Propriétés physiques et mécaniques des granulats

Il a été largement prouvé et confirmé, à travers la littérature, que les RCA quel que soit l'origine du BP, possèdent des propriétés hétérogènes et distinctes de celles de granulats naturels (NA) qui ont entravé leur utilisation fréquente, particulièrement si leur granularité est fine [12]. Ils se caractérisent par une forte porosité qui conduit à une absorption d'eau plus élevée, une plus faible densité, des faibles résistances à l'usure et la fragmentation [9 et 15].

1.2.3.1 Densité, porosité et absorption d'eau

La densité, la porosité et la capacité d'absorption d'eau sont directement liées entre elles. Elles sont considérées comme étant les paramètres les plus importants pour contrôler la qualité des granulats recyclés. Il est largement admis qu'une plus grande quantité du RMC conduit à modifier en grande partie les propriétés du granulat recyclé. La densité des RCA est généralement plus faible qu'un granulat naturel, les valeurs varient de 2,0 à 2,5 g/cm³ et leur porosité moyenne est de 8,5% [46] et leur capacité d'absorption d'eau est plus élevée que celle des granulats naturels. Ces derniers ont une absorption d'eau comprise entre 0,5 et 4%, cependant, l'absorption d'eau obtenue des granulats recyclés, à partir la base de données de 299 résultats [14], est comprise entre 1,65% et 13,1%, avec une moyenne de 5,32%. Par ailleurs, elle diminue avec l'augmentation de la dimension des RCA cela est dû à la quantité importante du RMC dans la fraction fine que dans la fraction grossière, figure 1.3. Cette différence est principalement due à la quantité et la qualité du RMC

I.1 Recyclage des granulats issus des matériaux de démolition

adhérant au granulat naturel de départ, qui est plus poreux que la pierre en elle-même, et qui est la phase la plus faible des RCA, il se détériorant prioritairement lors la phase de concassage ou de malaxage. À cet effet, les fractions fines seront principalement constituées de mortier collé.

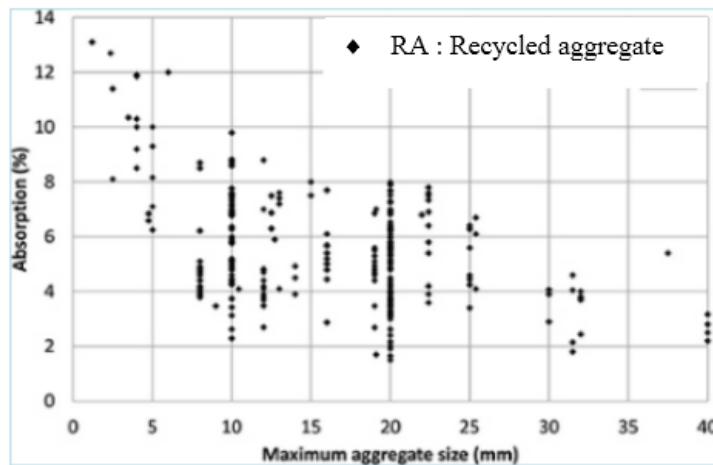


Figure 1.3 Relation entre l'absorption d'eau et la dimension maximale des granulats recyclés [14]

La figure 1.3, mette en évidence l'influence importante de la taille des granulats recyclés sur leur capacité d'absorption de l'eau. À cet égard, l'absorption d'eau des graviers recyclés varie de 1,12 à 8,82%, avec une valeur moyenne de 5,06%, alors que l'absorption d'eau des sables recyclés varie de 6,84% à 13,1% avec une valeur moyenne de 9,89%. Cependant, et pour la même granulométrie maximale, une certaine dispersion peut être observée, étant donné que cette absorption est également influencée par la nature du béton d'origine et le processus de concassage [14 ; 47- 5050].

Plusieurs autres paramètres régissent la densité et l'absorption d'eau des granulats recyclés : type et taille maximale de granulat naturel dans le béton parent (BP) ainsi ses performances mécaniques [9 et 22]. Il a été montré que le pourcentage d'absorption d'eau du granulat recyclé augmente avec la performance mécanique du béton parent, à cause de la plus grande quantité de mortier attachée dans ce cas-là [22]. D'autres études ont mis en évidence plus que le granulat naturel initial est petit, plus la surface spécifique totale disponible est grande, et donc plus les granulats recyclés sont riches en RMC, autrement dit, plus ils sont poreux [51].

L'absorption d'eau des granulats devrait être mesuré après leur trempage dans l'eau pendant au moins 24 heures, selon la norme EN 1097-6/A1 : 2014. Cependant, La cinétique d'absorption d'eau des RCA est très rapide, de nombreux auteurs sont d'accord avec le fait que dans les 10 premières minutes, les granulats recyclés peuvent atteindre 80-90% de leur capacité d'absorption d'eau à 24 heures [19; 35; 40; 52 - 55], figure 1.4. Pour cette raison, l'absorption d'eau à 10 minutes est une valeur très utile lors de la conception, car elle peut être utilisée pour calculer l'eau supplémentaire nécessaire pour maintenir l'ouvrabilité ou définir le temps total de pré-trempage [14].

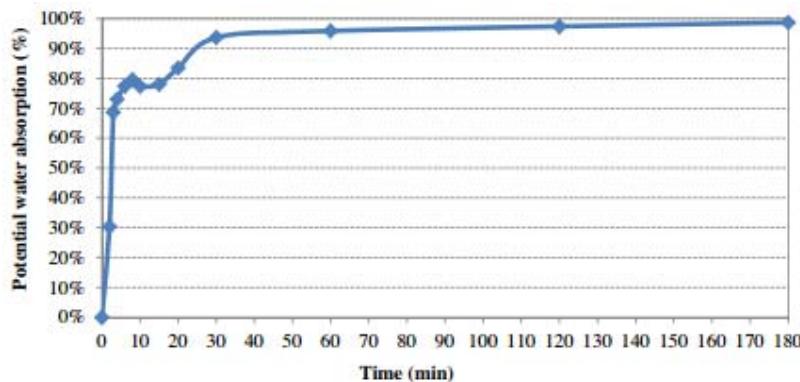


Figure 1.4 Cinétique d'absorption d'eau de RS [56]

L'étude de Evangelista et al. (2015) [35] montre, à partir de la littérature à titre de comparaison, une bonne corrélation entre le coefficient d'absorption d'eau des granulats recyclés et leur densité, Figure 1.5. Cette tendance peut s'expliquer par une plus grande quantité de RMC connu pour posséder un réseau poreux plus développé et d'une densité plus faible, d'environ 1,0-1,6 kg/m³, comparativement aux granulats naturels [52].

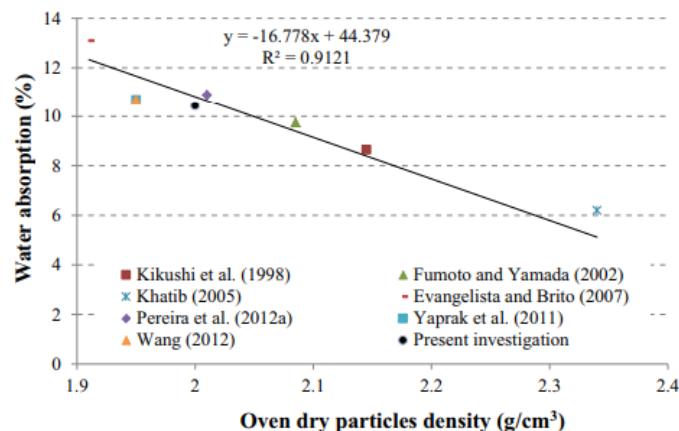


Figure 1.5 Relation entre l'absorption d'eau et la densité de particules sèches [35].

1.2.3.2 Teneur en fines

Un des paramètres les plus importants est la teneur en fines contenue dans une coupure de sable. Elle est définie comme étant la quantité de particules passant au tamis de 63 µm. Cette teneur en fines est beaucoup plus élevée dans le cas de sable recyclé, figure 1.6.

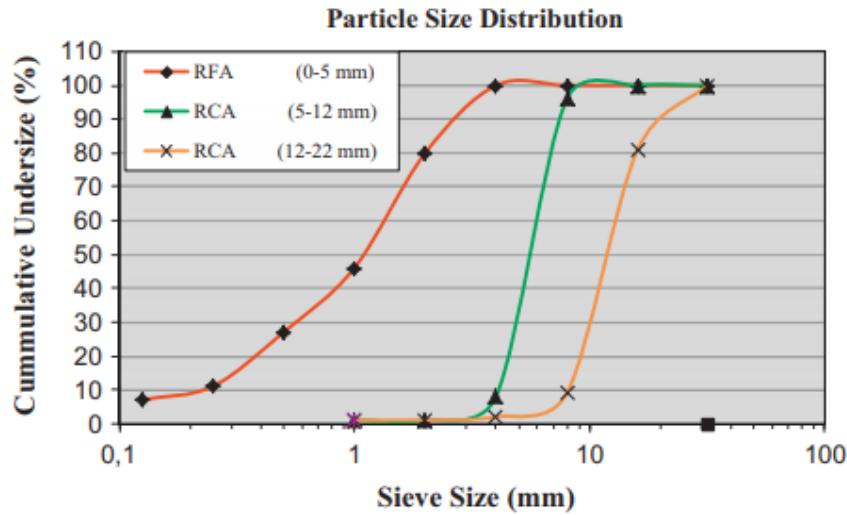


Figure 1.6 Répartition granulométrique des granulats recyclés (fins et grossiers) [6].

La quantité importante des fines conduira à une surface spécifique élevée influençant fortement la demande en eau. De plus, une forte densité de particules fines peut perturber l'empilement granulaire et ainsi provoquer une diminution de la résistance en compression. Pour ces deux raisons (demande en eau excessive et modification de compacité). L'emploi du sable recyclé n'est pas recommandé pour la formulation des bétons de structure, voire purement interdit pour certaines applications (la préfabrication) [22].

Pour conclure sur les propriétés physiques de ce type de granulats, il est important de bien prendre en compte leurs hétérogénéités dues à la gangue de mortier encore présent. La variabilité associée se répercutera nécessairement sur les propriétés du nouveau béton. Il est donc primordial de bien caractériser une coupure recyclée avant tout emploi dans une formulation de béton. La présence du RMC et qui possède une dureté beaucoup plus faible que le granulat naturel, affecte davantage cette dureté, donc sa qualification.

Chapitre 2

Influence des granulats recyclés sur les propriétés des matériaux cimentaires

Afin de mettre en évidence l'influence des coupures granulaires recyclées sur les propriétés des matériaux cimentaires, le développement sera dissocié en deux parties :

- L'incorporation de sable recyclé dans les mortiers ou dans les bétons lorsqu'il se substitue (partiellement ou totalement) au sable naturel,
- L'incorporation des graviers recyclés dans les bétons lorsqu'ils se substituent (partiellement ou totalement) au gravier naturel seulement.

2.1 Propriétés à l'état frais

2.2 Influence des granulats sur la maniabilité

La maniabilité est une caractéristique d'aptitude à la mise en œuvre d'un béton. Elle est influencée par plusieurs paramètres intrinsèques de la composition d'un béton (dosage en eau, dosage et nature du liant, forme et texture des granulats, granulométrie et dimension maximale du granulat) [57 et 58]. D'autres paramètres, s'ils ne sont pas contrôlés, peuvent affecter d'avantage la maniabilité tels que : le malaxage, le transport du béton, la température, l'hygrométrie, les fines des sables et l'influence des adjuvants.

La quantité d'eau, nécessaire pour une maniabilité donnée, augmente avec l'augmentation de l'indice de la forme et la texture des gros granulats [59]. Il est préconisé de réduire le diamètre et la quantité des plus gros granulats afin d'éviter la ségrégation. Les granulats anguleux avec une texture de surface rugueuse (tels que les granulats concassés et recyclés) nécessitent plus d'eau pour une maniabilité donnée que les granulats arrondis à texture lisse [57 et 60], de plus, leur coefficient de frottement relativement important, les rend défavorables pour la maniabilité.

La présence de fillers favorise la maniabilité du béton, en facilitant le mouvement des granulats. L'influence des propriétés des granulats sur la maniabilité diminue à mesure que le mélange devient plus riche en ciment [61] et peut même disparaître lorsque le rapport G/C est de l'ordre 2,5 ou de 2 [57 et 59].

2.2.1 Influence du gravier recyclé

L'ouvrabilité des bétons recyclés est généralement affectée par la capacité d'absorption d'eau des granulats. La forme et la texture des granulats peuvent également affecter l'efficacité de l'ouvrabilité de ces bétons. Cela dépend du type de concasseur utilisé [62].

La forte absorption d'eau est attribuée à la présence du RMC et plus celui-ci est important plus la maniabilité se réduit davantage [63]. D'après certaines expériences, les bétons recyclés à base de granulats recyclé et sable naturel nécessitent 5 % d'eau que le béton conventionnel avec la même ouvrabilité [62]. Certains chercheurs conseillent l'utilisation des granulats recyclés saturés en eau ou très humides (plus proche de saturation).

2.2.2 Influence du sable recyclé

En considérant la forte capacité d'absorption d'eau des RS, leur incorporation dans un mélange cimentaire peut provoquer des modifications de son comportement à l'état frais. Il est important de noter que la partie fine du RS (inférieure à 150 µm) dispose d'une finesse Blaine beaucoup plus élevée que celle du sable naturel. Cette augmentation de surface spécifique explique celle de la demande en eau du mélange avec 100% de sable recyclé.

Afin de pallier ce problème et ainsi obtenir la maniabilité visée, deux types de modification peuvent être envisagés. Soit une augmentation de la quantité d'eau donc le rapport E/C augmente, ou bien l'introduction des adjuvants réducteur d'eau, cette dernière représente une solution sûre et moins onéreuse [25 et 64].

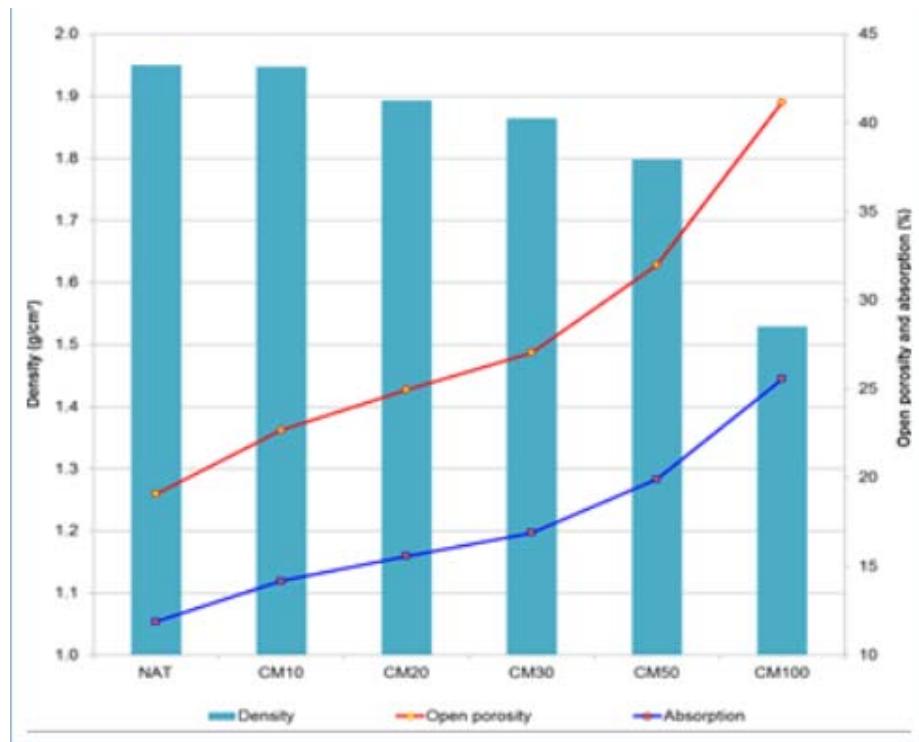


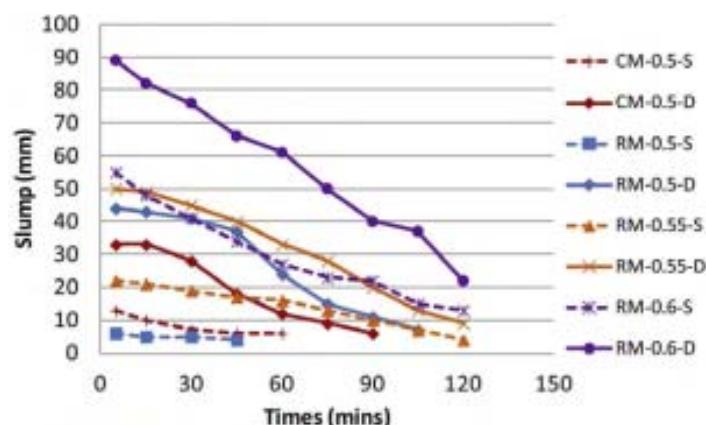
Figure 2.1 Densité, porosité et absorption de mortiers recyclés [9]

Cuenca-Moyano et al. (2014) [65] ont étudié l'influence de la pré-saturation des sables recyclés sur les propriétés du mortier de maçonnerie et ont conclu que cette méthode pourrait être plus efficace pour compenser l'absorption d'eau plus élevée des RS. Cette observation est confirmée par l'étude de Zhao et al. (2015) [23], l'état de saturation initial du sable joue un rôle important sur le

comportement à l'état frais du mélange. Les auteurs ont comparé les propriétés d'un mortier incorporant du RS sec et saturé. Les observations faites montrent que quel que soit le rapport E/C, les mortiers à base de sable sec donnent toujours un affaissement plus élevé que ceux avec sable à l'état saturé. Pour une composition avec un sable sec, cela peut s'expliquer par une perturbation initiale de la quantité d'eau disponible pour le maintien de rhéologie et ce malgré l'apport initial d'une quantité d'eau excédentaire correspondant à la part d'eau d'absorption du RS. Il y aurait un effet de la cinétique d'imbibition du sable recyclé. En revanche, lorsque les RS sont saturés, l'eau absorbée est présente dans la porosité du RMC. Cette eau est donc piégée initialement et il n'y a pas de modification de la quantité d'eau par imbibition lors de la phase de malaxage.

Dans l'étude menée par Cartuxo et al. (2015) [56], la valeur d'affaissement visée était de 120mm (les sables recyclés possédaient le même état hydrique que le sable naturel (3,2%). Pour respecter cet objectif, une augmentation du rapport E/C de 16,3% a été nécessaire pour le béton incorporant 100% volumique de RS comparativement au béton de référence. De la même façon, pour viser un affaissement de 110 ± 5 mm sur mortier, le rapport E/C varie de 0,60 à 0,71 lorsque 100% massique de sable naturel est remplacé par du sable recyclé [25].

En s'intéressant à la perte d'affaissement dans le temps, on observe qu'elle est plus rapide pour les matériaux confectionnés avec sable sec. Cela peut encore s'expliquer par une cinétique d'imbibition des grains de RS qui est très rapide dans les premières minutes après le malaxage [55 et 66].



CM-0.5-S et CM-0.5-D : mortiers contenant de sable naturel saturé (S) ou sec (D) ; E/C = 0,5

RM-X-S et RM-X-D : mortiers contenant de sable recyclé saturé (S) ou sec (D) ; E/C = X

Figure 2.2 Evolution dans le temps de l'affaissement des mortiers incorporant du SR [23]

2.3 Propriétés de bétons de granulats recyclés

2.3.1 Propriétés du béton à l'état frais

2.3.1.1 Propriétés rhéologiques

L'ouvrabilité du béton incorporant des granulats recyclés dépend de plusieurs paramètres : méthode de formulation, la nature du granulat (sable, gravier et sable + gravier), le taux de remplacement (0 à 100%) ou encore l'état hydrique du granulat principalement les recyclés. L'étude de Mefteh et al. [55] montrent une perte de l'ouvrabilité dans le temps. Cette perte s'avère importante pour les 30 premières minutes.

Plusieurs recherches ont montré que pour une teneur en eau identique, l'ouvrabilité d'un béton recyclé sera inférieure à celle d'un béton standard, et ceci plus particulièrement quand le pourcentage de remplacement de granulats excède 50% [67]. Cette différence est très certainement due à la plus grande porosité des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels. Afin de pallier ce problème, différentes études ont été réalisées en faisant varier les conditions de préparation des granulats, et il en est ressorti qu'un ajout d'eau correspondant à l'absorption d'eau des granulats testés améliore significativement l'ouvrabilité du béton frais [55 et 68]. L'eau peut être ajoutée de différentes manières, soit en pré-saturant les granulats préalablement au malaxage, soit en compensant en ajoutant directement l'eau d'absorption dans l'eau de gâchage [15 ; 32 ; 51 et 55].

Dû à un coefficient d'absorption d'eau généralement plus élevé que celui d'un gravillon naturel, les gravillons recyclés vont grandement influencer la rhéologie du béton à l'état frais. Les conditions hydriques du matériau au moment du malaxage sont primordiales (granulat à l'état sec ou mouillé, pré-humidification, temps de saturation etc...), et associées aux conditions de mise en œuvre (introduction des constituants et temps de malaxage), elles auront des effets directs sur le rapport E/C efficace final du béton et donc sur son aptitude à l'écoulement.

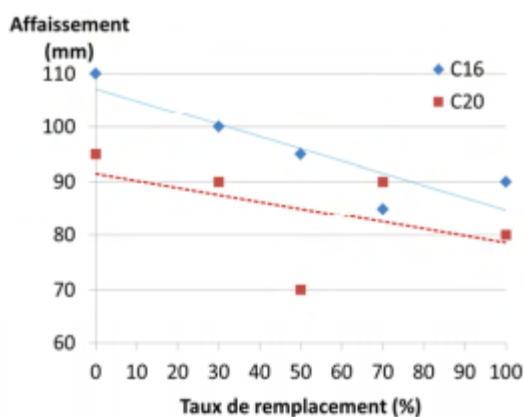


Figure 2.3 Relation entre l'affaissement et le taux de remplacement en masse en gravillons recyclés [67], reportée par [9]

A partir de la figure 2.3, on observe qu'une augmentation du taux de remplacement des gravillons naturels par des gravillons recyclés (saturés en eau pendant 30 minutes avant le malaxage)

va favoriser une diminution de l'affaissement du béton de classe C16 ou C20 [67]. Cette diminution de l'ouvrabilité peut être corrigée soit par un ajout d'eau supplémentaire soit par un surdosage en adjuvant [69].

2.3.1.2 Air occlus

Selon Katz, (2003) [70], il a été observé que la teneur en air occlus d'un béton frais augmente dès lors que des gravillons recyclés sont incorporés. Avec un taux de remplacement de 100%, l'augmentation est de 4% à 5,5%. D'après l'auteur, cela peut être attribué à une porosité plus élevée des gravillons recyclés. En effet, lors de phase de vibration, la forme et la rugosité des gravillons recyclés peuvent empêcher le dégazage des bulles d'air. Le phénomène peut être accentué si la quantité de sable est importante dans le béton. La teneur en air est essentiellement contrôlée par la quantité de RS dont les grains facilitent le piégeage des petites bulles d'air lors de la phase de vibration. En effet, selon Fernández-Ledesma (2016) [71], les valeurs moyennes de la teneur en air occlus, diminuaient linéairement à l'augmentation de la teneur du RS dans le mortier de maçonnerie, figure 2.4.

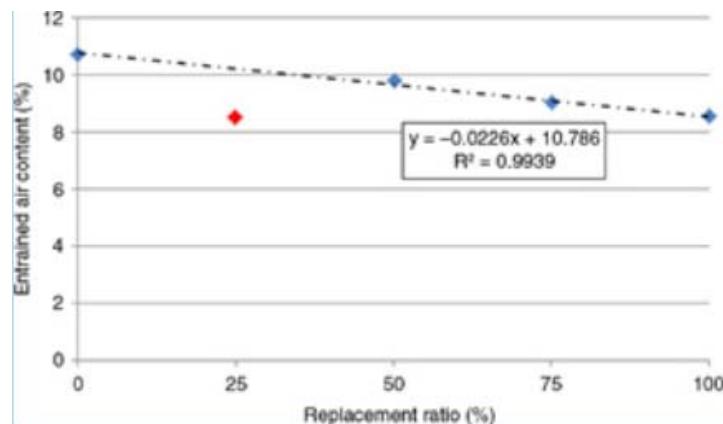


Figure 2.4 Pourcentage de l'air occlus par rapport au taux de remplacement du RS dans le mortier de maçonnerie [71]

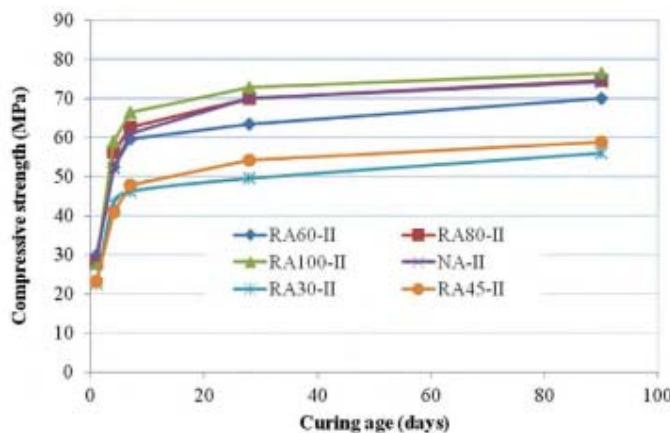
2.4 Propriétés du béton à l'état durci

2.4.1.1 Influence des granulats recyclés

2.4.1.1.1 Influence de la qualité du béton d'origine

La qualité des grains composant la coupure granulaire joue un rôle important dans la qualité du béton. En parallèle, la qualité des gravillons recyclés dépendra fortement de la source d'origine. Dans l'étude de Casuccio et al. (2008) [72], les gravillons recyclés utilisés sont issus de deux types de béton dont les résistances en compression étaient de 30 MPa et de 50 MPa. Le béton confectionné avec les gravillons provenant du premier béton présente une résistance à la compression plus faible que celui fabriqué avec les gravillons de deuxième (50MPa). Une étude similaire a été menée par Kou et Poon (2015) [73], avec 100% de gravier recyclés et un rapport E/C de 0,35. La gamme de bétons qui était à recycler possédait des résistances initiales de 30 à 100

MPa. Les mêmes conclusions ont été faites (Figure 2.5) ; les gravillons recyclés provenant de bétons à hautes performances (80 MPa et 100 MPa) confèrent des résistances similaires, voire plus élevées (+3,9%) que celles obtenues avec des gravillons naturels. Dans ces deux études, l'état hydrique initial (SSS) des granulats naturels et granulats recyclés a été maintenu pour toutes les formulations.



RA X – II : béton incorporant 100% en volume de gravillons recyclés en provenance de béton de classe X (MPa)

Figure 2.5 Influence des performances mécaniques du béton d'origine sur la résistance à la compression de béton incorporant des gravillons recyclés [73]

Les travaux de Padmini et al. (2009) [22] caractérisant l'influence du béton d'origine sur les propriétés mécaniques des nouveaux bétons présentent des résultats contradictoires avec les recherches précédentes [72 et 73]. Trois bétons possédant des résistances différentes (35, 48 et 55 MPa) ont été testés. Les résultats montrent que la résistance des nouveaux bétons diminue avec l'augmentation de la résistance initiale des bétons à recycler. La différence ici, semble due au fait que le coefficient d'absorption des gravillons recyclés augmente avec la qualité du béton original.

2.4.1.1.2 Influence de l'état hydrique

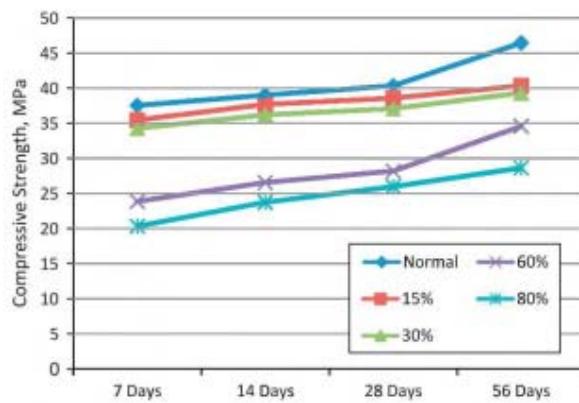
Avec un coefficient d'absorption d'eau élevé, l'état hydrique initial des gravillons recyclés, avant malaxage, doit bien être maîtrisé car il peut influencer la résistance à la compression du matériau final [55].

Selon les travaux de [66 et 75], il semblerait que les gravillons recyclés à l'état saturé peuvent conduire à une diminution de la résistance. Poon et al. (2004) [66] expliquent cette baisse de performance par un phénomène de ressuage du béton après la phase de malaxage. L'eau liquide contenue dans la porosité des granulats recyclés serait relarguée en faible quantité ce qui modifierait localement le rapport E/C entraînant ainsi une augmentation locale de la porosité et un affaiblissement de l'auréole de transition matrice/gravillon. Koenders et al. (2014) [74] confirment ces observations par l'évolution de l'hydratation, exprimée par l'évolution de température mesurée dans le temps, de deux bétons à base de granulats recyclés (RG) présentant des états hydriques différents (sec et saturé). Ils montrent que la réactivité plus marquée est dans le cas où les gravillons étaient secs, conduisant par la suite à des résistances en compression plus élevées à toutes les échéances. D'autres études montrent que l'emploi de RG partiellement saturés peut être préconisé

[55 ; 69 et 74]. Ces états permettraient aux gravillons recyclés d'absorber de l'eau durant la phase de malaxage diminuant ainsi le rapport E/C total ce qui aurait comme répercussion de favoriser la résistance en compression.

2.4.1.1.3 Influence du taux de remplacement en granulats recyclés

La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du taux de remplacement en granulats recyclés. Dans l'étude menée par Etxeberria et al. (2007) [75] sur les bétons recyclés, (pour la même résistance visée de 35 à 40 MPa et avec E/C=0,55), montrent que la résistance à 28 jours est peu influencée par un taux inférieur à 25% de remplacement en graviers recyclés. Cette limite est aussi préconisée par d'autre recherche [76 et 77]. De la même façon, dans l'étude menée par Kwan et al. (2012) [26], (pour une $R_c = 25$ MPa et $E/C = 0,58$), les bétons incorporant différents taux de substitution en recyclés montrent une diminution significative lorsque le taux de remplacement est supérieur à 30%, figure 2.6.



X% : Taux de substitution en masse de gravillons naturels par des gravillons recyclés

Figure 2.6 Evolution des résistances en compression dans le temps des bétons à base de graviers recyclés [26]

2.4.1.1.4 Influence de la zone de transition interfaciale

Dans la composition du béton, considérer comme étant un composite à deux phases : granulat et matrice cimentaire, la pâte de ciment n'est pas complètement homogène et sa microstructure est modifiée à proximité des granulats. Cette zone est généralement appelée zone de transition interfaciale (ITZ). Il n'y a pas qu'une seule ITZ dans un béton recyclé, comme dans un béton ordinaire, mais il y avait trois types d'ITZ comme le montre la figure 2.7. La première zone (ITZ1) entre le granulat est le nouveau mortier de ciment, la deuxième (ITZ2), existe entre l'ancien RMC et le nouveau mortier de ciment et la troisième zone constituée dans le granulat recyclé (ITZ3) c'est la liaison entre le granulat et la pâte ancienne. Ces zones doivent être prises en considération lors de l'étude de la perméabilité et la résistance du béton [78].

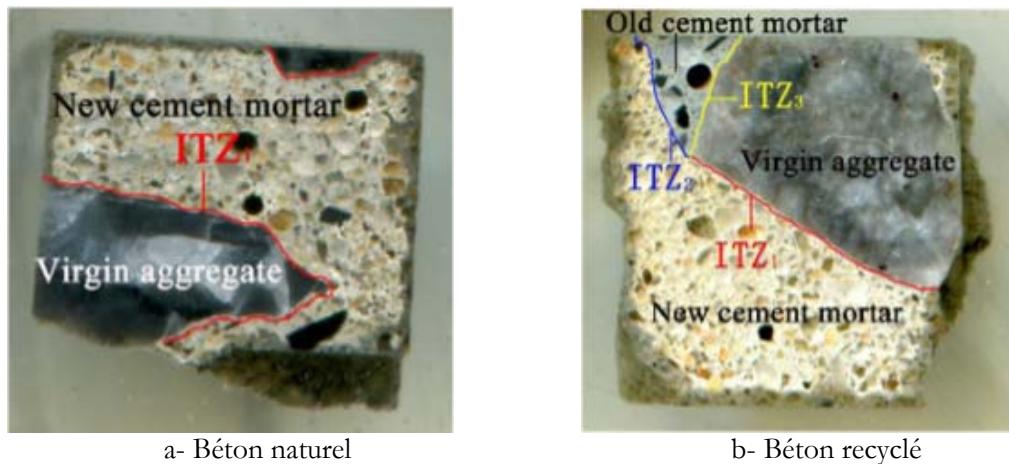


Figure 2.7 Différentes types de zones de transition interfaciale [78]

La résistance du béton dépendait de la résistance du mortier, du granulat et de l'ITZ. Certaines observations montrent clairement que la microfissuration dans le béton provient de la zone interfaciale et que, à la rupture, le réseau de fissuration passe par ces interfaces. Les caractéristiques minéralogiques des granulats fins ainsi que les granulats ayant une couche externe poreuse ont une influence sur la microstructure de l'auréole de transition, ils entraînent la formation d'une zone plus dense [57]. Dans le cas des bétons fabriqués à partir de granulats recyclés, il a été montré dans différentes études que la présence d'ancien mortier autour des granulats améliore significativement les performances mécaniques de la zone de transition. En effet, on observe une bonne interaction entre l'ancien et le nouveau mortier et également une bonne résistance à l'abrasion [79].

Selon l'étude de Zhao, Y. (2017) [78], Les propriétés micromécaniques du nouveau mortier, les nouvelles ITZ1 et ITZ3 diminuent à mesure que le remplacement des RA augmente à un âge précoce de 3 jours ; l'augmentation du rapport eau/liant efficace due à l'ajout d'eau au béton recyclé que au béton conventionnel peut-être la raison prédominante. Cependant, ces différences ne sont plus significatives après 28 jours. Par conséquent, les propriétés mécaniques des ITZ2 sont prouvées stables dans le temps ou sur les taux de remplacement de la PR dans le béton. Ils ont montré que le processus de pré-mouillage conduit à une résistance à la compression plus faible des bétons recyclés. Cela était dû à la libération d'eau pré-absorbée qui a augmenté le rapport E_{eff}/C autour des RA et il y avait beaucoup de cristaux de portlandite dans l'arrangement directionnel, rendant les ITZs faibles et poreuses [78].

2.5 Propriétés Mécaniques des bétons recyclés

La résistance mécanique d'un béton est fondamentalement liée aux performances mécaniques des granulats. La résistance à la compression des bétons à base de granulats de recyclage est influencée directement par la résistance des granulats utilisés [57]. Celle-ci dépend à son tour de la densité brute des granulats. Comme les granulats de recyclage présentent généralement une densité inférieure à celle des granulats naturels, en raison de la présence de ciment et d'une composition souvent hétérogène, la résistance à la compression des bétons de recyclés est généralement

moindre. La présence du RMC et qui possède une dureté beaucoup plus faible que le granulat naturel, affecte davantage cette dureté donc sa qualification [31]. D'après certains auteurs [39 et 40], les bétons fabriqués avec des granulats recyclés obtiennent de bonnes résistances mécaniques et peuvent atteindre des résistances équivalentes à celles d'un béton conventionnel.

2.5.1 Résistance à la Compression

La résistance à la compression des bétons à base de granulats recyclés a été largement étudiée [26 ; 72 ; 73 ; 80 - 86]. La majorité des études est consacrée à l'influence du gravier recyclé, Toutefois, peu d'études existent sur les bétons fabriqué avec du sable recyclé ou bien avec les deux fractions gravier et sable [87].

De manière générale, il a été souvent constaté [38 ; 83 et 84] que les bétons formulés à partir de granulats recyclés présentent des résistances à la compression inférieures aux bétons standards. Et cette diminution de performance varie fortement selon un certain nombre de paramètres, tels que le taux de remplacement de granulats, le rapport eau/ciment, les conditions de préparation des granulats (saturés ou secs), ou encore la qualité du béton parent.

2.5.1.1 Influence du gravier recyclé

Comme les trois quarts du volume d'un béton sont occupés par les granulats, ce qui revête que la qualité de ces derniers est d'une grande importance sur la résistance à la compression du béton. Celle-ci ne peut excéder de manière significative celle de la plupart des granulats et cela dépend d'une part, de la nature de la roche mère qui a été concassée ou usée à la dimension actuelle et d'autre part, du processus de concassage adopté [88].

Il est clair que les résistances à la compression des bétons recyclés sont influencées directement par la résistance des granulats utilisés, elles sont inférieures à celle du béton de référence, fabriqué avec un granulat naturel. Cela peut s'expliquer par des caractéristiques intrinsèques plus médiocres des granulats recyclés comparativement à ceux naturels. La présence du RMC et qui possède une dureté beaucoup plus faible que le granulat naturel, affecte davantage cette dureté donc sa qualification [31].

Il est cependant important de noter que l'inverse a aussi été observé, les RCA peuvent rivaliser les bétons conventionnels s'ils sont riches en gravier que de vieux mortier [11]. Des augmentations de performances mécaniques de l'ordre de 10 à 13% pour les bétons recyclés par rapport aux bétons naturels [75]. Il a été montré par exemple qu'à E/C élevé (entre 0,6 et 0,75), la résistance d'un béton recyclé est comparable à celle d'un béton standard jusqu'à un taux de remplacement aussi important que 75% [70]. Rao et al. (2007) [68] ont également constaté que pourvu que le rapport E/C soit supérieur ou égal à 0,55, les résistances des bétons recyclés étaient comparables à celles des bétons standards même au taux de remplacement de 100%. Cette tendance est liée au fait qu'à rapport E/C élevé, la résistance en compression est liée à la qualité de la pâte et de l'interface pâte-granulats, moins résistantes que les granulats. En revanche, avec un rapport E/C réduit à 0,4, la valeur de la résistance chute de 25%.

I.2 Influence des granulats recyclés sur les propriétés des matériaux cimentaires

De manière générale, on peut dire que plus le rapport granulats recyclés/granulats naturels augmente, plus la résistance à la compression diminue, mais qu'en ajustant ce ratio, on parvient toujours à atteindre les résistances requises [21 ; 67 et 89]. Elles diminuent avec l'augmentation du taux d'incorporation de granulats recyclés [80-82 ; 85 et 86]. Il ressort de manière unanime que l'ampleur de cette diminution dépend principalement de la méthode de production du béton [90], du pourcentage des granulats recyclés, leur type, leur taille, leur qualité et leur origine [90 et 91].

Les granulats recyclés sont plus poreux et donc conduisent à une porosité plus élevée du matériau final induisant ainsi une diminution de la résistance. Néanmoins, la résistance du béton ne soit pas seulement due à la résistance mécanique des granulats, mais aussi, à un certain degré, à leur absorption et à leurs caractéristiques de liaison. L'ancienne auréole de transition présente entre le RMC et l'ancien granulat, constitue une zone de faiblesse supplémentaire pour le nouveau béton.

De manière générale, la qualité du granulat recyclé influence les propriétés du béton de différentes manières. Pour un rapport E/C donné, la perte de résistance augmente à mesure que la qualité du granulat recyclé s'aggrave [15]. Cependant, cet effet est plus perceptible pour les rapports E/C inférieurs puisque la résistance à la compression finale dépend davantage de la résistance du granulat recyclé, au lieu de la matrice de ciment [91 et 92].

Avec des moyens techniques spécifiques lors de la préparation du béton, une teneur en ciment accrue (d'environ 10%) et un rapport E/C réduit, des bétons de résistance comparable à celle du béton de granulats naturels peuvent être atteints. D'après une étude faite par Gonzalez Fonteboa B. (2002) [93], un béton préparé avec 50% de granulats recyclés humides et E/C = 0,55 donne la même résistante en compression qu'un béton conventionnel. Afin de s'affranchir de ce problème et améliorer la résistance, il est possible de modifier plusieurs paramètres comme ceux de la formulation ou le malaxage. Ces différences sont attribuées à l'utilisation des granulats recyclés dans des conditions de pré-saturation ou à l'ajout d'une quantité supplémentaire d'eau pendant le mélange. L'eau supplémentaire à l'intérieur des pores des agrégats recyclés saigne à la pâte de ciment pendant le processus d'hydratation résultant en une ITZ plus faible. Il en résulte un développement différent de la résistance à la compression entre les bétons recyclés et les bétons classiques, particulièrement important aux premiers âges [37 ; 92 ; 94 – 95].

González-Fonteboa et al. [18] ont utilisé la base de données de González-Taboada et al. [90], et ils ont analysé la relation de la résistance à la compression de RAC (f_c RC) par rapport à la résistance à la compression du béton conventionnel (f_c CC), en tenant compte de différents rapports de RCA grossier. Soit 229, 80 et 75 mélanges ont été utilisés avec des taux de remplacements de 100%, 50% et 20%, respectivement (Figure 2.8).

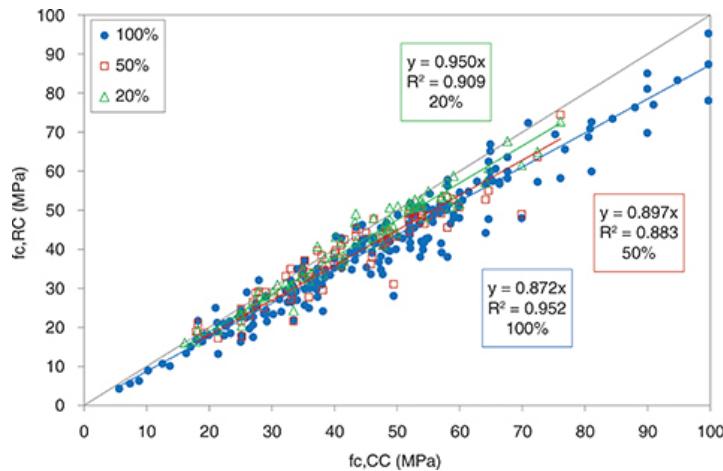


Figure 2.8 Relation entre ($f_{c,RC}$) et ($f_{c,CC}$) des différents mélanges [18]

La figure 2.8 montre une très forte corrélation et confirme que le taux des graviers recyclés influence la perte de résistance. Les réductions moyennes de la résistance à la compression des bétons recyclés étaient respectivement de 5%, 10% et 13% pour les taux de remplacement de 20%, 50% et 100%. Cela signifie que les faibles taux de remplacement (20%) n'influencent guère la résistance [18].

2.5.1.2 Influence du sable recyclé

L'utilisation de sable recyclé dans le béton reste très marginale, malgré ces quantités importantes, suite à sa forte demande en eau provoquée principalement par ces particules fines relativement importantes et sa morphologie irrégulière. De plus, avec ce problème récurrent de coefficient d'absorption d'eau très élevé, l'emploi de sable recyclé peut provoquer des problèmes de comportement du béton que ce soit à l'état frais (diminution de la maniabilité) ou à l'état durci (baisse de résistance mécanique). Généralement, toutes les études montrent une diminution de la résistance mécanique des matériaux cimentaires lorsque du sable recyclé est incorporé dans le mélange. Cela est attribué aux mauvaises caractéristiques intrinsèques (résistance du grain, forte capacité d'absorption, structure poreuse) [9].

Dans cette partie, nous allons faire un focus sur les paramètres influençant la résistance à la compression.

2.5.1.2.1 Taux de substitution en sable recyclé

Il est bien connu que la résistance à la compression d'un matériau cimentaire diminue avec l'augmentation du taux de substitution massique en sable recyclé [96]. En revanche, cette chute de performance n'est pas significative pour un taux de remplacement massique inférieur à 30% [21 et 50]. Avec un taux de 30% de RS, les travaux de Zega and Di Maio (2011) [50] ont montré une diminution de 5% par rapport au béton de référence. D'autre part, l'étude de Khatib, (2005) [97] établit qu'un remplacement de 100% en masse de sable naturel par du RS provoque une chute de résistance de 30%.

2.5.1.2.2 Etat hydrique de sable recyclé

Il semble que l'état de saturation du sable recyclé joue un rôle important sur la résistance à la compression des matériaux cimentaires. Zhao et al. (2015) [23], ont montré que, quel que soit le rapport E/C, les mortiers avec le sable sec présentent toujours des résistances équivalentes ou supérieures à celles obtenues pour les mortiers avec du sable saturé.

Par la suite, des investigations complémentaires ont été menées sur l'auréole de transition (ITZ) de ces mortiers, déterminées par observation MEB (Figure 2.9). Les prises de vue établissent que l'épaisseur de l'ITZ dans le cas du RS saturé est plus importante (80 µm) que celle dans le cas du sable sec (10 µm). Dans le cas du RS saturé, les auteurs expliquent cette tendance par un mouvement de l'eau allant des particules saturées vers la matrice cimentaire augmentant ainsi le rapport E/C localement. Dans ce cas, la conséquence directe de cet excès d'eau local est un élargissement de l'ITZ autour du grain recyclé. Dans le cas du RS sec, le sable peut absorber l'eau et ainsi réduire le rapport E/C localement rétrécissant ainsi l'épaisseur de l'ITZ.

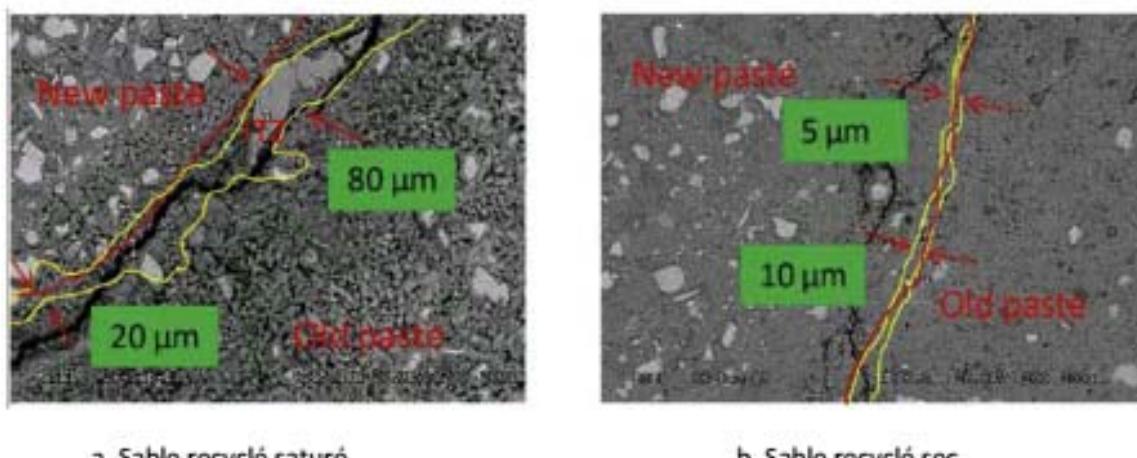
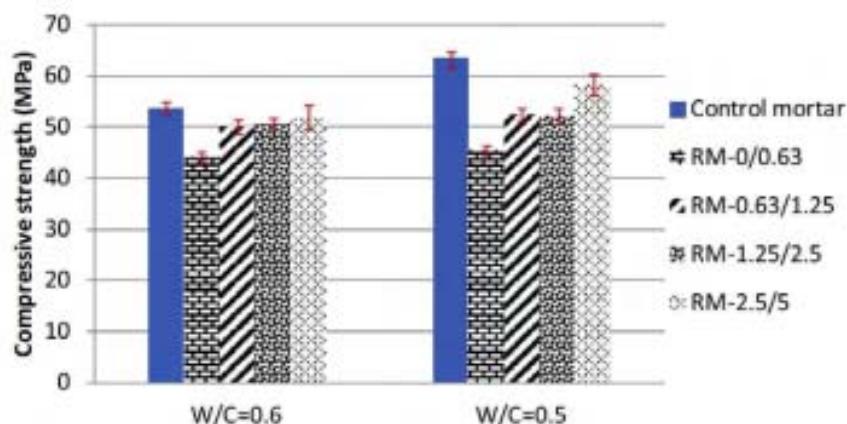


Figure 2.9 Observations de l'ITZ des mortiers à base de sable recyclé [23]

Les mêmes résultats ont été trouvés par Ji et al. [98], l'état saturé à surface sèche (SSS) du RS confère au béton une résistance plus élevée que celui avec un sable sec.

2.5.1.2.3 Teneur en fine recyclée

L'influence des fines sur la résistance de mortiers a été étudiée Zhao et al. (2015) [23] par la substitution de différentes fractions de sable naturel par celles du sable recyclé, figure 2.10.



RM - X : Mortier recyclé où la coupure X (mm) de sable naturel est remplacé par celle de sable recyclé

Figure 2.10 Résistance de mortier incorporant différentes coupures de sable recyclé [23]

Ils ont montré que la résistance la plus faible est celle du mortier dans lequel la partie très fine ($< 0,63 \text{ mm}$) a été remplacée. Cette baisse de résistance est due à de mauvaises caractéristiques : une teneur en mortier plus importante, un coefficient d'absorption d'eau plus élevé et de mauvaises propriétés mécaniques des particules fines.

2.5.1.2.4 Influence de la quantité de liant sur la résistance

Une augmentation du dosage en ciment du béton aura pour conséquence de diminuer le rapport E/C de ce béton, ce qui se traduira nécessairement par une augmentation de la résistance surtout à court terme. La résistance du béton est reliée au type et la classe de ciment, tandis que la forte teneur en ciment des bétons affecte la résistance de tous les bétons de résistances moyennes ou très élevées ($> 35 \text{ MPa}$) [99].

Pour atteindre la même résistance à la compression du béton conventionnel, il est nécessaire d'augmenter le dosage en ciment dans le béton à base de gros granulats recyclés de 5 à 9 % et de 15 à 20 % dans le béton à base de sable recyclé [62].

2.5.1.2.5 Influence des granulats sur le rapport E/C

Il est connu que les bétons conçus avec des granulats concassés génèrent une surface spécifique plus développée et demandent plus d'eau que les granulats roulés ce qui affecte la résistance. Pour des rapports E/C $< 0,4$, la résistance à la compression est majorée de 38%, lorsque le béton est fabriqué avec des granulats concassés que ceux roulés et pour des rapports E/C = 0,65 la résistance ne varie pas [57].

La rétention d'eau par les granulats recyclés, conduit à réaliser les bétons recyclés avec des rapports E/C supérieurs à ceux des bétons classiques [67]. Tavakoli & Soroushian, (1996) [100] ont démontré qu'un béton composé de 100 % de granulats recyclés avec un rapport E/C plus faible que celui d'un béton conventionnel, donne une résistance à la compression plus élevée que celle relevée avec celui-ci. Tandis que pour un rapport E/C égale, la résistance à la compression du

béton avec 100 % de granulats recyclés est faible que celle du béton conventionnel, figure 2.11 [101].

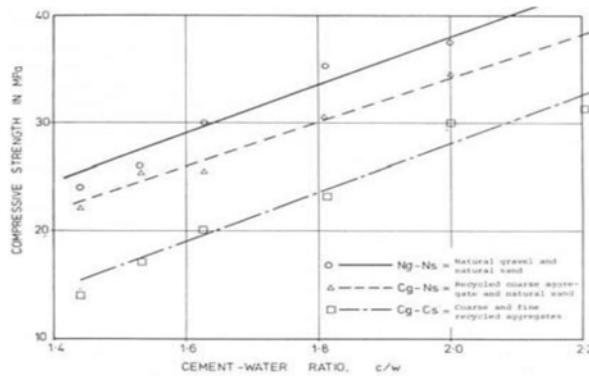


Figure 2.11 Relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression [57].

2.5.2 Résistance à la traction par flexion

Les études réalisées concernant la résistance à la flexion des bétons recyclés présentent des résultats légèrement différents les uns des autres. Si toutes indiquent que la résistance à la flexion de bétons recyclés diminuait légèrement par rapport à ceux du béton conventionnel et qu'il n'y avait pas de différence significative même avec 100% de granulats recyclés [102]. Ceci est dû à la performance de liaison réduite de la zone de transition interfaciale à l'interface du RMC et du nouveau mortier [103]. Certaines études antérieures ont obtenu une réduction de 15 à 20% à un taux de remplacement de 100% [68] et d'autres une perte jusqu'à 10% [104]. D'une part, il a été constaté que l'utilisation de diverses additions, telles que la fumée de silice, permet d'améliorer les performances du béton recyclé. De la même manière que pour la résistance à la compression, il a été constaté qu'à long terme, le gain de performance en traction d'un béton recyclé est clairement meilleur que celui d'un béton naturel [89]. Etxeberria et al. (2007) [75] ont trouvé que la résistance à la traction du béton de granulats recyclés peut être plus élevée que celle du béton ordinaire pour des taux de remplacement qui ne dépasse pas les 25%. Il semble aussi que l'état de surface des granulats a un rôle important sur la résistance à la traction et que la rugosité des granulats recyclés est très importante ce qui a amélioré l'adhérence pâte granulat.

2.5.3 Résistance à la traction par fendage

Il semble généralement admis que la résistance à la traction, comme plusieurs autres propriétés du béton, est associée au remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé dans le béton. La résistance à la traction du béton diminue lorsque le taux de remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé augmente [105 et 106]. Yang et al. (2008) [107] a aussi trouvé qu'en variant le taux de remplacement du granulat naturel, la résistance à la traction diminue et la porosité augmente. Dans cette étude, l'impact du remplacement de deux granulats recyclés à porosité différentes a été évalué. Il a été observé que la résistance à la traction était moins grande pour le béton utilisant un granulat recyclé très poreux que pour un granulat recyclé peu poreux [77]. Butler et al. (2011) [108] ont trouvé une forte relation entre la valeur de concassage des granulats et la

résistance à la traction. Quand cette valeur augmente, la résistance à la traction du béton diminue. La résistance à la traction devient plus sensible à la résistance des gros granulats ou à la valeur de concassage des granulats dans les grandes résistances à la compression du béton [A8]. En outre, plusieurs études antérieures sur le RC ont montré que l'effet de la teneur en granulats recyclés sur la résistance à la traction est plus faible que sur la résistance à la compression [76 ; 109 et 110].

Selon les deux études de Brito et al. (2010) [111] et Silva et al. (2015) [91] qui ont tenté de prédire la résistance à la traction de rupture des bétons recyclés. Ces auteurs ont également analysé la dispersion des résultats des tests pour cette propriété dans différentes campagnes. La diminution de la résistance à la traction par fendage peut atteindre 10% [112]. De plus, lorsque la formulation du béton recyclé avec des granulats conventionnels broyés, certains chercheurs ont obtenu une diminution de 5 à 15% pour un taux de remplacement de 50% et de 15 à 25% pour 100% [111]. Cependant, aucune différence significative n'a été observée lorsque des agrégats naturels arrondis sont utilisés.

Récemment, Silva et al. (2015) [113] a suggéré que la résistance à la traction est également affectée, comme la résistance à la compression, par le contenu, la taille, le type et la qualité du granulat recyclé. Ils ont conclu que l'incorporation de granulats recyclés entraîne une diminution proportionnelle de la résistance à la traction, à une vitesse qui suit la même relation que celle observée dans le béton conventionnel. Cependant, dans quelques cas, le béton recyclé présentait une résistance similaire ou même légèrement supérieure. Il est possible que la force de liaison dans l'ITZ, entre l'ancien mortier collé et la nouvelle pâte de ciment, s'améliore en raison de la nature rugueuse du gravier recyclé [114].

La figure 2.12 montre la relation entre la résistance à la traction par fendage des bétons recyclés et du béton conventionnel pour différents taux de remplacement, 50-100% (106 mélanges) et <50% (38 mélanges) [18].

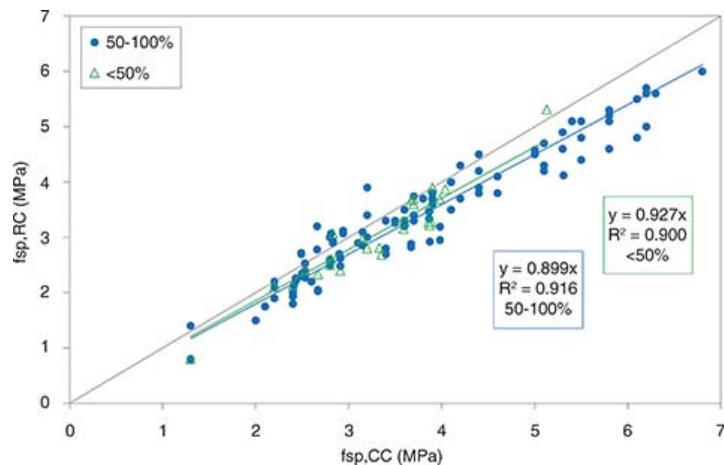


Figure 2.12 Relation entre la résistance à la compression des bétons recyclés en fonction de celle des bétons conventionnels [18]

2.5.4 Module d'élasticité

Le module d'élasticité statique (E_c) du béton est lié aux qualités des granulats et à la rigidité de la pâte de ciment. Par conséquent, les granulats recyclés présentent un module d'élasticité inférieur aux granulats naturels et le module du béton recyclé sera inférieur à celui du béton conventionnel [22 et 105]. La fragilité des nouvelles interfaces (nouveau granulat et mortier de ciment, ancien mortier de ciment et nouveau mortier de ciment) peut entraîner la présence de plus de vides capillaires et un développement progressif des fissures qui affecteront la déformabilité du béton [18].

Le module de Young est affecté par le taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés, ce résultat est attendu car les granulats de béton recyclé ont un module plus faible que les granulats naturels. La teneur en granulats recyclés a plus d'effet sur le module d'élasticité que sur la résistance à la compression en raison de sa nature poreuse, de sa faible densité et de la faible liaison entre l'ancienne ITZ et la nouvelle ITZ [18].

Le module d'élasticité d'un béton recyclé avec une résistance à la compression entre 25 et 30 MPa a été trouvé, par Rahal, K. (2007) [115], inférieur seulement de 3% par rapport à celui du béton naturel. La même observation constatée par López-Gayarre et al. (2009) [116], le module d'élasticité des bétons de granulats recyclés ne changera que légèrement pour un pourcentage des graviers recyclés ne dépasse pas les 50%. Une certaine corrélation se dégage entre les modules élastiques statiques du béton conventionnel et du béton recyclé lorsque la substitution en recyclés est partielle entre 20 et 50% et elle devient médiocre lorsque le taux de remplacement atteint 100%. Il a été constaté que le module d'élasticité du béton recyclé à 100% étant de l'ordre de 28, 35, 40, 44% et jusqu'à 45% par rapport à celui du béton de granulats naturels, comme l'ont rapporté ces auteurs [18 ; 58 ; 105 ; 117 et 118] respectivement. Cependant, pour des taux de remplacement en granulats recyclés de 20 et 50%, les valeurs moyennes du (E_c) sont de 10, 20% respectivement inférieures à celles enregistrées pour un béton conventionnel.

Cette perte de module d'élasticité semble principalement liée à la grande porosité des bétons recyclés, qui augmente avec l'augmentation du taux de substitution du RS et qui s'accentue d'avantage avec l'accroissement du rapport E/C, comme l'illustre les figures 2.13 et 2.14.

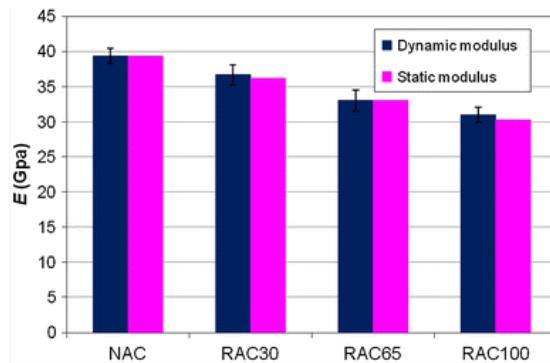


Figure 2.13 Variation des modules élastiques des bétons recyclés en fonction du taux de substitution en RG [119].

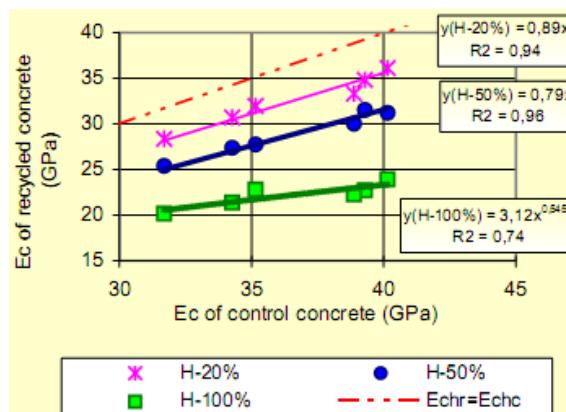


Figure 2.14 Evolution du module élastique statique en fonction du taux de substitution en recyclés et le rapport E/C [101].

2.6 Durabilité

Dans un béton recyclé comme dans un béton ordinaire, les agressions chimiques se portent principalement sur la pâte de ciment donnant ainsi les mêmes réactions chimiques avec les mêmes mécanismes d'agressions. Mais ces agressions sont d'autant plus graves que le béton est poreux et s'il contient de l'eau libre [57].

L'étude de la durabilité des bétons à base de granulats recyclés s'avère donc une étape indispensable afin de leur attribuer un domaine d'utilisation, et la porosité est la tare essentielle qui compromet la durabilité du béton. Malgré le développement continu de la résistance du béton, un certain nombre de facteurs, internes et externes, induisent la détérioration du matériau. Le concept de durabilité du béton, bien que difficile à quantifier, peut être évalué en examinant les principales propriétés d'influence du matériau. Dans le cas du béton structural, le phénomène de dégradation le plus commun est lié à la corrosion des armatures d'acier, qui est potentialisée par une faible résistance à la pénétration des ions chlorures et un taux élevé de carbonatation. Une autre caractéristique de la durabilité du béton est sa capacité à résister à plusieurs cycles de congélation et de décongélation, sans pour autant réduire considérablement ses performances initiales. D'autres propriétés définissant la durabilité incluent la résistance du béton à la désintégration de la matrice cimentaire. Néanmoins, peu d'études se sont intéressées à l'étude des indicateurs de durabilité concernant des bétons formulés avec une intégration totale des granulats recyclés, sable et graviers [25 et 26]. La détérioration d'une matrice cimentaire dépend de sa porosité, qui est liée à la quantité de surface qui est susceptible d'être attaquée par des réactions chimiques délétères.

2.6.1 Absorption d'eau

L'absorption d'eau est un paramètre important vis-à-vis de la durabilité des bétons, car un grand nombre d'agressions telles que l'attaque par les sulfates et le gel-dégel, peuvent être minimisées si l'absorption d'eau du béton est faible. Le volume des pores d'un béton, indépendamment de la

facilité avec laquelle un fluide peut le traverser, se mesure par l'absorption d'eau. Celle-ci est un phénomène physique représentatif du comportement hydrique du béton durci. C'est une propriété de transfert du matériau poreux qui caractérise son aptitude à absorber et à transporter un liquide mouillant par capillarité. Le processus d'absorption d'eau peut être qualifié par deux paramètres : l'absorption initiale, représentative de la dimension des gros capillaires, et l'absorptivité, représentative du volume des capillaires fins [120].

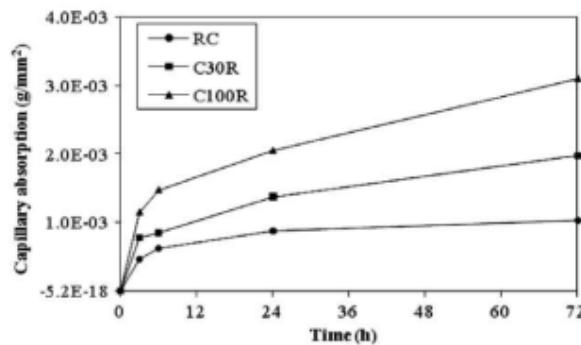
L'évaluation de l'absorption d'eau du béton a été l'une des approches les plus courantes et les plus rapides pour évaluer indirectement la porosité du RCA et donc sa durabilité potentielle. Il a été démontré par des études antérieures [70 et 121] que les bétons recyclés se caractérisent par une plus forte capacité d'absorption d'eau. Elle est presque 3 fois plus élevée que celle du béton naturel. Olorunsogo et Padayachee (2002) [121] ont constaté que l'eau absorbée par un béton à 100% de granulats recyclés était d'environ 39% plus élevée que celui du béton à base des granulats naturels après 28 jours de séchage. Wirquin et al. (2000) [120], ont rapporté dans une étude, que le processus d'absorption d'eau d'un béton recyclé est similaire à celui d'un béton conventionnel et obéit aux mêmes lois. Cela est dû à la taille plus grande des gros capillaires et à la proportion en volume plus importante des petits capillaires, ce qui les rend a priori plus vulnérables à la pénétration des agents agressifs.

Padmini et al. (2002) [122] avaient déjà étudié l'influence de l'incorporation du gravier recyclé dans des bétons de différentes classes de résistance. Cependant, les auteurs ont observé que le gravier recyclé provenant de produits à plus forte concentration a mené à la production de RCA avec des valeurs d'absorption d'eau plus élevées. Bien que cela puisse sembler contre-intuitif, cela peut s'expliquer par le fait que ces graviers recyclés présentaient une teneur en mortier adhérente plus élevée que ceux provenant de béton à faible résistance. Poon et Chan, (2007) [123] ont analysé l'effet de l'introduction de RCA avec 10%, en poids, de différents types de contaminants (briques, verre, carreaux et particules de bois) sur les propriétés du béton. La présence de ces contaminants a entraîné une augmentation des taux d'absorption d'eau de 35% à 60%, comparativement à ceux des échantillons contenant de gravier recyclé non contaminé. Cette augmentation était encore plus importante lorsque les particules de bois étaient incorporées, ce qui a entraîné une augmentation de 80% d'absorption d'eau.

De nombreuses recherches récentes ont aboutie que l'absorption d'eau importante des bétons recyclés dépendait de plusieurs facteurs : principalement, la présence du RMC résiduel entourant la particule du granulat recyclé, la présence de fissures en surface des mêmes particules (conséquence de la phase de concassage), le rapport E/C élevé et taux d'incorporation de granulats recyclés.

Evangelista and de Brito (2010) [49] ont effectué des essais d'absorption d'eau par immersion totale et par remontée capillaire sur des bétons incorporant 30% et 100% en masse de sables recyclés (Figure 2.15). Par rapport au matériau de référence, les résultats d'immersion montrent une augmentation de 16,8% et de 46% respectivement pour les bétons avec 30% et 100% de RS. Pour le test de remontée capillaire, l'absorptivité augmente d'une manière encore plus significative (+70,3% avec 100% de RS). Les mêmes résultats obtenus par Zega et Di Maio, (2011) [50], ils

obtiennent une augmentation de 15% de cette propriété avec 30% de RS. Pour ces chercheurs, la cause de cette variation est due à une porosité initiale importante du sable recyclé qui a tendance à favoriser l'absorption d'eau du nouveau matériau. Thomas et al. (2013) [19] ont trouvé que pour un rapport E/C de 0,65 le coefficient d'absorption d'eau augmente de 6,2% à 8,4% lorsque la totalité des graviers naturels est remplacée par des graviers recyclés.



RC : béton de référence ; C30R et C100R : béton incorporant de 30% ou 100% en masse de sable recyclé

Figure 2.15 Absorption d'eau par capillarité [49]

2.6.2 Propriétés de transfert (Perméabilité et Porosité)

Pour la bonne conservation (durabilité) du béton, il est nécessaire d'avoir des exigences de perméabilité, à l'eau, à l'air ou à certains gaz et de résistance à la diffusion d'ions. Même si les mécanismes et les lois qui les régissent sont différents, les moyens d'action limitant ces effets sont les mêmes : limiter le volume occupé par l'eau et la connectivité du réseau capillaire.

La perméabilité du béton se singularise par la perméabilité de la pâte de ciment et la perméabilité des granulats. Si la perméabilité de la pâte de ciment hydraté est liée à la nature du réseau poreux à l'intérieur même de la pâte de ciment, mais aussi de la zone voisine de l'interface entre la pâte de ciment et les granulats. Tandis que celle des granulats naturels se distingue par la nature des pores qui sont habituellement non interconnectés en plus lorsque les granulats sont enrobés par la pâte de ciment, ceux-ci ne participent presque pas à la perméabilité du béton [57]. En revanche, la perméabilité du béton diminue de façon très significative avec la diminution du rapport E/C.

On ne peut parler de perméabilité sans évoquer la porosité dont le volume seul n'influe pas de manière significative sur la perméabilité. Celle-ci est en fonction de la dimension, de la distribution, de la forme, de la sinuosité et la continuité des pores. Etant donné que cette relation perméabilité-porosité est très étroite (figure 2.16), elle constitue un paramètre déterminant de la durabilité du béton.

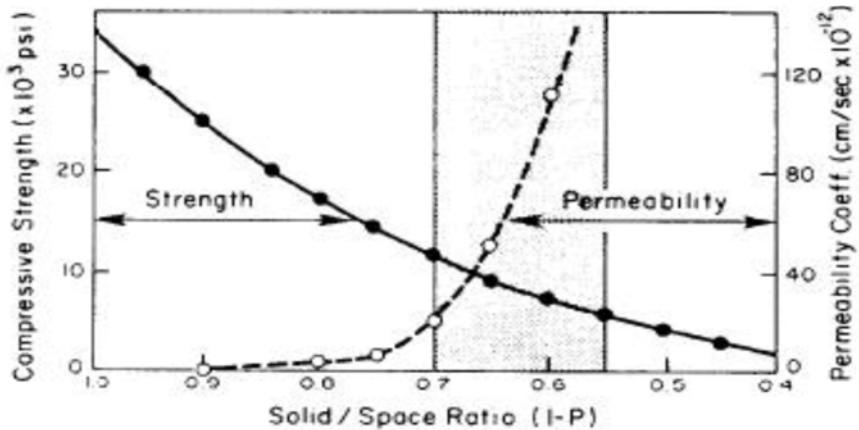


Figure 2.16 Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton [57].

Il a été largement prouvé que les bétons fabriqués à partir de granulats recyclés sont nettement plus perméables que les bétons classiques, cela dit, il faut tout de même noter que cette perméabilité peut facilement être réduite en utilisant des fines (cendres volantes, fillers, fumée de silice, etc...) [15].

La structure des bétons recyclés est globalement plus poreuse qu'un béton naturel, et cela est d'autant plus vrai que le taux de RCA est important [21 ; 67 et 89] avec une diminution de la densité totale du matériau de l'ordre de 5 à 10% et porosité vont de 14% à 20,1% pour une substitution à 100% des gravillons naturels par des granulats recyclés [15]. Les études sur le sujet montrent un consensus dans la mesure où, pour un mélange donné, le béton contenant des quantités croissantes de RCA présentera une porosité supérieure à celle des échantillons NAC correspondants [32, 94, 124 - 126]. Ce phénomène est naturel compte tenu de l'augmentation notable de l'absorption d'eau du RCA lui-même du fait du mortier adhérent poreux, qui est le principal facteur influençant la perméabilité globale du nouveau béton qui le contient. L'ampleur de cette augmentation est principalement affectée par la teneur en RMC existant dans la RCA et, dans une certaine mesure, par la résistance du béton parent [18]. Dans l'étude de Cassagnabère et al. (2012) [96], des essais de porosité à l'eau ont été réalisés sur des mortiers normalisés dont le sable naturel est remplacé par différents taux de sable recyclé. Les auteurs ont trouvé une évolution non significative de porosité pour un taux de substitution inférieur ou égal à 10%.

Nagataki et al. (2004) [127] ont étudié l'effet de l'utilisation de RCA provenant de différents sources et qui ont été soumis à un nombre variable d'étapes de traitement. Les RCA soumis à des étapes de concassage plus poussées présentaient des teneurs en RMC plus faibles (entre 30,2% et 32,3%), alors que les RCA soumis à un concassage plus basique présentaient des teneurs plus élevées (entre 52,3% et 55,0%). Les premiers granulats ont des niveaux de porosité plus faibles que le type dernier des RCA. En outre, les spécimens fabriqués avec le premier RCA, qui provenaient de bétons avec des rapports E/C allant de 0,63 à 0,35, présentaient des niveaux de porosité décroissants à mesure que la résistance du béton parent augmentait. Cela peut s'expliquer par la microstructure cimentaire plus dense du béton à plus haute résistance, qui est susceptible d'entraîner des granulats avec une porosité plus faible. Des résultats similaires ont été récemment

rapportés dans l'étude de Pedro et al. (2017) [126] dans lesquels les RCA ont été obtenus à partir de bétons ayant des résistances différentes et soumis à un nombre différent d'étapes de concassage. Des valeurs d'absorption d'eau plus faibles ont été observées dans des échantillons contenant du RCA provenant de béton à résistance plus élevée et soumis à des étapes de concassage plus poussées.

En plus de la teneur en RMC et de la résistance caractéristique du béton source, la forme, la teneur en humidité et le niveau de contamination des granulats recyclés peuvent également influencer la perméabilité du béton [18]. En effet, Matias et al. (2013 et 2014) [128 et 129] ont montré, dans leurs études, que l'utilisation de RCA allongé conduit à une augmentation d'environ 19% par rapport au béton de contrôle, tandis que les spécimens à RCA arrondis présentent une augmentation de 12%.

Indépendamment du taux de substitution ; l'état hydrique de RCA au moment de leur incorporation dans le mélange a également une influence considérable sur la porosité globale du RAC. Tam et al. (2005) [130] ont trouvé que l'absorption initiale de l'eau de gâchage par les RCA, provoque une diminution du rapport E_{eff}/C du mélange, conduisant ainsi à une matrice présentant une perméabilité inférieure. Des résultats similaires trouvés par Ferreira et al. (2011) [32], la porosité des bétons dont l'ajout de l'eau supplémentaire au moment du malaxage est plus faible que celle des bétons contenant des RCA pré-saturés.

Un autre facteur qui influence la porosité de RAC est le temps pris pour la formation d'autres produits d'hydratation. Cependant il a été observé une diminution de porosité significative une fois que le béton a mûri quelques temps. En effet, Gomez-Soberon (2002) [89] a montré que le taux de remplacement des granulats est directement corrélé au volume de pores total et à leurs tailles, mais que si cette influence est tout à fait vérifiée au jeune âge du béton, elle s'atténue à mesure que le béton vieillit. Ceci semble dû à la cristallisation de nouveaux produits qui réduisent à la fois le nombre et la taille des pores. Kou et al. (2011) [46] a évalué la distribution de la taille des pores du NAC et du RAC après 28 jours, 1 an et 5 ans. Au bout de 28 jours, la distribution cumulative des pores indiquait une plus grande porosité par le RAC réalisé avec 100% de gravier recyclé par rapport au béton de référence correspondant. Cependant, après 5 ans d'exposition au durcissement à l'eau, la porosité des échantillons de RAC a été réduite de 45% entre l'âge de 28 jours et 5 ans.

2.6.3 Retrait libre total et endogène

Le retrait est une déformation indissociable du comportement du béton. Il se produit dans tous les types de béton, en fonction de divers paramètres, principalement liés aux conditions de durcissement et aux proportions de mélange. Ce phénomène est dû au mouvement de l'eau à l'intérieur du béton pendant toute sa durée de vie. Cependant, le retrait évolue de façon non linéaire avec le temps et il augmente de façon plus significative au début (jusqu'à un an environ) et tend à se stabiliser dans le temps. Cette déformation doit donc, en toute circonstance, être prise en compte. Le retrait est divisé en plusieurs types selon divers paramètres. On distingue le retrait plastique, le retrait endogène et le retrait séchage [18]. Ce dernier type dépend largement de la quantité de ciment, rapport E/C et des propriétés des granulats. Il est largement connu qu'une

I.2 Influence des granulats recyclés sur les propriétés des matériaux cimentaires

teneur plus élevée en ciment conduit à un rétrécissement plus important. Cependant, l'utilisation des granulats avec une rigidité importante contribue à réduire le retrait de séchage.

Dans le cas des bétons recyclés, les problèmes de retrait sont encore plus à craindre, compte tenu de la demande en eau supplémentaire pendant la fabrication. Plusieurs recherches ont étudié le retrait à long terme des matériaux cimentaires à base de granulats recyclés. Les résultats trouvés concluent que les bétons recyclés tendent à avoir des déformations de retrait plus importantes. Cette tendance augmente avec la proportion de granulats recyclés. Selon l'étude de Kenai & Debieb (2011) [12], les bétons à base de gravier recyclé présentent une augmentation du retrait de 30% par rapport à celui des bétons conventionnels à 28 jours ; au-delà, il s'accélère pour arriver à une augmentation de 70% à 90 jours. Lors de la substitution des granulats fins, le retrait est d'environ 25% plus grand dès le jeune âge (à 2 jours) et peut atteindre 40% d'augmentation à 90 jours. Pour ce qui est du béton à bases de gros et fins granulats recyclés, le retrait est plus grand que celui du béton témoin et augmente de 20% à l'âge de 7 jours ; au-delà, il finit par atteindre une augmentation de 85% à l'âge de 90 jours [12]. L'augmentation du retrait est proportionnelle aux taux de substitution des granulats naturels par ceux recyclés [15]. Cependant, certaines recherches ont révélé que le retrait des bétons recyclés de faibles taux de remplacement (20-30%), présentent des valeurs légèrement supérieures à celles obtenues dans le béton conventionnel (incrément de 3-8%) [131 - 133]. Lorsque le remplacement atteint 50%, les déformations de retrait dans le RC sont de 13 à 33% plus élevées que celles enregistrées dans les bétons classiques. En général, le retrait augmente à mesure que le taux de remplacement augmente [69 ; 131 ; 133 et 134]. Bien que d'autres auteurs concluent que le rétrécissement augmente jusqu'à 35-80% dans le béton contenant 100% de granulats recyclés [18 ; 131 et 133]. Quelques-uns ont indiqué que même avec un taux de 100% de remplacement, le béton recyclé peut présenter des déformations de retrait similaires à celles obtenues dans le béton conventionnel, lorsqu'on utilise des granulats recyclés de haute qualité ou différentes méthodes de mélange [69 ; 132 et 135]. Le retrait du béton recyclé dépend non seulement du taux d'incorporation des granulats recyclés, mais aussi de leurs propriétés. La déformation de retrait est directement liée à la qualité des granulats du béton. Le RMC produit une ITZ plus faible résultant en un retrait moins restreint en granulats [37 et 135], et par conséquent des déformations plus élevées du béton.

Kou et al. (2012) [132] a analysé l'effet de l'utilisation des granulats recyclés avec différents coefficients d'absorption d'eau et de composition. Leurs résultats ont révélé que le béton fabriqué avec 100% de granulats recyclés de qualité inférieure présentait une augmentation de 59% du rétrécissement, tandis que ces différences diminuaient jusqu'à 35% avec les granulats recyclés de haute qualité. Comme mentionné précédemment, l'absorption d'eau des granulats recyclés et leur composition (quantité de vieux mortier, briques d'argile ou autres impuretés) sont les principales caractéristiques qui définissent la qualité des granulats recyclés et par conséquent leur impact sur les propriétés du béton [16 et 133].

Un autre paramètre important influençant le retrait des bétons recyclés est l'effet de la saturation initiale des granulats recyclés, suite à la forte absorption de ces granulats recyclés [52 ; 106 et 136]. Cependant, certains auteurs ont trouvé que l'utilisation des RCA, surtout dans des conditions saturées, entraînait une évolution du retrait du béton différente au fil du temps,

entraînant des déformations plus faibles au début de l'âge qui augmentent après cette période de durcissement interne [69 ; 92 ; 94 ; 133 et 137]. Par conséquent, RC montrent généralement un développement différent, en particulier au début des âges, par rapport à celui du béton conventionnel.

González-Fonteboa et al. (2018) [18] ont collecté des données, de différents auteurs [69 ; 92 ; 131 - 134], figure 2.17. Leur but est d'analyser la relation entre le retrait du béton de référence et celui des bétons recyclés en tenant compte de différents taux de gravier recyclé, de 20% à 100%. Cette figure confirme que le taux des granulats recyclés influence le gain de retrait.

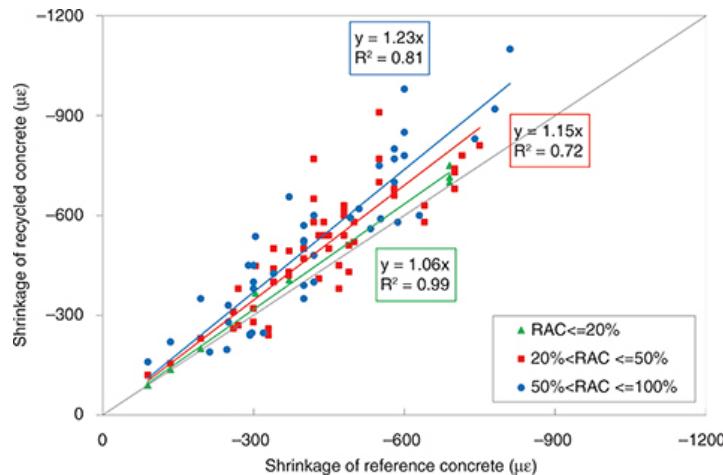


Figure 2.17 Retrait des RAC par rapport béton de référence [18]

2.6.4 Diffusion de chlorures

Le mécanisme de diffusion des ions chlorures dépend principalement de la porosité de la matrice cimentaire. Pour cette raison, les découvertes de la littérature ont révélé que le coefficient de diffusion des ions chlorure augmente avec l'incorporation croissante de gravier recyclé [94 ; 125 ; 126 ; 138 – 140] reporté par [18]. Et beaucoup plus avec l'augmentation du taux de remplacement en sable recyclé [49]. Cependant, l'étude de Kou et Poon (2010) [141] a révélé que la pénétration des ions chlorure diminue nettement dans le temps lorsque 100% en volume de gravillons recyclés sont utilisés.

Pour un béton contenant 100% de RS, le coefficient de migration de Cl⁻ croît de 34% par rapport au béton de référence. Au contraire, les recherches de Kou et Poon [72 et 142] montrent une pénétration ionique des chlorures plus difficile avec un taux croissant de RS. Ils attribuent ce phénomène à l'effet filler engendré par les grains fins présents dans le RS.

Plusieurs études ont évalué l'influence de l'incorporation des différents ajouts minéraux et pouzzolaniques (cendres volantes, fumées de silice et laitier de haut fourneau granulé broyé) comme remplacement partiel du ciment. Moon et al. (2002) [143] ont rapporté que le remplacement de 10% du ciment par du métakaolin ou de la fumée de silice conduisait à des diminutions d'environ 55% de la charge totale passée par rapport aux mélanges correspondants avec 100% de gravier recyclé et sans additions. Dans d'autres études [62 et 144], il a été rapporté que l'utilisation de laitier

de haut fourneau granulé moulu, utilisé comme remplacement partiel du ciment, à des rapports entre 30% et 65%, conduisait à des diminutions de la charge totale passée d'environ 50%. Kou et al. (2011) [79] ont observé également qu'une diminution importante des ions de chlorure jusqu'à 31% après remplacement de 55% du ciment par des fumées de silice, métakaolin, cendres volantes et laitier de haut fourneau granulé moulu. L'étude récente de Kou et Poon (2013) [145] sur l'influence du taux de gravier recyclé et les cendres volantes sur la durabilité de bétons. Ils ont montré, qu'après 10 ans d'exposition à l'environnement extérieur, l'augmentation de la teneur en gravier recyclé diminue la résistance à la pénétration des ions chlorure dans le béton à tous les âges d'essai. Ils ont abouti que, quel que soit le niveau de remplacement, la résistance à la pénétration des ions chlorures tend à devenir similaire au cours du temps à mesure que des produits d'hydratation croissants se forment.

Le processus de durcissement joue également un rôle considérable sur la résistance à la pénétration des ions chlorures dans le béton. Kou et al. (2004) [146] et Poon et al. (2006) [147] ont déclaré qu'au bout de 28 et 90 jours, les échantillons durcis à la vapeur présentaient des diminutions du coefficient de diffusion apparent d'environ 20% et 30%, respectivement, comparativement aux échantillons correspondants soumis à un durcissement standard. Ils ont constaté aussi que la résistance à la pénétration des ions chlorures a encore augmenté de double combinant le régime de durcissement à la vapeur avec l'utilisation de 35% de cendres volantes comme remplacement partiel du ciment. De même, Amorin et al. (2012) [125] dans leur étude, béton fabriqué de gravier recyclé de béton : Influence des conditions du durcissement sur les propriétés de durabilité de bétons ; ils ont rapporté, qu'après une période de 91 jours, le coefficient de diffusion de chlorures des échantillons contenant 100% du gravier recyclé est de 35% et 23% pour un environnement relativement sec et humide, respectivement.

2.6.5 Résistance aux gel-dégel

Un granulat ne sera pas sensible au gel s'il possède une porosité très faible ou si son système capillaire est interrompu par un nombre suffisant de macros pores (qui jouent le rôle de bulles d'air). La mesure de la gélivité peut être quantifiée par la dégradation granulométrique des granulats soumis à des cycles gel-dégel ou bien à partir de la résistance gel-dégel du béton. Le volume d'eau susceptible de geler ne doit pas excéder le volume des vides de l'air entraîné du béton. Le béton de granulats recyclés est plus exposé à de telles dégradations à cause du fort taux d'absorption d'eau par ces granulats.

Plusieurs travaux ont été entrepris relativement à l'utilisation de granulats recyclés disponibles sur le marché ou fabriqués à partir de bétons de laboratoire, avec ou sans un bon réseau d'air [13 ; 148 - 150]. Ils ont indiqué que le comportement au gel des bétons élaborés uniquement à partir de granulats recyclés est assez médiocre. Certains désaccords ont été observés concernant l'effet de l'utilisation de granulats recyclés sur la résistance du béton au gel-dégel ; certains ont suggéré une diminution de la résistance du RAC après quelques cycles de gel-dégel [148], tandis que d'autres ont signalé une différence négligeable par rapport au NAC [13]. Ces désaccords peuvent être principalement expliqués par la qualité de granulats recyclés, qui est souvent subjective selon la propriété étudiée. Dans le cas de la résistance du béton au gel et à la décongélation, les défauts

probables dans la performance du RCA peuvent être attribués à la structure des pores de la microstructure cimentaire du béton source. Il en résulte que les faibles performances au gel du RCA provenaient des bétons parents ayant déjà un mauvais réseau d'air ou comportés déjà des fissurations occasionnées lors de la fabrication (en concassage) [149].

L'utilisation de RCA grossier présentant une certaine porosité due à l'utilisation d'adjuvants entraîneurs d'air dans le béton source est susceptible d'aboutir à un RCA avec une résistance considérable. Gokce et al. (2004) [149] ont étudié l'utilisation de différents graviers recyclés avec des teneurs variables en RMC (plusieurs étapes de concassage) et provenaient de produits en béton entraînés par l'air et non entraînés par l'air. Ils ont observé une diminution de moins de 10% du module d'élasticité dynamique des échantillons contenant 100% de RCA provenant d'un béton entraîné par de l'air. Même avec l'utilisation de RCA non entraîné par l'air avec une teneur plus faible en RMC semble avoir ralenti le déclin du module d'élasticité dynamique.

Zaharieva et al. (2004) [150] ont observé que, quelle que soit la méthode de production adoptée, dans laquelle le rapport E/C total et effectif variait, le béton recyclé présentait une diminution beaucoup plus rapide de ses propriétés par rapport à un béton conventionnel. La principale raison de cette baisse s'explique par le rapport E/C total élevé, qui induit une plus grande porosité et un comportement mécanique moins bon du RAC, mis à part la faible résistance inhérente au gel et au dégel du RCA lui-même. Des résultats similaires ont été observés dans l'étude de Salem et al. (2003) [148], où la résistance réduite au gel et au dégel était due à l'eau supplémentaire existant dans les RCA en raison de la saturation. Cependant, les auteurs ont observé que ce n'était pas le cas lorsque des adjuvants entraîneurs d'air étaient ajoutés. Le RAC avec 5% d'air entraîné présentait une perte de performance marginale après 324 cycles de congélation et de décongélation, étant comparable à celle du NAC correspondant.

Moon et al. (2002) [143] ont évalué l'influence de l'âge du béton sur la résistance au gel-dégel. Ils ont produit du RAC en utilisant quatre RCA qui avaient été soumis à différentes étapes de traitement, ce qui a donné des matériaux ayant un contenu de mortier collé variable. Les auteurs ont observé que l'utilisation de RCA avec une teneur en mortier adhérente plus élevée donnait des spécimens RAC montrant une diminution plus rapide du module d'élasticité dynamique relatif avec le nombre de cycles de congélation et de décongélation qui s'ensuivait.

Des essais ont été menés dans le but d'améliorer la durabilité au gel des bétons de granulats recyclés par une reconfiguration de la composition, ou par des inclusions d'agents antigel. D'après la littérature, la méthode de l'air entraîné est la meilleure façon d'améliorer la résistance au gel des granulats recyclés, cependant, cette méthode affecte quelques propriétés physiques des bétons. Mais l'emploi des bétons à base de sable naturel et de gravillon recyclé dans des conditions de gel modéré peut être envisagé [151].

2.6.6 Attaque au sulfate

L'expansion par attaque au sulfate, qui est l'une des attaques chimiques les plus délétères connues dans le béton, peut résulter de sources externes ou internes de sulfate. Le premier est plus commun et se produit chaque fois que le béton est soumis à un environnement contenant du sulfate

(par exemple, des eaux usées industrielles). L'attaque interne au sulfate se produit lorsqu'une source de sulfate est incorporée dans le mélange de béton, qui peut provenir des granulats riches en sulfate, d'un excès de gypse dans le ciment ou d'une contamination. Cette dernière prend une importance considérable compte tenu de la contamination potentiellement élevée à base de gypse de certains débris lors d'opérations de construction et de démolition inadéquates. Il a été observé que les RAC contenant de telles RCA sont susceptibles de présenter une perte de performance due à une expansion excessive [152].

Gokce et al. (2004) [149] ont étudié la solidité des graviers recyclés provenant des bétons ayant différentes résistances à la compression et soumis à des étapes de traitement variables, exposés à une solution de sulfate de sodium. La perte de masse des RCA était principalement régie par la teneur en mortier collé (c.-à-d. le nombre inférieur d'étapes de traitement). L'RCA avec une teneur en mortier adhérente plus élevée présentait plus de perte de masse. La résistance des granulats aux attaques de sulfate a également été influencée par la résistance du béton source ; les RCA de plus forte résistance à la compression ont présenté moins de perte de masse due à l'attaque de sulfate.

Lee et al. [153] ont étudié l'expansion de bétons contenant une quantité croissante de RCA présentant différentes valeurs d'absorption d'eau, soumis à une solution de sulfate de sodium à 5%. L'utilisation de RCA avec une absorption d'eau plus faible a donné des spécimens avec une résistance améliorée par rapport à l'utilisation de RCA plus poreux. Après 360 jours d'exposition, les échantillons fabriqués avec RCA avec une absorption d'eau de 6,6% à des taux de remplacement de 0%, 25%, 50%, 75% et 100% ont montré des expansions d'environ 0,45%, 0,10%, 0,25%, 0,37% et 0,55%, respectivement, de la taille des échantillons originaux. Cependant, des échantillons contenant du RCA, avec une absorption d'eau de 10,4%, à des niveaux de remplacement de 0%, 25%, 50%, 75% ont montré des expansions d'environ 0,45%, 0,29%, 0,29%, 0,52% et 0,55%, respectivement, où l'échantillon à 100% a commencé à se désintégrer après 270 jours. Des constatations similaires ont été observées par certains des mêmes auteurs [154] après avoir exposé les échantillons à des solutions de sulfate de sodium et de magnésium pendant 15 mois.

2.7 Conclusions

L'objectif de cette synthèse bibliographique était de donner un état d'avancement des travaux et des connaissances acquises sur les caractéristiques des granulats RCA (graviers et sables) issus de bétons recyclés (RC) et leur influence sur les comportements de matériaux cimentaires (mortiers et bétons) aux états frais et durci. L'étude bibliographique porte sur deux sujets complémentaires mais distincts : les bétons recyclés d'une part et le mortier recyclé d'autre part, pour conclure sur la problématique des matériaux cimentaires confectionnés avec du sable recyclé. A la lumière des différentes publications étudiées, plusieurs conclusions se dessinent :

Les granulats recyclés (RCA) diffèrent principalement des granulats naturels (NA) par leurs compositions. En effet, ils sont composés de deux parties : le noyau de granulat naturel initial et le mortier cimentaire résiduel attaché. Le RMC est le paramètre clé qui contrôle la qualité du RAC, sa qualité et sa quantité sont généralement liées aux caractéristiques du béton source de ces granulats et le mode concassage. Cette gangue de mortier (RMC) est connue pour présenter une forte

porosité. Ce point faible est la raison principale qui confère aux RCA des caractéristiques intrinsèques plus mauvaises que celles des NA. Sur le plan des caractéristiques physiques, un taux important de fines, une densité plus faible de 8% à 17%, une capacité d'absorption d'eau plus élevée de trois fois. S'agissant des caractéristiques mécaniques, une résistance à l'abrasion plus faible et concernant des caractéristiques chimiques et minéralogiques, une teneur significative en chlorures et/ou en gypse.

L'incorporation de granulats recyclés dans de nouvelles matrices cimentaires (mortiers et bétons) peut engendrer des altérations des propriétés d'usage (ouvritabilité, résistance et durabilité). L'utilisation partielle ou totale de granulats recyclés, principalement les sables, influence grandement et négativement les propriétés physiques et mécaniques des mortiers et des bétons, à court et à long terme. On observe en effet que le taux de RCA est le paramètre primordial et le pourcentage de substitution massique des NA par RCA inférieur à l'optimum de 30% à 40% n'est pas préjudiciable. Plusieurs facteurs intervenants dans cette dégradation tel que la présence des contaminants au sein des RCA, leur porosité et l'état sec au moment du malaxage et sa procédure, le rapport E/C élevé, le pourcentage important des fines et fillers et la méthode de cure. L'état hydrique initial des RCA joue également un rôle prépondérant dont il est prouvé bien lucratif, le pré-mouillage du RS et la pré-saturation à 80% du RG améliorent le comportement rhéologique et augmentent les performances mécaniques.

Cependant, les multitudes recherches sur des matériaux cimentaires recyclés sont diversifiées mais les conclusions semblent encore contradictoires. La différence notable est enregistrée pour l'utilisation de différentes fractions de RCA, les propriétés des matériaux cimentaires sont moins influencées par la présence du gravier recyclé que par le RS. Ce dernier contenant plus d'impuretés et des taux élevé de RMC (selon les méthodes de préparation et le mode de concassage des RCA), ce qui à ramener à une forte capacité d'absorption d'eau. C'est pour cette raison, le béton recyclé est largement étudiée, comparativement au mortier recyclé, toutefois la majorité des études de béton recyclé est limitée à l'utilisation du gravier recyclé sans prise en considération du sable recyclé soit seul ou combiné avec le gravier. Concernant, l'emploi du sable recyclé pour la formulation des bétons de structure, les études sont encore peu nombreuses, et les résultats parfois dispersés. Il n'est pas recommandé voir purement interdit pour certaines applications (préfabrication). Toutefois, lors de la phase de concassage des déchets de démolition, la quantité en masse de sable peut atteindre une valeur de 50% de la quantité totale de granulat recyclé résultant, d'où l'existence d'études traitant des possibles voies de valorisation l'utilisation de sable recyclé.

Suite à cet état de l'art et pour mieux connaître le comportement des matériaux cimentaires incluant des granulats recyclés, la deuxième partie de cette thèse est consacré à la caractérisation des matériaux utilisés, aux dispositifs d'essais et des techniques expérimentales concernant la formulation et à l'étude des mortiers de maçonnerie et des bétons ordinaires.

Dans le passé la technologie a été un bienfait pour l'homme,
maintenant elle devient un danger. Même en tant de paix
elle commence à détruire la terre.

Edward Bond

Deuxième Partie

Matériaux, dispositifs et description des techniques expérimentales

Chapitre 3

Caractérisation expérimentale des matériaux employés

3.1 Introduction

Cette deuxième partie expose la démarche de caractérisation des matériaux utilisés en particulier les granulats recyclés sous leurs deux formes : sable et gravier. Elle décrit les méthodologies expérimentales d'étude des matériaux cimentaires (mortier et béton) afin de déterminer leurs propriétés physico-chimiques, d'évaluer leurs comportements rhéologiques, leurs performances mécaniques, ainsi que l'étude de leur durabilité.

3.2 Matériaux utilisés

3.2.1 Ciment

Dans cette étude, le liant hydraulique utilisé est un ciment Portland artificiel CEM I 52,5 N, d'une densité relative de 3,15 et une surface de Blaine égale à $4320 \text{ cm}^2/\text{g}$. Produit par la cimenterie de LAFARGE du Teil (France) conforme à la norme NF EN 197-1 : 2012. Sa fiche technique est donnée en Annexe 1.

3.2.2 Granulats

Deux natures de granulats ont été utilisées, des granulats naturels (alluvionnaire et concassés) et des granulats recyclés (fabriqués au niveau du laboratoire et concassés par avec un concasseur à mâchoire). Ils sont divisés en trois fraction, une coupure ($0/3,15 \text{ mm}$) pour les sables et deux coupures pour les graviers ($3,15/8$ et $8/16 \text{ mm}$).

3.2.2.1 Granulats naturels (NA)

Les granulats naturels utilisés, provenant de la région de Bretagne - France, sont constitués d'un sable alluvionnaire (NSB), et deux graviers concassés (NGB1) et (NGB2), de coupures ($3,15/8$ et $8/16 \text{ mm}$) respectivement.

3.2.2.2 Granulats recyclés (RA)

Deux types de sables recyclés ont été utilisés, l'un obtenu après concassage d'un vieux béton de structure âgée de plus de 30 ans (RSG), et l'autre obtenu à la suite d'écrasement des éprouvettes de béton ordinaire de résistance moyenne de 30 MPa, âgées de moins de 06 mois(RSB).

Deux fractions de bétons recyclés concassés (RGB1) et (RGB2), de coupures (3,15/8 et 8/16 mm) respectivement. Ils sont obtenus à la suite d'un concassage dans un concasseur à mâchoire d'un vieux béton de structure âgée de plus de 30 ans.

3.3 Caractérisation des matériaux utilisés

La caractérisation des matériaux (granulats) permet d'éclairer leur choix et les destiner pour la confection d'un béton ou d'un mortier. Les essais de caractérisation des matériaux utilisés dans cette étude se résument principalement par des analyses chimiques et par détermination de leurs propriétés physiques et leurs comportements mécaniques.

3.3.1 Analyse chimique et minéralogique

3.3.1.1 Méthode du calcimètre

La détermination de la teneur en carbonate dans un matériau est basée la norme NF P 94-048 : 1996. Pour ce faire l'échantillon du matériau doit être séché, après avoir le broyé et tamisé à un tamis à 400 µm, est mise dans un flacon. Le volume de dioxyde de carbone (CO₂), dégagé lorsque l'échantillon sera en contact avec l'acide chlorhydrique (HCl), est mesuré par une burette graduée sera placée à l'ouverture fermée du flacon. Les conditions de "la prise d'essai" seront mesurées par le thermomètre et le baromètre.

3.3.1.2 Analyse microscopique

3.3.1.3 Spectrométrie de fluorescence des rayons X

La spectrométrie de fluorescence des rayons X (SFX ou FX) est une technique d'analyse chimique utilisant une propriété physique de la matière, la fluorescence de rayons X. Elle permet l'analyse de nombreux type de matériaux sous sa forme solide ou en poudre. Le spectre des rayons X (rayonnement de fluorescence X) émis par la matière est caractéristique de la composition de l'échantillon, en analysant ce spectre, on peut en déduire la composition élémentaire, c'est-à-dire les concentrations massiques en éléments. Il existe deux grands types d'appareillage pour l'analyse du spectre : les spectromètres à dispersion en longueur d'onde (WD-XRF) et les spectromètres à dispersion en énergie (ED-XRF).

Dans notre étude, on a utilisé l'analyseur XTF Thermo Scientific Niton XL3t (Figure 3.1), pour déterminer les compositions chimiques des matériaux utilisés. Il existe de nombreuses méthodes de préparations des échantillons qui sont fonctions du domaine d'application dans lequel on se trouve. La technique d'analyse est faite à partir d'un échantillon sous forme de poudre. L'échantillon du matériau est séché à 105°C jusqu'à une masse constante, subi un finement broyage mécanique. La poudre résultante est mise dans une pastille spécifique, bien comprimée et la surface supérieure est bien lissée.



Figure 3.1 Photographie de l'analyseur XTF Thermo Scientific Niton XL3t

3.3.1.4 Diffraction des rayons X

La diffractométrie de rayons X (DRX) est une technique de base de la caractérisation des matériaux. Elle permet l'identification des minéraux présents dans le matériau étudié et la distinction entre différents produits de même composition chimique mais de forme cristallographique différente (polymorphisme). Cette technique ne fonctionne que sur la matière cristallisée : Minéraux, Métaux, Céramiques, Polymères semi-cristallins, ...

A l'état cristallin, les atomes s'organisent donc en plans réticulaires plus ou moins denses qui sont désignés par leurs coordonnées (h, k, l) dans un système de repérage de l'espace. Les distances inter-réticulaires sont de l'ordre de 0,15 Å à 15 Å et dépendent de la disposition et du diamètre des atomes dans le réseau cristallin. Les interférences des rayons diffusés vont être constructives ou destructives. Les directions dans lesquelles les interférences sont constructives, appelées "pics de diffraction", peuvent être déterminées très simplement par l'équation 3.1 suivante (loi de Bragg).

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d_{hkl} \sin \theta \quad [\text{Eq. 3.1}]$$

Avec

d = Distance interréticulaire (h, k, l) entre deux plans cristallographiques.

θ = Angle d'incident des Rayons X (angle de Bragg) = demi-angle de déviation (moitié de l'angle entre le faisceau incident et la direction du détecteur).

n = Ordre de réflexion (nombre entier).

λ = Longueur d'onde des rayons X.

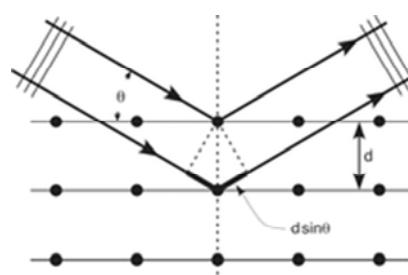


Figure 3.2 Illustration de la Loi de Bragg

Le diffractomètre utilisé pour l'analyse de nos échantillons par diffraction des rayons X est de marque Philips PW3310 (rayonnement Cu-K α) du laboratoire de métallurgie de l'INSA de Rennes -France, (Figure 3.3-b). Les analyses sont effectuées dans la plage $2\theta = 2$ à 65° .

Les essais de diffraction de rayons X ont été réalisés sur des échantillons en poudres finement broyées (prise d'essai de 80 à 100 mg de poudre), préalablement séchés à 80°C et tamisé tamisés à 315 µm, figure 3.3-a.



a- *Préparation des échantillons pour la caractérisation à la DRX*

b- *Appareil de caractérisation par diffraction X sur poudre*

Figure 3.3 Photographie de la diffractométrie de rayons X [155]

3.3.1.5 Analyse thermogravimétrique

Le principe de l'analyse thermogravimétrique (ATG) est basé sur la technique d'analyse thermique qui consiste en la mesure de la variation de masse d'un échantillon soumis à un programme de température, sous atmosphère contrôlée, en fonction du temps et l'échauffement peut être plus ou moins rapide de 1°C/min à 50°C/min. Une telle analyse est souvent employée dans la recherche pour déterminer les caractéristiques de matériaux, pour quantifier les phases présentes, pour déterminer les températures de transformation ou de dégradation des matériaux. Comme les courbes de variations de masse sont souvent similaires, il faut souvent réaliser des traitements de ces courbes afin de pouvoir les interpréter et la dérivée de ces courbes $g'(T)$ montre à quels points ces variations sont les plus importantes, ce qui donne des informations supplémentaires.

L'analyseur thermogravimétrique utilisé pour nos échantillons est de marque METTLER TOLEDO du LGCGM de l'INSA de Rennes - France, présenté dans la figure 3.4.



Figure 3.4 Photographie de l'analyseur thermogravimétrique utilisé

3.3.1.6 Analyse au Microscopie électronique à balayage

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon même rugueuses en utilisant le principe des interactions électrons-matière. L'analyse au MEB est l'un des outils analytiques les plus couramment employés en raison des images extrêmement détaillées qu'elle peut donner rapidement. En effet, elle peut offrir une identification élémentaire de presque tout le tableau périodique des éléments.

Mode opératoire :

L'observation d'échantillons isolants nécessite une métallisation de l'échantillon qui permet ensuite de le relier à la masse avec une colle conductrice qui permet d'évacuer les charges et de la fixer sur le porte échantillon.

Pour notre étude, les observations ont été faites avec un MEB à effet de champ JSM 7100F présenté dans la figure 3.5, destiné à produire des images en haute résolution et réalisées à l'université de Rennes 1 (France) au CMEBA (Centre de Microscopie Électronique à Balayage et micro-Analyse) et pratiquées sur des fractures d'échantillons, préalablement métallisés sous vide permettant d'obtenir des résolutions par électrons secondaires.



Figure 3.5 Photographie du MEB utilisé

3.3.2 Caractéristiques physiques et mécaniques

3.3.2.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique des granulats naturels et recyclés a été réalisée selon la norme NF EN 933-1 : 2012, en utilisant la technique du tamisage par voie sèche sur une fraction de 1050 g de matériau après avoir éliminé toutes les fines par l'eau. La granulométrie par diffusion laser, en condition humide, a été utilisée pour déterminer la distribution de taille des fines dont la dimension maximale des grains inférieures à 2 mm, au sens de la norme NF EN 933-10 : 2002.

3.3.2.2 Détermination des caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats, que ce soit naturels ou recyclés, sont déterminées conformément aux normes en vigueur, consignés dans le tableau 3.1 suivant.

Tableau 3.1 Caractérisation physiques et mécaniques des granulats utilisés

	Indice	Unité	Normes
Caractéristiques physiques			
Masse volumique apparente	ρ_{app}	kg/m ³	NF EN 1097-3 : 1998
Masse volumique réelle	ρ	kg/m ³	NF EN 1097-6/A1 : 2014
Module de finesse	FM		NF EN 933-1 : 2012
Teneur en fillers (< 125 µm)	Fil	(%)	NF EN 933-1 : 2012
Teneur en fines (< 63 µm)	TF	(%)	NF EN 933-1 : 2012
Equivalent de sable	SE	(%)	NF EN 933-8+A1 : 2015
Teneur en eau	W	(%)	NF EN 1097-5 : 2008
Absorption d'eau	Ab	(%)	NF EN 1097-6/A1 : 2014
Caractéristiques mécaniques des gravillons			
Essai Los Angeles	LA		NF EN 1097-2 : 2010
Essai de Micro Deval	MDE		NF EN 1097-1 : 2011

Chapitre 4

Préparation, formulations des matériaux cimentaires

Les matériaux composites cimentaires élaborés dans cette thèse sont des mortiers de maçonnerie et des bétons ordinaires.

4.1 Formulations des mortiers de maçonnerie

Le mortier de maçonnerie est constitué de ciment, sable et eau. Le procédé consiste à préparer un mortier normalisé (sable/ciment = 3 et eau/ciment = 0,5), selon NF EN 998-1 : 2010 et suivant les modalités de malaxage données par la Norme NF EN 1015-2/A1 : 2007. Les différentes gâchées ont été préparées en remplaçant six pourcentages de sable naturel (15, 30, 40, 50, 75, et 100 %) par les mêmes pourcentages volumiques de sable recyclé. Cela fait au total, vingt-cinq mélanges différents dont un mortier témoin.

4.1.1 Pré-humidification des sables recyclés

Le mortier naturel de référence (M0) est formulé à base de 100% sable naturel sec, qui nous donne un mortier un peu plastique et maniable. Cette plasticité obtenue est prise en compte pour tous les autres mortiers recyclés confectionnés (à ouvrabilité constante). Pour s'affranchir d'une probable absorption par les sables recyclés de l'eau de gâchage [156] et pour avoir un état saturé à surface sèche (SSS), figure 4.1-c. Ces sables ont subi un pré-mouillage et un malaxage dans les 10 min avant gâchage, étant donné que l'absorption d'eau du sable recyclé atteint plus de 85% de l'absorption à 24 heures dans les cinq premières minutes [9 et 15]. Les quantités d'eau d'humidification sont très variables dues à l'hétérogénéité et la rugosité élevée du sable recyclé. Les optimums prisent en compte sont 9% du poids du RSB dans la 1^{re} série et seulement 6% du poids du RSB-F dans la 3^{ème} série, dont l'influence des fillers est remarquable sur l'absorption d'eau. Afin de s'assurer de l'homogénéisation des échantillons de sable utilisés dans chaque gâchée en laboratoire et pour déterminer l'influence de l'état hydrique des granulats recyclés sur la plasticité des mortiers, nous avons effectué des essais de répétabilité (trois fois) sur chaque formulation.

Alors, dans les séries de mortiers avec du superplastifiant (2^{eme} et 4^{eme} séries) tous les sables sont utilisés à l'état sec et pour avoir la plasticité voulue, un ajout de superplastifiant était nécessaire. La plage utilisée varie de 0,15% (M15-FA) jusqu'à une teneur maximale de 3,0% (M50A et M75-FA). La plage recommandée d'utilisation du superplastifiant est dépassée pour les mortiers M75A, M100A et M100-FA, mais il a été impossible d'obtenir la rhéologie recherchée, il n'a pas été possible de les mettre dans les moules par simple vibration, ils sont secs à très sec, figure 4.3-e.



Figure 4.1 Photos des états de sables utilisés

4.1.2 Protocole de malaxage

L'homogénéisation de tous les composants de mortier est réalisée à l'aide d'un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 8 litres, figure 4.2.

Le malaxage des mortiers est réalisé selon les étapes suivantes :

- Introduction du sable recyclé, la quantité d'eau de pré-mouillage, soit 9% pour la 1^{ère} série et 6% pour la 2^{ème} série et malaxage durant 10 minutes ;
 - Introduction du sable naturel durant 1 minute (homogénéisation des sables) ;
 - Introduction du ciment durant 30 secondes et malaxage durant 1 minute ;
 - Introduction de l'eau de gâchage avec l'adjuvant durant 30 secondes ;
 - Poursuite du malaxage durant 3 minutes et 30 secondes.

La séquence de malaxage des mortiers avec du superplastifiant est la suivante :

- Les deux types de sables sont mélangés à sec pendant 1 minute avant l'ajout du ciment durant 30 secondes et malaxage durant 1 minute, ensuite introduction de l'eau de gâchage avec l'adjuvant et on poursuivre le malaxage de tous pendant 2 min 30 secondes.



Figure 4.2 Malaxeur à vitesse variable pour la confection des mortiers



a- Mortier de référence (M0)

b- Mortier à base de 30 % de
RSB (M30)

c- Mortier à base de 100 %
RSB (M100)

Mortiers sans superplastifiant



d- Mortier à base de 30% de
RSB + 1% SP (M30A)

e- Mortier à base de 100% de
RSB + 6% SP (M100A)

Mortiers avec du superplastifiant

Figure 4.3 Photos d'états des mortiers réalisés

4.1.3 Échantillonnage

Les gâchées ont été préparées en deux phases pour la campagne expérimentale, la première campagne expérimentale vise à étudier le comportement des mortiers à l'état frais et durci, à évaluer leurs propriétés rhéologique, physiques et mécaniques, ainsi que les potentialités de valorisation. Les mélanges préparés sont mis en place par coulage et vibration dans des moules cylindriques ($4 \times 8 \text{ cm}^2$) et ($5 \times 10 \text{ cm}^2$) et des moules parallélépipède prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$). Le moule est rempli en deux couches par vibration externe à l'aide de la table vibrante (50 Hz) pendant cinq secondes pour chaque couche. Pour chaque essai et composition donnée, trois échantillons au moins ont été préparés et les éprouvettes sont démoulées 24 h après leur fabrication et conservées en immersion dans l'eau à $T=20 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'au temps d'essai, conformément à la norme NF EN 12 390-2 : 2012. La deuxième campagne expérimentale a eu pour objectif d'étudier les aspects relatifs à la durabilité des mortiers élaborés. Chaque mélange obtenu est coulé dans différents types de moules adaptés à la nature des essais auxquels les éprouvettes sont destinées.

4.2 Formulations des bétons ordinaire

L'impact de l'incorporation des granulats recyclés dans le squelette granulaire sur les propriétés du béton a été étudié à partir de dix compositions dans la classe de résistance C35/45 et de classe d'environnement EA2 selon les directives de la norme NF NE 206-1/CN : 2014. La formulation des bétons est basée sur la méthode de composition de Dreux-Gorisso [60], en prenant comme données de base :

- Un dosage en ciment constant pour tous les mélanges, 400 kg pour 1 m³ de béton ;
- Une même classe de consistance S2 (béton plastique, affaissement de 5 à 9 cm), essai réalisé au cône d'Abra.ms, selon la NF EN 12350-2 : 2012 ;
- Un même squelette granulaire de compacité ($c = 0,805$) ;

Pour les besoins de l'étude, un béton témoin naturel (BT) est fabriqué à base de granulats naturels (NSB et GNB). Seuls les graviers recyclés (GRG) ont subi une pré-saturation pendant 24 heures avant gâchage pour s'affranchir d'une probable absorption par les granulats recyclés de l'eau de gâchage [55 et 156]. Ils sont incorporés à l'état saturé à surface sèche (SSS).

4.2.1 Protocole de malaxage

Une bétonnière électrique à axe inclinée, de capacité 30 litres a été utilisée pour la confection des bétons ordinaire. La séquence de malaxage des bétons suivante, a été systématiquement appliquée :

- Introduction des deux fractions de graviers recyclés (3,15/8 mm et 8/16 mm) (SSS) suivie par celles du gravier naturel à l'état naturel, et malaxage durant 1 minute ;
- Introduction de la moitié des sables (0/3,15 mm) recyclés et naturels à l'état sec, du ciment et enfin de la seconde moitié des sables, malaxage durant 1 minute ;
- Introduction de l'eau durant 30 secondes ;
- Poursuite du malaxage durant 2 minutes et 30 secondes.

La totalité des matériaux est malaxée dans un premier temps pour les homogénéiser et la durée totale du malaxage est de 5 minutes dont 02 minutes de malaxage à sec.

4.2.2 Protocole d'échantillonnage

Quel que soit le type d'éprouvettes, le béton est mis en place en deux couches dans des moules et soumis à un serrage par couche de 10 secondes sur une micro-table vibrante à une fréquence de 50 Hz, selon à la norme NF P18 – 421 : 1981. Le démoulage intervient 24 heures après la phase de coulage. Les éprouvettes sont ensuite conservées dans l'eau et à une température moyenne de 20°C ± 2°C jusqu'à l'échéance d'essai, conformément la norme NF EN 12390-2 : 2012.

4.3 Caractérisation des composites à l'état frais

4.3.1 Détermination du volume d'air occlus

Le volume d'air occlus est un paramètre important qui conditionne les propriétés physico-mécaniques des matériaux de construction ; il est généralement exprimé en pourcentage par rapport au volume total du mortier. Il est constitué de bulles d'air formées au cours du malaxage et sa teneur dépend entre autres de la nature des granulats et de leur capacité à emprisonner l'air dans la matrice.

Les volumes d'air occlus des composites élaborés dans notre travail ont été déterminés à l'aide d'un aéromètre à mortier "Controlab" de 1L pour les mortiers, selon la norme NF EN 413-2 : 2006. Et l'aéromètre de 8 L a été utilisé pour la mesure d'air occlus dans les bétons conformément à la norme NF EN 12350-7 : 2012.

4.3.2 Evaluation des masses volumiques apparentes

La masse volumique apparente des matériaux cimentaires à l'état frais (ρ_{app}) a été évaluée à partir de la masse d'une quantité de mélange frais rapporté à son volume après vibration. Les masses volumiques apparentes des mortiers sont déterminées conformément à la norme NF EN 1015-6/A1 : 2007 et celles du béton sont déterminées selon la norme NF EN 12350-6 : 2012.

4.3.3 Essais de Maniabilité

La maniabilité est une propriété du mortier (béton) frais qui traduit son aptitude à être mis en place, elle peut avoir une incidence sur les caractéristiques mécaniques ultérieures à l'état durci. Le besoin en eau du matériau frais, pour atteindre une maniabilité convenable, est très influencé par la texture superficielle (rugosité), la porosité et la forme des granulats.

4.3.3.1 Maniabilité des Mortiers

La plasticité des mortiers est évaluée par les mesures de l'affaissement, qui a été effectuées à l'aide d'un mini cône "Mortier Béton Équivalent" (MBE). Le principe consiste à remplir le mini cône métallique d'Abraams avec du matériau frais en deux couches avec une vibration pendant une durée de 5s pour chaque couche. On soulève le cône verticalement et on mesure la hauteur d'affaissement à temps ($t=0$), ensuite le mortier est vibré pendant (2s) à une fréquence de 50 Hz et on mesure la hauteur d'affaissement à ($t=2s$). (Figure 4.4).



Affaissement à ($t=0$)



Affaissement à ($t=2s$)

Figure 4.4 Affaissement au mini cône (MBE) d'Abraams

4.3.3.2 Essai d'ouvrabilité du béton

L'ouvrabilité du béton est évaluée à l'aide du cône d'Abraams, conformément à la norme NF EN 12350-2 : 2012. L'essai consiste à introduire le béton frais dans un moule tronconique

(D=20, d=10, H=30 cm) en trois couches, où chacune subit 25 coups de piquage à l'aide d'une tige ϕ 16 mm, puis le moule est retiré lentement et on relève la mesure de l'affaissement en (cm).

4.3.4 Mesure de la plasticité des mortiers

La fluidité du mortier est évaluée à l'aide d'un plasticimètre cubique (11x11x11 cm³), fixé sur une table vibrante d'une fréquence de 50 Hz, et muni d'une trappe d'ouverture de forme rectangulaire (10x40 mm²) située à la base de l'une des faces du cube. Le plasticimètre est rempli de mortier en deux couches, en le vibrant pendant 5 secondes pour chaque couche, la trappe de sortie étant maintenue fermée (Figure 4.5-a). La table vibrante est mise en mouvement et on ouvre la trappe de sortie, en déclenchant le chronomètre (t). On recueille soigneusement le mortier qui s'écoule pour le peser (M). Les mesures sont arrêtées quand un temps suffisant est écoulé ou quand le débit devient irrégulier et au plus tard quand le niveau du mortier sera descendu de 2 cm (Figure 4.5-b). La plasticité du mortier est caractérisée par le débit massique qui se calcule par la formule suivante :

$$Q = M/t \quad [\text{Eq. 4.1}]$$

Avec :

Q : Débit d'écoulement du mortier, (g/s) ;

M : Masse du mortier récupérée à travers de la trappe de sortie du plasticimètre en (g) ;

t : Temps d'écoulement du mortier en seconde (s).



a- Niveau du mortier (0 cm à t=0 s)

b- Niveau du mortier (- 2 cm à t)

Figure 4.5 Photographie de mesure de la plasticité du mortier (plasticimètre)

4.3.5 Résistance au cisaillement des mortiers

Les résistances au cisaillement des mortiers frais sont déterminées selon la norme NF P 94-112 : 1991, à l'aide d'un scissomètre de laboratoire de VJ Technology, modèle VJT5300, présenté dans la figure 4.6, destiné à mesurer la résistance au cisaillement des sols peu consitants. La résistance au cisaillement par le scissomètre est calculée selon la formule suivante :

$$\tau_v = (1000 \cdot \theta \cdot FE) / (\pi \cdot D \cdot \left(\frac{H}{2} + \frac{D}{6} \right)) \quad [\text{Eq. 4.2}]$$

Avec : **θ** : Déflexion angulaire maximale du ressort (en degré) ;

FE: Facteur d'étalonnage du ressort (N.mm/degré) ;

H : Hauteur de la palette, en mm $\pm 0,1$ mm.

D : Largeur de la palette, en mm $\pm 0,1$ mm ;



Figure 4.6 Scissomètre de laboratoire (VJT5300).

4.3.6 Mesure du temps de prise des mortiers

Afin d'évaluer le temps disponible pour la mise en œuvre correcte des mortiers. L'essai de détermination du temps de prise des mortiers a été réalisé à l'aide de l'appareil de Vicat automatique "Vicatronic", figure 4.7. L'essai, conformément à la norme NF NE 480-2 : 2014, consiste à placer une surcharge de $700\text{g} \pm 5\text{g}$ sur le plateau supérieur de l'appareil (poids total pénétrant dans le mortier est $1000\text{g} \pm 5\text{g}$). Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à $4\text{ mm} \pm 1\text{mm}$ du fond et la fin de prise des mortiers est l'instant où l'aiguille s'arrête à $2,5\text{ mm}$ du niveau supérieur du mortier dans le moule tronconique de 40 mm de diamètre.



Figure 4.7 Appareil de Vicat automatique (Vicatronic) muni de l'aiguille avec une surcharge

Chapitre 5

Dispositifs et essais de caractérisation mécanique et de durabilité

5.1 Essais mécaniques

5.1.1 Introduction

Pour comprendre le comportement des composites cimentaires à base de granulats recyclés, nous avons réalisé, d'une part, différents essais destructifs classiques, essais de compression, de flexion et de traction par fendage, et d'autre part, des essais non destructifs pour déterminer le module d'élasticité dynamique.

5.1.2 Mesure des propriétés mécaniques

Dans cette étude, on a recouru à deux types de presses hydrauliques, à pilotage automatique et liées par des micro-ordinateurs destinés à la détermination de différentes propriétés mécaniques des mortiers et des bétons. : Une presse type Instron® Zwick/Roell de capacité de chargement de 200 KN et une presse type Controlab Perrier Labotest de capacité de 3000 kN respectivement (Figure 5.1). Ces deux presses ont été utilisées en charge (force) contrôlée conformément à la norme NF EN 12390-4 : 2000.



a- Presse Zwick/Roell (200 kN)



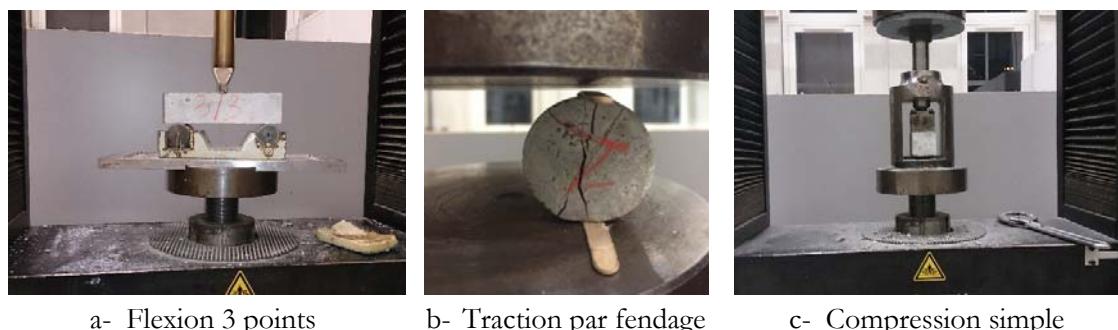
b- Presse Controlab Perrier Labotest

Figure 5.1 Photographies des presses hydrauliques utilisées

5.1.2.1 Essais sur mortiers

Le comportement mécanique des différents mortiers durcis a été étudié en flexion simple 3 points et à la traction par fendage sur des éprouvettes prismatiques $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ et $40 \times 80 \text{ mm}^2$, respectivement. A chaque échéance, trois échantillons sont testés en flexion simple selon une vitesse de chargement de $0,25 \text{ MPa/s}$. Les six morceaux d'éprouvettes obtenus après rupture en flexion sont alors soumis à une compression uni-axiale suivant une vitesse de chargement de $0,25 \text{ MPa/s}$ jusqu'à la rupture (Figure 5.2-c).

L'acquisition des données (la force et le déplacement de la traverse de la presse) est assurée par le logiciel de la presse. L'essai est piloté en déplacement avec une vitesse de $0,5 \text{ mm/minute}$



a- Flexion 3 points b- Traction par fendage c- Compression simple

Figure 5.2 Photographie des différents essais destructifs effectués sur les mortiers

5.1.2.2 Essais sur bétons

La résistance à la traction des bétons est déterminée par un essai de flexion quatre points sur des éprouvettes prismatiques $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ et la résistance en compression est mesurée sur les quatre morceaux des éprouvettes qui ont subi rupture par flexion. Le chargement est asservi en force à la vitesse de $0,5 \text{ MPa/seconde}$. La résistance à la traction est également mesurée sur des éprouvettes $11 \times 22 \text{ cm}$ par des essais de fendage avec la même vitesse de chargement.

5.1.3 Mesure du module élastique

La mesure du module élastique a été réalisé, conformément à la norme NF EN 1015-11 : 2007 relative aux mortiers de maçonnerie, sur des éprouvettes cylindriques ($5 \times 10 \text{ cm}^2$) et sur des éprouvettes cylindriques ($11 \times 22 \text{ cm}^2$) en béton selon la procédure de la norme NF EN 12390-13 :2014.

L'essai de détermination du module de Young consiste à préparer les éprouvettes en rectifiant leurs sections, et puis 3 cycles de chargement-déchargements dans la zone élastique du matériau sont appliqués, c.-à-d. jusqu'à 30% de sa charge maximale à la rupture et avec une vitesse de charge ($0,25 \text{ MPa/s}$). Les déformations ont été obtenues par l'intermédiaire d'un extensomètre muni de trois capteurs de déplacement linéaires (LVDT) dans le sens longitudinal comme la montre la figure 5.3. Le module élastique est déduit de la courbe du dernier cycle de chargement. Les déformations longitudinales données par les 3 LVDT sont moyennées et utilisées pour la détermination du

module d'élasticité (E) en MPa à l'aide des courbes contrainte/déformation et calculé par l'expression suivante.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \quad [\text{Eq. 5.1}]$$

Avec :

σ_a : 33 % de la résistance en compression (σ_{Max}).

σ_b : 5 % de la résistance en compression (σ_{Max}).

ε_a : Déformation moyenne enregistrés par les 3 LVDT sous la contrainte σ_a .

ε_b : Déformation moyenne enregistrés par les 3 LVDT sous la contrainte σ_b .

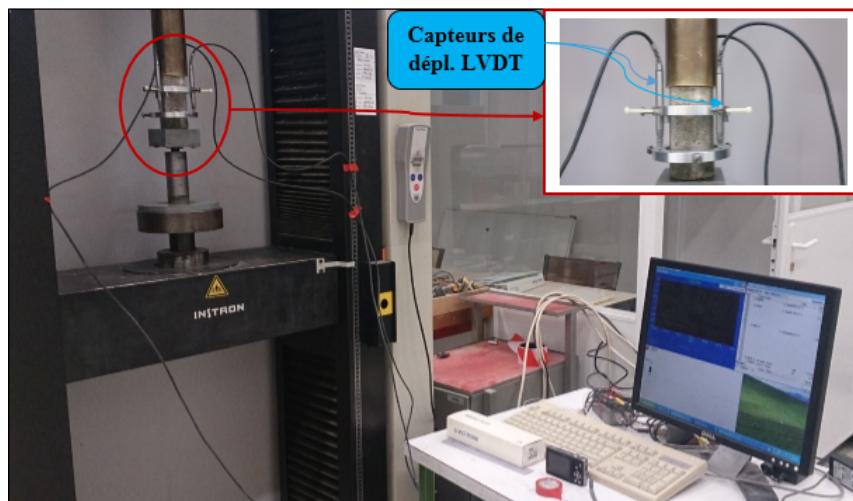


Figure 5.3 Photographie de l'essai de détermination du module d'Young des mortiers

5.1.4 Mesure du module d'élasticité dynamique

Les méthodes ultrasonores sont très utilisées dans la caractérisation de l'endommagement et le contrôle non destructif des matériaux. Elles présentent de nombreux avantages : facilité de mise en œuvre, bonne adaptation aux orientations naturelles de la plupart des défauts et possibilité de traverser de fortes épaisseurs, ...etc. Elles présentent cependant quelques exigences telles la grande sensibilité de la propagation des ultrasons aux degrés d'hétérogénéité ou d'anisotropie du matériau ou des paramètres variables liés aux conditions de mesure telles que la température, le taux d'humidité, l'état de contrainte du matériau. La propagation des ondes ultrasonores est affectée par la taille et l'orientation des défauts tels que les pores et les fissures, et la présence ou l'absence de fluides interstitiels. De ce fait, la technique ultrasonore consiste à soumettre un matériau à un signal particulier d'une onde sonore et à enregistrer la réponse. Selon l'état du matériau, l'onde change de vitesse et la propagation des ondes est perturbée par les discontinuités. Lorsque la fissuration et l'altération du matériau augmentent, la propagation des ondes est perturbée, la vitesse diminue tandis que l'atténuation de l'onde ultrasonore augmente [165].

En ce qui concerne la détermination du module d'élasticité dynamique des matériaux durcis, à partir des vitesses de propagation des ondes ultrasoniques, on a utilisé un appareil auscultation sonique Pundit Lab Plus (Figure 5.4). Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) pour les mortiers et ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) pour les bétons, en respectant les démarches de la norme NF EN 12504-4 : 2005. L'appareil doit être remis à zéro en utilisant régulièrement la barre de calibrage avant chaque essai. La vitesse de propagation d'onde, en m/s, émise et reçue par les deux transducteurs ultrasonores, de fréquence 54 kHz, a été effectuée selon les deux directions longitudinales et transversales des éprouvettes.



Figure 5.4 Photo de mesure du temps d'une onde dans une éprouvette de mortier

Le coefficient de Poisson (ν) et le module dynamique (E_d) sont calculés par les expressions suivantes :

$$\nu = \frac{V_L^2 - 2.V_T^2}{2.V_L^2 - 2.V_T^2} \quad [\text{Eq. 5.2}]$$

$$E_d = 2.\rho(1 + \nu)V_T^2 \quad [\text{Eq. 5.3}]$$

Avec :

ρ : Masse volumique du matériau ;

V_L et V_T : Vitesses des ondes ultrasoniques dans le sens longitudinal et transversale, respectivement.

5.2 Essais relatifs à la durabilité

5.2.1 Introduction

L'impact environnemental des composites recyclés réalisés sont évalués grâce à des études de leurs comportements sous des sollicitations chimiques, physiques et de durabilité. Ces essais permettent d'une part de quantifier les éléments relâchés par le produit fini dans l'environnement et d'autre part d'apprécier l'altérabilité du matériau soumis à des milieux agressifs.

Le choix des indicateurs de durabilité et des spécifications performantes dépend de deux grandeurs : paramètres fondamentaux dans l'évaluation et la prédition de la durabilité et paramètres facilement quantifiables à partir d'essais de laboratoire. Les essais de durabilité sont généralement très lents et nécessitent un temps conséquent, c'est pour cette raison que nous avons utilisé des essais accélérés. Et pour des raisons économiques et écologiques, nous avons choisi de ne recourir à aucun traitement thermique ou chimique préalable sur les granulats recyclés utilisés.

Nous exploitons ci-dessous les phénomènes qui nuisent à la durabilité des matériaux cimentaires durcis à travers les indicateurs de durabilité généraux à savoir, l'absorption d'eau, la porosité accessible à l'eau, le coefficient de diffusion des ions chlore et la perméabilité aux gaz et les indicateurs de durabilité spécifiques tel que gel-dégel, cycles thermiques ainsi que la lixiviation aux acides.

5.2.2 Absorption d'eau par capillarité

Le coefficient d'absorption capillaire (ou encore la sportivité) est pertinent, car l'absorption capillaire est le principal processus contrôlant la vitesse de pénétration de l'eau (contenant éventuellement des ions chlorures, sulfates...) en conditions partiellement saturées. Elle est connue pour dépendre de deux paramètres majeurs, la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité). La mesure de l'absorption capillaire est un moyen simple et facile. Cependant, le coefficient issu des expériences fait intervenir des mécanismes physico-chimiques complexes, rendant l'interprétation difficile (le coefficient d'absorption capillaire n'est pas une « pure » propriété de transport). L'information qu'il apporte sur le matériau peut apparaître redondante avec celle fournie par le panel d'indicateurs de durabilité généraux et moins facilement utilisable d'un point de vue quantitatif et prédictif [166].

La détermination du coefficient d'absorption d'eau par succion capillaire est effectuée à température régulée du laboratoire. L'essai des mesures de l'absorptivité des éprouvettes est réalisé conformément aux recommandations de la procédure AFPC-AFREM [167], qui a également fait l'objet de recommandations dans la synthèse des travaux du projet GranDuBé [163]. Il consiste à sécher les échantillons jusqu'à une masse constante dans une étuve ventilée à $80 \pm 2^\circ\text{C}$, à immerger la base des éprouvettes sur des cales, de manière à ce qu'elles ne touchent pas le fond du récipient et qu'elles soient immergées dans de l'eau, sur une hauteur d'eau de 5 à 10 mm au-dessus des cales. Le niveau d'eau est maintenu constant pendant tout l'essai. Les mesures de masse et pénétration d'eau sont prises à des intervalles : 15, 30, 60, 120, 240, 360, 480 et 1440 min. Le coefficient d'absorption capillaire est défini par la relation suivante [163] :

$$C_a = \frac{M_x - M_0}{A} \quad [\text{Eq. 5.4}]$$

Avec :

M_0 et M_x : Les masses de l'éprouvette initiale et à l'échéance donnée (kg) ;

A : Section de l'éprouvette en (m^2).

5.2.3 Mesures de la porosité communicante et densité apparente

La porosité totale (δ) est une propriété volumétrique représentant le volume des pores qui ne sont pas nécessairement interconnectés, alors que la perméabilité est une propriété d'écoulement qui caractérise l'aptitude d'un matériau poreux à se laisser traverser par un fluide. Elle est définie par le rapport entre le volume des vides (V_p) et le volume total (V) de matériau.

$$\delta = \frac{V_p}{V} \quad [\text{Eq. 5.5}]$$

L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec est connue pour dépendre de deux paramètres majeurs, la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité).

L'essai de la porosité communicante accessible à l'eau (\emptyset_{com}) a été réalisé en respectant la norme NF NE 18-459 : 2010 et selon le mode opératoire recommandé par le groupe de travail AFPC-AFREM [166] et cité dans le projet GranDuBé [163].

Le protocole d'essai préconise d'abord un dégazage des échantillons par un appareillage à vide, la mise sous vide jusqu'à une pression inférieur à 25 mbar et le maintenir constant pendant au moins $04\text{ h}\pm1/2\text{h}$ jusqu'à le dégazage complet. On introduit ensuite suffisamment d'eau de façon qu'après 15 min, les corps d'épreuve soient recouverts d'environ 20 mm d'eau. Le vide est maintenu pendant $44\text{h}\pm1\text{heures}$. Les éprouvettes saturées sont ensuite pesées, complètement immergées, par une balance hydrostatique à 0,01 % près et on obtient alors la masse saturée mesurée dans l'eau (M_{eau}). Les échantillons sont ensuite extraits de l'eau, essuyer rapidement pour la mesure de la masse dans l'air (saturée à surface sèche) (M_{air}). La variation de masse obtenue est égale au volume total de l'échantillon multiplié par la masse volumique du fluide (ρ_{eau}).

$$\Delta M = M_{air} - M_{eau} = V \cdot \rho_{eau} \quad [\text{Eq. 5.6}]$$

Afin de mesurer la masse sèche (M_{sec}), les éprouvettes sont séchées à la température $105 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante. La masse volumique apparente du matériau à l'état sec (ρ_d) en (kg/m^3) est égale au rapport entre la masse sèche de l'éprouvette et son volume apparent (V), équation 5.7.

$$\rho_d = \frac{M_{sec}}{V} = \frac{M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times \rho_{eau} \quad [\text{Eq. 5.7}]$$

Et la porosité communicante accessible à l'eau, \emptyset_{com} en (%) est donnée par l'équation 5.8 :

$$\emptyset_{com} = \frac{M_{air} - M_{sec}}{V \times \rho_{eau}} = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \cdot 100 \quad [\text{Eq. 5.8}]$$

Les dispositifs de saturation des éprouvettes et de pesée hydrostatique sont représentés sur la figure 5.5.



Dispositifs de saturation des éprouvettes

Dispositifs de pesée hydrostatique

Figure 5.5 Photo des dispositifs de mesures de la porosité communicante et densité apparente

5.2.4 Mesures de la perméabilité au gaz

5.2.4.1 Perméabilité des matériaux cimentaires

La perméabilité est une propriété d'écoulement qui exprime la capacité d'un matériau après sa dessiccation à se laisser traverser par un fluide sous gradient de pression totale. Elle reflète l'importance du réseau poreux, sa connectivité et sa tortuosité. Dans une éprouvette de mortier ou béton, le réseau poreux est constitué par les fissures et microfissures, les pores capillaires, les auréoles de transition aux interfaces granulat-pâte de ciment et la porosité des hydrates.

La perméabilité dépend de la structure interne de l'espace poreux et particulièrement de la connectivité des pores capillaires, de leurs dimensions et de leurs interconnexions. La porosité des matériaux cimentaires s'étale sur un vaste intervalle de tailles de pores de quelques Angströms à quelques millimètres. Ces pores peuvent être connectés entre eux ou non comme illustrés dans la figure 5.6.

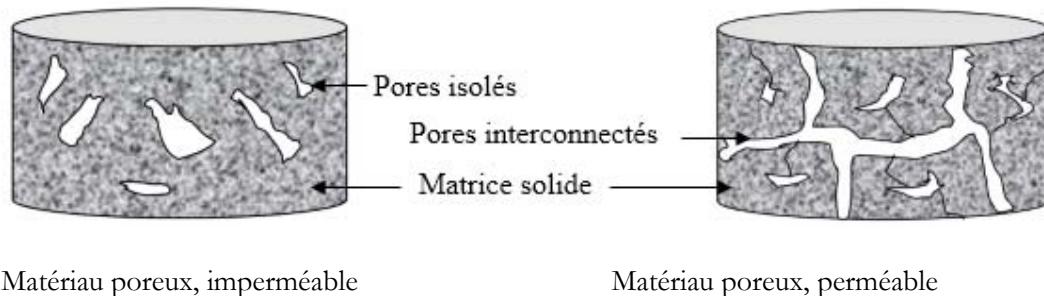


Figure 5.6 Représentation schématique d'un matériau poreux [165]

La perméabilité et la diffusivité hydrique sont les principaux paramètres caractérisant l'aptitude des bétons à véhiculer un fluide (en phases liquide et/ou vapeur). Ces deux paramètres sont considérés comme meilleurs indicateurs dans l'évaluation du potentiel de durabilité des matériaux cimentaires. Ils dépendent fortement du réseau poreux, de sa connectivité et de la teneur en eau du matériau [168].

Trois fluides sont susceptibles de pénétrer dans la matrice poreuse cimentaire et de mettre en cause sa durabilité. Ce sont : l'eau, pure ou contenant des ions, le gaz carbonique et l'oxygène. Ils peuvent se déplacer au travers du matériau de différentes façons, mais tous les mouvements dépendent principalement de la structure de la pâte de ciment hydratée [57].

5.2.4.2 Détermination de la perméabilité apparente au gaz

La perméabilité apparente au gaz (K_a) du béton est mesurée après séchage préalable, soit en appliquant une charge constante, c'est-à-dire un gradient de pression constant, soit une charge variable. Dans les deux cas, la perméabilité mesurée dépend de la pression appliquée. Le principe de détermination de la perméabilité apparente consiste à appliquer une pression d'injection de gaz inerte à une extrémité de l'échantillon via un réservoir de volume déterminé, puis de mesurer la variation de pression d'injection en fonction du temps, ce qui permet de déterminer la perméabilité du matériau [A199]. Les conditions opératoires permettant de vérifier que le seul fluide présent dans le matériau est l'hélium (séchage de l'éprouvette dans une étuve ventilée jusqu'à masse constante ($\mp 0,05\%$), obtention d'un régime d'écoulement permanent (temps de saturation de l'éprouvette suffisamment long) et enfin, écoulement laminaire du fluide (assuré par une pression d'injection suffisamment basse).

Le principe expérimental de l'essai de détermination de la perméabilité apparente est de maintenir une différence de pression constante du gaz (Hélium), entre les deux extrémités de l'échantillon et de mesurer le débit résultant (Q_2) lorsque le régime permanent est établi. Par la suite la perméabilité apparente au gaz k_a est calculée à partir de la formule suivante (équation 5.9) :

$$K_a = \frac{Q_2}{S} \frac{2 \cdot \mu \cdot L \cdot P_2}{(P_1^2 - P_2^2)} \quad [\text{Eq. 5.9}]$$

Avec :

Q_2 : Débit volumique de sortie (à l'aval) à la pression ($m^3 \cdot s^{-1}$) ;

P_1 : Pression de l'entrée du gaz de percolation P_1 de 1 à 5 bars ;

P_2 : Pression du gaz de sortie $P_2 = 1 \text{ atm}$;

S : Section droite de l'échantillon (m^2) ;

L : Longueur de l'échantillon (m) ;

μ : Viscosidynamique du gaz (μ (He) = $1,86 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$ à $T = 20^\circ C$).

Il faut noter que, la perméabilité apparente (K_a) est une fonction de la pression moyenne ($P_m = \frac{P_1 + P_2}{2}$) du gaz dans l'échantillon, elle diminue lorsque cette pression moyenne augmente et elle dépend de la nature du fluide percolant utilisé.

5.2.4.3 Détermination de la perméabilité intrinsèque

La perméabilité intrinsèque (K_V) dépend de la viscosité du fluide traversant le matériau. Elle peut uniquement être déterminée à partir des écoulements visqueux qui ont lieu dans l'échantillon lors de la percolation du gaz. D'où la valeur de la perméabilité intrinsèque dépend encore du degré de saturation du matériau lors des essais, elle augmente lorsque la teneur en eau diminue [165 et 169].

La méthode la plus répandue qui permet de déterminer la perméabilité intrinsèque (K_V) à partir de plusieurs mesures de perméabilité apparente (K_a) à différentes pressions est la méthode de Klinkenberg. Le coefficient de K_V , en fonction du coefficient K_a et de l'inverse de la pression moyenne (P_m), est donné par la formule proposée par Klinkenberg, (équation 5.10) suivante.

$$K_a = K_V \left(1 + \frac{\beta_k}{P_m} \right) \quad [\text{Eq. 5.10}]$$

Avec :

P_m : Pression moyenne, $P_m = \left(\frac{P_1 + P_2}{2} \right)$;

β_k : Coefficient de Klinkenberg, sa valeur est significative de la finesse du réseau poreux emprunté par le gaz lors de son écoulement. Elle est intrinsèque au matériau, pour un état de saturation donné.

La méthode de détermination de (K_V) consiste à effectuer une régression linéaire des différentes mesures de perméabilité apparente effectuées pour des pressions d'injection différentes selon l'inverse de la pression moyenne P_m . Elle est illustrée en figure 5.7 à partir de mesures réalisées sur une éprouvette de mortier $4 \times 6 \text{ cm}^2$ [165].

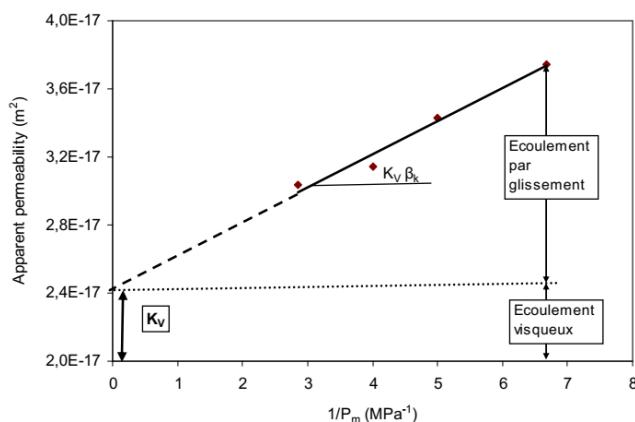


Figure 5.7 Détermination de (K_V) pour un mortier normalisé par la méthode de Klinkenberg.

5.2.4.4 Dispositif de mesure de la perméabilité au gaz au laboratoire

Au laboratoire, la mesure de perméabilité au gaz est réalisée à l'aide d'un perméamètre à charge constante de type CEMBUREAU [163] avec des pressions de percolation $P_1 = 2 \text{ bars}$ et de confinement $P_c = 5 \text{ bars}$. Les échantillons testés sont des disques de 5 cm d'épaisseur (5x11cm) découpé au centre d'éprouvettes cylindrique (11x22 cm²) de chaque matériau, pour obtenir des résultats moyens représentatifs. L'échantillon est généralement pré-séchés dans des conditions définies (dans une étuve à 60°C jusqu'à masse constante) et le dispositif expérimental de mesure est représenté dans la figure 5.8, il comporte :

- ✓ Une cellule porte-échantillon qui permet d'injecter le gaz de percolation et qui assure l'étanchéité latérale de l'éprouvette par l'intermédiaire d'une membrane en caoutchouc frettée par de l'air comprimé ou par le même gaz de percolation ;
- ✓ Une bouteille d'hélium de 20 MPa munie d'un détendeur permettant de disposer de pressions comprises entre 0 et 10 bars avec une précision de 0,1 bar ;
- ✓ Une pompe à vide ;
- ✓ Un débitmètre massique permettant de mesurer la quantité de gaz récupérée à la sortie de la cellule de perméabilité.

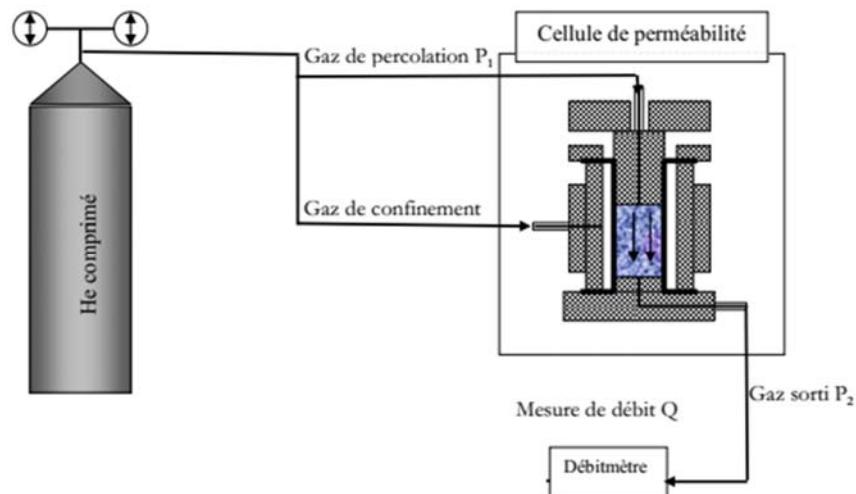


Figure 5.8 Schéma représentatif du dispositif expérimental pour les mesures de perméabilité au gaz [165]

5.2.5 Mesure du retrait total libre et endogène

Le retrait est une variation dimensionnelle négative pour la durabilité, c'est l'une des causes à l'origine des déformations imposées et qui peut conduire au dépassement de la résistance en traction des matériaux cimentaires. Le retrait est un phénomène très complexe, il se développe fortement aux jeunes âges. Il est influencé par plusieurs paramètres, et son intensité dépend notamment du processus d'hydratation du ciment, module élastique des granulats et des échanges hydriques avec le milieu environnant tout au long de la vie du matériau.

Les mesures du retrait endogène et total libre de nos matériaux cimentaires ont été réalisées en modes endogène et de dessiccation sur des éprouvettes de forme prismatique ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) pour les mortiers et ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) pour les bétons. Lors du moulage, des inserts en laiton ont été noyés dans le matériau aux deux extrémités du moule, et ont été positionnées axialement dans le sens longitudinal du prisme. Ces matériaux sont coulés en deux couches dans chaque moule, puis compactés grâce à la micro-table vibrante et la surface libre des éprouvettes est recouverte par un film plastique, après coulage. Les éprouvettes sont démoulées après 24 h, puis elles sont conservées dans une salle affectée aux essais de retrait. Cette salle climatisée est maintenue à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et 55% d'humidité relative. Les éprouvettes destinées pour l'étude du retrait endogène sont recouvertes sur toute leur surface par un papier aluminium adhésif pour empêcher tout échange hydrique avec l'extérieur. En ce qui concerne les éprouvettes destinées à déterminer le retrait total, celles-ci sont conservées sans aucune protection. Le retrait de séchage est déduit du retrait total en considérant ce dernier comme une superposition du retrait endogène et de séchage.

Six éprouvettes sont coulées pour chaque type de béton, 3 éprouvettes pour la mesure du retrait endogène, et les 3 autres pour la mesure du retrait total. Pour la mesure du retrait des mortiers, 12 éprouvettes sont confectionnées et interposées dans quatre environnements différents, 6 éprouvettes dans la salle sèche dont trois destinées au retrait endogène, les trois autres sont placées dans la salle humide et les dernières dans la salle du labo, figure 5.9..

Les mesures des retraits ont été effectuées à l'aide d'un comparateur micrométrique avec une précision de 0,001mm régulièrement. De plus, les éprouvettes de retrait total ont été pesées aussi régulièrement après chaque mesure de retrait afin de corrélérer la variation de masse au retrait total. Les éprouvettes destinées au retrait endogène ont été également régulièrement pesées afin de vérifier l'étanchéité appliquées à ces éprouvettes et donc de vérifier qu'il n'y a pas eu de perte de masse, figure 5.10.



Eprouvettes de mortiers entreposées
dans la pièce sèche



Eprouvettes de mortiers entreposées
dans la salle humide

Figure 5.9 Photographie des éprouvettes entreposées dans différents environnement

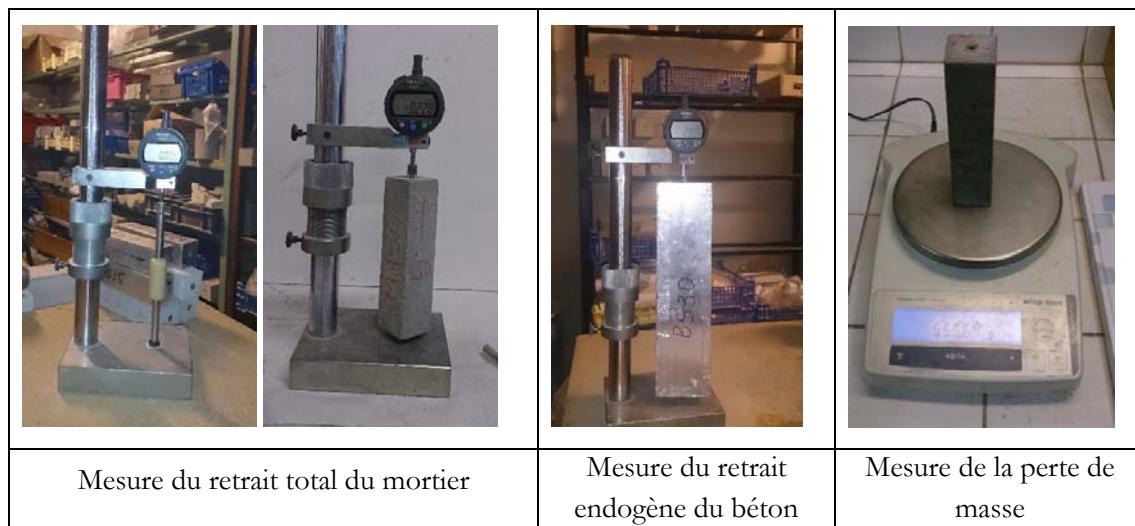


Figure 5.10 Photographies des essais de mesure du retrait total et endogène libre

5.2.6 Cycles gel-dégel

5.2.6.1 Introduction

Les cycles de gel-dégel produisent deux types de dégradations du béton : l'écaillage et la fissuration interne. La fissuration interne peut concerner toute la masse du béton saturé ; elle se manifeste par une microfissuration de la pâte de ciment et un affaiblissement des liaisons pâte-granulat. Le comportement au gel du béton dépend des caractéristiques de la pâte de ciment, de celles des granulats mais aussi des interactions entre les propriétés de ces deux composants.

La pâte de ciment contient un fluide interstitiel riche en ions dissous et multiphasique et la tenue au gel de la pâte de ciment dépend de son degré de saturation. C'est ce liquide interstitiel qui est principalement à l'origine de la dégradation par effet du gel. La température de transformation de l'eau en glace, dépend beaucoup de la dimension des pores, au cours du gel, la formation de la glace s'amorce d'abord dans les plus gros pores capillaires et se propage ensuite dans les pores de plus en plus petits au fur et à mesure que la température diminue. La présence d'interfaces gazeuses régulièrement réparties permet de résorber les contraintes de traction ultimes qui peuvent endommager le béton. Les mécanismes d'action du gel, selon les théories les plus connues, peuvent être résumés par la dégradation par pression hydraulique, la dégradation par pression osmotiques et les dilatations thermiques [165].

L'étude des effets des cycles gel-dégel sur nos matériaux n'a pas pour objectif d'acquérir une compréhension totale des phénomènes mis en jeu, mais plutôt de vérifier la résistance de ces matériaux afin d'évaluer les conditions d'utilisation des granulats recyclés valorisés. Si cette résistance montre une utilisation potentielle de ces matériaux dans les conditions hivernales, des études complémentaires et une campagne dédiée à ce seul sujet devrait être mise en place avant de conclure que ces matériaux sont bien utilisables en conditions hivernales rigoureuses.

5.2.6.2 Mode opératoire

L'essai gel-dégel est réalisé conformément à la norme NF P18-425 : 2008, c.à.d. Gel dans l'air - Dégel dans l'eau. Notre étude, est limitée au comportement des mortiers recyclés à base de sable recyclé avec fillers. Neuf éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm³ de chaque mortier, après 28 jours de cure dans l'eau, sont exposées à 15, 30 et 60 cycles de gel-dégel au terme desquels une caractérisation de la dégradation a été réalisée à la fois par des mesures non destructives (déformation, vitesse de propagation d'ondes ultra sonores) et des mesures mécaniques destructives (résistance en flexion et en compression). Les résultats trouvés sont comparés avec l'état sain (avant le début des cycles de dégradation). Les étapes opératoires sont les suivantes :

- Saturation des éprouvettes sous vide pendant 24 heures.
- Refroidissement et maintien des éprouvettes saturées à -20°C pendant 12 heures dans un congélateur.
- Décongélation par immersion dans de l'eau à 20°C pendant 12 heures.
- Reprise du cycle par congélation à -20°C pendant 12 heures.
- Après le 15^{ème} et 30^{ème} cycle, mesure de la vitesse des ondes ultrasonores (Evolution du module d'élasticité dynamique).
- Restauration des éprouvettes et reprise des cycles gel-dégel.
- Au terme du 30^{ème}, 60^{ème} cycle, caractérisation générale non destructive et destructive.

5.2.7 Lixiviation

5.2.7.1 Introduction :

La lixiviation est l'ensemble des phénomènes qui peuvent conduire à une perte progressive des performances des matériaux à base de ciment. Le contact de ces derniers avec le milieu extérieur, et sous l'action des agents agressifs plus acides (eaux pures, sels et les acides), provoque plusieurs phénomènes physiques et chimiques complexes. La lixiviation des matériaux cimentaires dépend de plusieurs facteurs, tels que les paramètres du matériau comme la nature du ciment, le rapport eau-liant, la porosité, et les paramètres environnementaux, tels que le pH et la température.

En général, les sulfates sec ou humide sont extrêmement agressives à l'égard des liants hydrauliques. Le processus de l'agression chimique des sulfates à matrice cimentaire est un processus qui implique la circulation des ions sulfates à travers les pores de la peau et par le biais de différents mécanismes de transport et de l'interaction de la solution agressive avec certains composés du ciment. La détérioration des mortiers et des bétons par attaque sulfatique résulte de l'interaction de l'acide sulfurique avec le Portlandite libre (hydroxyde de calcium) (équation 5.11) et l'aluminate de calcium hydraté (équation 5.12) donnant naissance au gypse secondaire et de l'étringite respectivement :



La cristallisation de ces deux composés s'accompagne d'une augmentation de volume de la phase solide qui exerce dans les mortiers de violentes pressions qui conduisent à sa destruction. Il est à noter qu'en plus de l'expansion, la lixiviation des ions calcium de la Portlandite et des C-S-H accroît la porosité du mortier qui permet alors une accélération du transfert des ions agressifs au sein du matériau [170].

5.2.7.2 Lixiviation simple et accélérée

La dégradation du béton par lixiviation simple, causée par l'eau pure, est un processus généralement lent qui dure des centaines d'années. Pour accélérer le processus de lixiviation et faciliter l'expérimentation à l'échelle du laboratoire, les chercheurs utilisent souvent des solutions plus agressives telles que les acides, l'acide sulfurique (H_2SO_4) ou acide nitrique (NH_4NO_3), ce dernier permet d'augmenter la cinétique de lixiviation de 100 fois par rapport à l'eau pure [169].

L'attaque du béton par les sulfates est un processus très complexe et sa résistance à la lixiviation est affectée par plusieurs facteurs tels que, le type de ciment, la concentration en sulfate, les ajouts minéraux utilisés et la période d'exposition. C'est dans ce sens que cette partie expérimentale étudie la durabilité de matériaux cimentaire réalisés à base de granulats recyclés sous ces deux types : sable et gravier.

Afin de bien évaluer le comportement mécanique et de durabilité des mortiers et des bétons recyclés dans des milieux sulfatiques, nous avons utilisé comme solution agressive l'acide sulfurique afin d'étudier les conséquences de la lixiviation sur les propriétés de nos matériaux. Les processus qui sont associés à la sulfatation, conduisent normalement à une décalcification de la pâte de ciment, ce qui entraîne une réduction du pH.

5.2.7.3 Procédure expérimentale

Les différents composites étudiés dans ce travail expérimental sont réalisés conformément aux normes en vigueur. Ils sont subis une cure, pendant 28 jours, dans l'eau à une température $20\pm2^\circ C$. Neuf éprouvettes cylindriques $5x10\text{ cm}^2$ retenue pour chaque type de mortier et neuf échantillons prismatiques $5x5x10\text{ cm}^3$ pour chaque béton, obtenues par découpage des éprouvettes cubiques $10x10x10\text{ cm}^3$ dans le sens du coulage du béton. Tous les éprouvettes sont rectifiées et surfacées mécaniquement puis recouverte avec de la résine de silicium sur les faces supérieures et inférieures. Nous avons préparé une solution d'acide sulfurique avec une concentration de 0,25M. Le volume de solution est préparé suffisamment important, trois fois le volume des échantillons, pour que le choix de non renouvellement de la solution au cours de l'essai soit validé par suivi du pH. Le pH initial de la solution est de l'ordre 1 en début d'essai ; il se stabilise rapidement autour de 2. Les éprouvettes sont ensuite plongés dans les différentes solutions, trois échantillons sont conservés dans l'eau pour servir comme témoins, les six restantes sont immergées dans la solution d'acide sulfurique, figure 5.11. L'ensemble est conservé dans une salle sombre et ventilée à $20^\circ C$. Le suivi de perte de masse a été mesuré à 7, 14, 21 et 28 jours de conservation, après rinçage par l'eau déminéralisée et élimination de la couche superficielle du gypse. En fin d'essai, les échantillons sont retirés des bacs, les films de résine sont enlevés et ils sont rincés par immersion pendant trois jours

dans de l'eau pure renouvelable. Après le séchage à 60°C, jusqu'à masse constante, trois de ces échantillons sont rompus au cours d'un essai brésilien (essai de fendage) puis soumise au test de coloration à la phénolphthaléine sur une fracture fraîche, de manière à identifier la zone dégradée et calculer la vitesse de lixiviation. Et les trois autres, utilisées pour les essais de caractérisations de perte de masses et la mesure de la résistance en compression. Les pertes de masses en salle sèche (Δm) sur les masses initiales à la sortie des bains, sont déterminées suivant la formule suivante (équation 5.13).

$$\Delta m = \frac{m_{(t)} - m_i}{m_i} \quad [\text{Eq. 5.13}]$$

Où : $m_{(t)}$: est la masse au temps t et m_i : est la masse initiale de l'échantillon.



a- Éprouvettes de mortiers

b- Echantillons de bétons

Figure 5.11 Bacs d'immersion des échantillons dans la solution d'acide sulfurique

5.2.8 Cycles thermiques 20°C/80°C

L'objectif de cette étude est centré sur l'effet des cycles thermiques 20°C/80°C sur le comportement des matériaux cimentaires incorporant des granulats recyclés. Il nous a paru intéressant d'évaluer l'impact des températures supérieures à la moyenne ambiante sur les propriétés mécaniques des mortiers. Les cycles thermiques appliqués varient de 20°C à 80°C. On conçoit en effet aisément que les variations de température peuvent générer au sein de la matrice cimentaire, des contraintes importantes susceptibles de conduire à des fissures et par conséquent, à une réduction de la durabilité.

5.2.8.1 Mode opératoire

Pour réaliser cette étude, nous avons soumis trois éprouvettes cylindriques 50x100 mm, de chaque type de mortiers à base de RSB, à 12 cycles thermiques 20°C/80°C. Au terme de ces cycles, nous avons étudié la variation de masse et la résistance en compression. Les étapes opératoires sont les suivantes :

- ✓ Cure de 28 jours en ambiance humide (20°C et 100% d'humidité) puis conservation dans une salle sèche (20°C et 50% d'humidité) pendant 48 heures.

- ✓ Echauffement des éprouvettes dans une étuve à 80°C pendant 12 heures.
- ✓ Refroidissement et maintien des éprouvettes dans la salle humide pendant 12 heures.
- ✓ Reprise du cycle par échauffement à 80°C pendant 12 heures.
- ✓ Après chaque cycle (Echauffement-Refroidissement), on procède à la mesure de perte de masse ($\Delta M/M$).
- ✓ Au terme du 12^{ème} cycle on procède à une caractérisation générale destructive.

5.2.9 Diffusion des ions chlorures

5.2.9.1 Introduction

La pénétration des ions chlorures est l'une des principales causes de dégradation des ouvrages en béton armé. Les ions chlorures pénètrent dans le béton sous différentes façons :

- ✓ par diffusion sous l'effet du gradient de concentration entre la surface et le cœur du béton (dans le cas de structures immergées dans l'eau salée).
- ✓ par absorption capillaire, par convection et par diffusion (dans un milieu partiellement saturé ou soumis à des cycles d'humidification et de séchage).

Les ions chlorures dans le béton sous deux formes : les chlorures libres qui sont présents dans la solution aqueuse interstitielle et les ions chlorures liés chimiquement ou physiquement. La capacité de fixation des ions chlorures dépend fortement de la nature du ciment utilisé et principalement de sa teneur en C₃A et C₄AF. Par ailleurs, seuls les chlorures libres peuvent diffuser et jouer un rôle actif dans le processus de dépassivation et la corrosion des armatures [169]

5.2.9.2 Objectif de l'étude

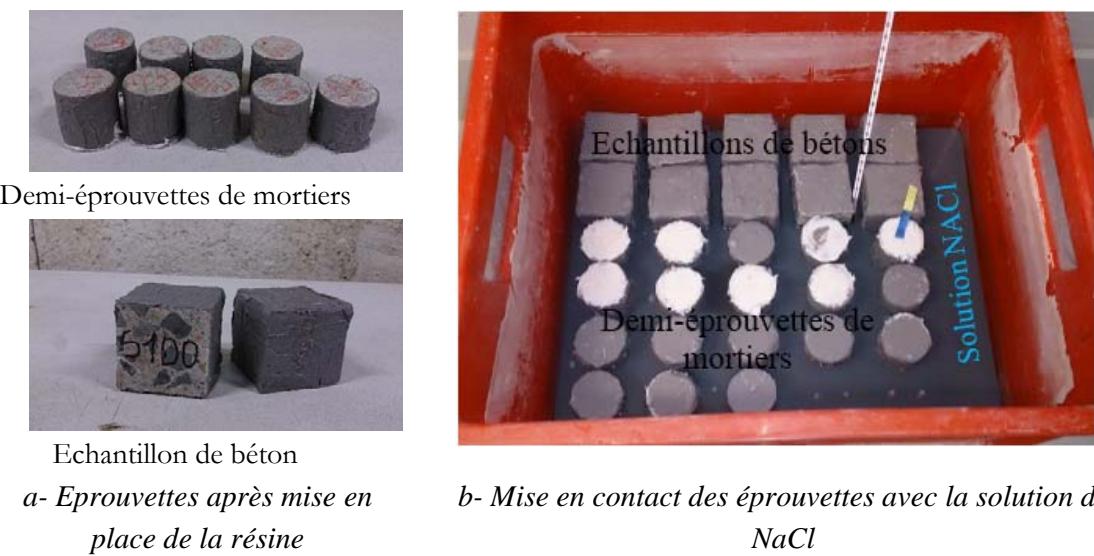
Notre étude a pour but principalement de déterminer la profondeur de pénétration des ions chlorures dans la matrice cimentaire mises en contact avec une solution saline. Sans détailler les propriétés et les mécanismes de transfert des ions chlorures. Le coefficient de diffusion apparent est ensuite calculé à partir des résultats d'essais.

5.2.9.3 Mode opératoire

Dans cette étude, les techniques colorimétriques sont utilisées pour la détermination de la diffusion des ions des chlorures dans les matériaux cimentaire, le Protocol d'essai est tiré et réalisé selon les démarches proposées par V. Baroghel-Bouny [171], détaillé par Dang Tuan Anh dans sa thèse [169].

Nous avons utilisé deux types d'éprouvettes : une éprouvette cylindrique (4x8 cm²) de chaque formulation de mortiers à base de RSB et un échantillon prismatique (5x5x10 cm³), découpée dans le sens du coulage, d'une éprouvette cubique (10x10x10 cm³) de chaque type de béton, soit un total de 18 éprouvettes de mortiers et 10 de bétons. Les éprouvettes ont subi une cure de longue durée de 56 jours dans l'eau à 20°C, cela pour avoir une bonne hydratation et une stabilité du matériau.

L'essai de mesure consiste, tout d'abord, à couper les échantillons en deux parties symétriques. Elles sont aussitôt saturées sous vide à l'aide d'une solution très basique de NaOH (0,1 Mol/l), afin de maximiser la pénétration des chlorures libres dans le matériau cimentaire. Après 24 heures, de se maintenir sous vide, les échantillons sont retirés de la cloche à vide, ensuite, les surfaces sont enduites d'une résine silicone sauf la surface fraîchement sciée qui sera la base de l'échantillon, figure 5.12-a. Ensuite, les éprouvettes sont placées sur leurs bases, à l'aide des cales, dans un bac avec couvercle. Elles sont immergées partiellement dans une solution composée de NaCl (0,51 mol/l) et NaOH (0,1 mol/l), sur une hauteur de 2 cm au-dessus des cales. Afin d'empêcher l'évaporation de l'eau, odeur du NaOH le bac est fermé et mis dans une salle aérée et à une température réglée à $20 \pm 2^\circ\text{C}$, figure 5.12-b. Après 28 jours de conservation, les spécimens sont débarrassées de la couche de résine et sont soumis par la suite à un essai de fendage dans le sens longitudinal, ensuite les facettes rompues sont pulvérisées d'une solution de nitrate d'argent (AgNO_3) 0,1 Mol/l.



a- Eprouvettes après mise en place de la résine

b- Mise en contact des éprouvettes avec la solution de NaCl

Figure 5.12 Préparation des éprouvettes pour l'essai de diffusion des chlorures

La profondeur de pénétration des ions de chlorures (X_d) est mesurée de l'épaisseur la zone blanche (couche contenant les ions chlorures), tandis que la zone saine est de couleur marron. Cette profondeur est la moyenne de six distances intermédiaires mesurées sur les deux faciès de rupture obtenue après fendage, après extraction des deux valeurs extrêmes, et arrondie au 0,1 mm.

A partir des valeurs de (X_d), le coefficient de diffusion apparent des ions de chlorures dans la condition saturée ($D_{ns(dif)}$) peut être calculé selon la formule suivante (équation 5.14) proposée par V. Baroghel-Bouny et al. [171] :

$$D_{ns(dif)} = \frac{X_d^2}{4 \cdot t} \quad [\text{Eq. 5.14}]$$

Avec :

$D_{ns(dif)}$: Coefficient de diffusion apparent des ions chlorures dans la condition saturée (m^2/s)

II.5 Dispositifs et essais de caractérisation mécanique et de durabilité

X_d: Profondeur de pénétration des ions chlorures (m)

t: Temps d'immersion des éprouvettes dans la solution (s).

Troisième Partie

Etude des mortiers de maçonnerie

Chapitre 6

Caractérisation des matériaux et propriétés des mortiers à l'état frais

6.1 Introduction

Cette troisième partie porte sur l'étude de l'incorporation du sable recyclé avec et sans fillers ($< 125 \mu\text{m}$) dans les mortiers de maçonnerie et leurs influences sur les propriétés de ces mortiers, avec et sans adjuvants, à l'état frais et durci. Pour se faire, quatre séries de mortiers de maçonnerie ont été réalisées, en substituant le sable naturel par le sable recyclé avec et sans fillers et avec différents pourcentages volumiques. En total, vingt-cinq mélanges de mortiers ont été fabriqués, en se basant sur la méthode du mortier de béton équivalent, avec une quantité de pâte constante de 506 kg/m^3 et un taux de sable recyclé variable de 15 à 100% ce qui a conduit à un rapport eau sur ciment (E/C) variable de : 0,5 à 0,77, tout en gardant une ouvrabilité constante et ceci pour toutes les combinaisons.

Cette étude se structure en quatre parties. Dans la première, on définit les matériaux utilisés pour la confection des mortiers et leurs principales caractéristiques sont décrites. Dans la deuxième, on présente la détermination des propriétés aux jeunes âges des différents mortiers élaborés. La troisième partie détaille l'ensemble des essais effectués sur les différents mortiers à l'état durci et en fonction du temps. Ainsi que l'étude des propriétés physiques et les indicateurs relatifs à la durabilité de ces mortiers. Enfin, en dernière partie des conclusions et des recommandations, pour permettre de mieux maîtriser l'effet de l'incorporation des granulats recyclés et leur optimum dans les mortiers recyclés, sont apportées.

6.2 Caractérisation des constituants de base

6.2.1 L'eau

L'eau utilisée pour l'ensemble des essais est celle du robinet exempte d'impuretés, qui répond aux prescriptions de la norme NF EN 1008 : 2003.

6.2.2 Ciment

Dans cette étude, le liant hydraulique utilisé est un ciment Portland CEM I 52,5 N, d'une densité relative de 3,15 et une surface de Blaine égale à $4320 \text{ cm}^2/\text{g}$. Produit par la cimenterie de LAFARGE du Teil (France) conforme à la norme NF EN 197-1 : 2012. Sa composition

minéralogique (analyses par DRX) et sa composition chimique (réalisée par spectrométrie de fluorescence X) sont reportées dans les tableaux 6.1 et 6.2 respectivement.

Tableau 6.1 Composition minéralogique du ciment CEM I 52,5 N utilisé.

Phase	Masse en %
Alite ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) ou ($\text{C}_3\text{S}$)	56,87
Belite ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) ou ($\text{C}_2\text{S}$)	21,18
Aluminate ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) ou ($\text{C}_3\text{A}$)	4,14
(Ferrite) ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) ou ($\text{C}_4\text{AF}$)	11,32
Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	1,85
(Chaux libre)	0,42
Arcanite (K_2SO_4)	2,2

Tableau 6.2 Composition chimique du ciment CEM I 52,5 N utilisé

Ciment	Poids des oxydes (%)									
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	MgO	Na ₂ O	Cl-	Total
CEM I 52,5 N	70,3	21,2	3,9	0,6	0,3	3,3	-	-	-	99,7

6.2.3 Adjuvant

L'adjuvant utilisé dans cette étude est un Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau de type Sika Viscocrete TEMPO 11, conforme à la norme NF EN 934-2+A1 : 2012, voir Annexe 2. C'est un liquide brun clair à base de copolymère acrylique, ses caractéristiques principales sont données dans le tableau 6.3 :

Tableau 6.3 Caractéristiques principales un Superplastifiant utilisé

Dénomination	Masse volumique (g/cm ³)	Plage de dosage préconisé (% massique de ciment)	Extrait sec	Teneur en Cl- (%)
Sika Viscocrete TEMPO 11	1,06	0,3 à 3,0	$30,0 \pm 1,5\%$	$\leq 0,1$

6.2.4 Sables

Dans cette partie, on a utilisé deux types de sables de fraction (0/3,15) :

- Sable alluvionnaire (NSB), siliceux, provenant de la région de Bretagne - France ;
- Sable recyclé (RSB), il est obtenu à la suite d'écrasement des éprouvettes de béton ordinaire de résistance moyenne de 30 MPa, âgées moins de 06 mois et concasser dans un concasseur à mâchoire au niveau du laboratoire.

6.2.4.1 Caractéristiques chimiques et minéralogiques des sables

La caractérisation des sables, notamment les recyclés, a été effectuée par différentes méthodes d'analyse :

- **Analyse par fluorescence X**

Les compositions minéralogiques des sables utilisés ont été déterminées par spectrométrie de fluorescence X (§ 3.3.1.3). Les proportions des oxydes donnés dans le tableau 6.4 sont déterminées à partir des proportions massiques des minéraux :

Tableau 6.4 Compositions chimiques des sables utilisés

Matériaux	Oxydes en (%)								
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	MgO	Total
NSB	0,1	93,3	4,3	0,1	2,1	0,0	0,1	-	99,8
RSB	15,4	66,7	6,2	0,6	1,2	1,1	0,3	-	91,5
Fillers de RSB	25,1	48,0	8,8	0,8	1,6	1,6	0,4	-	86,2

- **Analyse par DRX**

Les compositions minéralogiques du sable naturel alluvionnaire (NSB) et du sable recyclé (RSB) déterminés par DRX sont représentées dans la figure 6.1.

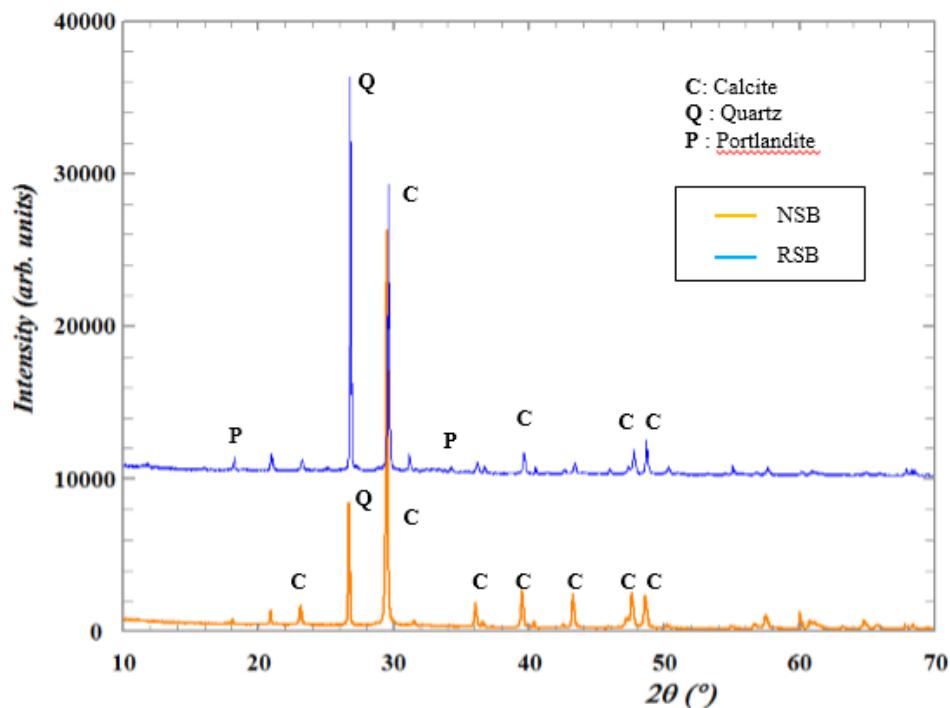


Figure 6.1 Analyse des sables utilisés par DRX

- **Analyse par calcimétrie**

La teneur en carbonate contenue dans le sable recyclé pour les trois fractions (0-0,063 mm ; 0,063-0,125 mm et 0,125-3,15 mm) a été déterminée par la méthode de calcimètre, selon la Norme NF P 94-048 : 1996 (§ 3.3.1.1).

Tableau 6.5 Dosage de la teneur en carbonate de calcium par calcimétrie

Échantillons	Pourcentage de CaCO ₃
RSB	9,0 %
Fillers de RSB (<125µm)	19,6 %
Fines de RSB (<63µm)	32,0 %

- Dissolution par l'acide

Tableau 6.6 Dissolution des différentes fractions du RSB dans l'acide chlorhydrique (0,1N)

Fraction granulaire	< 63µm	63µm - 250µm	250µm - 1mm	1mm - 3,15mm
Perte de poids (%)	9,4	14,4	9,3	5,7

- Analyse thermogravimétrique

L'analyse thermogravimétrique du sable recyclé (RSB) est donnée par la figure 6.2.

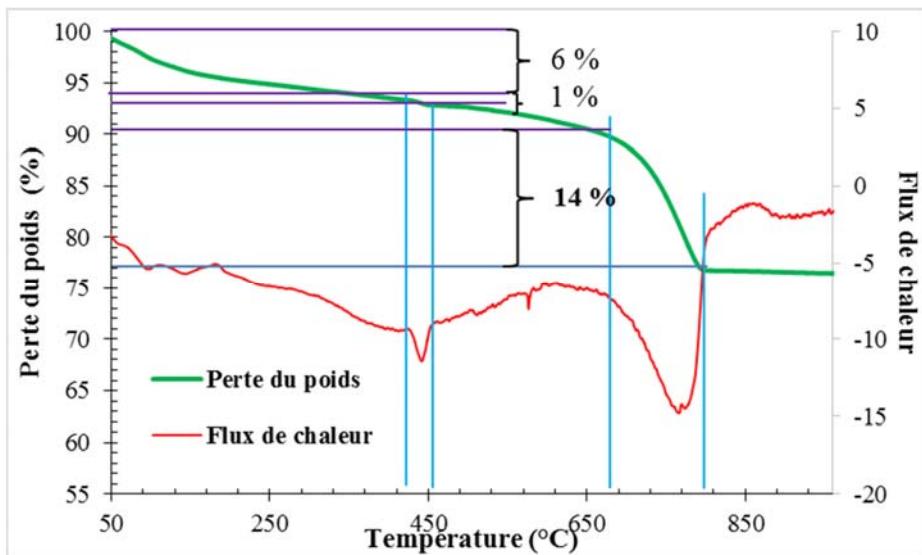


Figure 6.2 Analyse thermogravimétrique du sable recyclé et sable calcaire

Pour une température comprise entre (450 à 540°C) selon le rapport LCPC [172], on observe la décomposition de la Portlandite Ca(OH)_2 en chaux libre et l'évaporation de l'eau selon la réaction suivante :

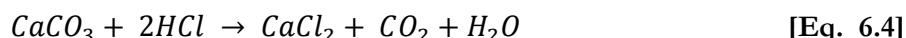
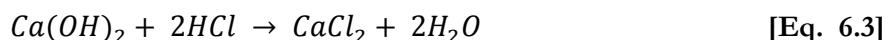


A la température 573 °C, la transformation allotropique du quartz α en quartz β accompagnée d'un phénomène de dilatation (fissuration des granulats siliceux). Et à la température de (700 - 900 °C) Le carbonate de calcium se décompose en libérant de la chaux, c'est la décomposition des calcaires suivant la réaction :



6.2.4.2 Interprétation des résultats de caractérisation chimiques et minéralogique

Le tableau 6.4 montre que le NSB est un sable siliceux avec 93% de silice et le pourcentage de 67% de silice dans le RSB montre que les granulats utilisés dans la formulation du béton parent (béton d'origine) sont siliceux. Cependant, la composition chimique de ce sable est semblable à celle du ciment. D'où les pourcentages des oxydes de calcium, de fer et de d'aluminium dans le RSB sont supérieurs à ceux dans le NSB et les taux de ces oxydes sont nettement importants dans les fillers du RSB, ceci est dû principalement à la présence des hydrates de ciments dans le RSB provenant du RMC. Cette conclusion est confirmée par la figure 6.1 qui dévoile l'existence du Portlandite dans le RSB contrairement dans le NSB. Le tableau 6.5, montre que la teneur de carbonate de calcium ($CaCO_3$) dans les fines du RSB est le double de celle dans les fillers et trois fois supérieures à celle dans le RSB. La quantité du $Ca(OH)_2$ et de la calcite est importante dans la fraction de 63 à 250 μm du RSB, d'où un fort pourcentage de perte du poids de 14% pour cette fraction contre 6% de perte de poids seulement pour la fraction de 1 à 3,15mm. Ceci est la conséquence de leurs dissolutions dans l'acide chlorhydrique (HCl) données par le tableau 6.6 et selon la réaction chimique (équations 6.3 et 6.4) [173] :



L'analyse thermogravimétrique du sable recyclé (figure 6.2) a conduit à un pourcentage de 4 % de Portlandite seulement contre 32 % de calcite.

6.2.4.3 Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques des sables sont déterminées conformément aux normes en vigueur et les résultats d'essais sont consignés dans le tableau 6.7. L'analyse granulométrique des sables naturels et recyclés a été réalisée selon la norme NF EN 933-1, en utilisant la technique du tamisage par voie sèche sur une fraction de 1050 g de matériau après avoir éliminé les fines par l'eau. Les résultats de cette analyse sont reportés sur la figure 6.3.

Tableau 6.7 Caractéristiques physiques des sables utilisés

Caractéristiques physiques	U.	NSB (0/3,15)	RSB (0/3,15)	RS-F (0,125/3,15)
Masse volumique apparente	kg/m ³	1406	1191	1238
Masse volumique réelle	kg/m ³	2588	2581	2594
Module de finesse	FM	2,38	2,94	3,15
Teneur en fillers (< 125 μm)	Fil (%)	1,4	10,7	-
Teneur en fines (< 63 μm)	TF (%)	0,40	5,62	0
Equivalent de sable	SE (%)	92,52	87,33	-
Teneur en eau	W (%)	1,12	2,91	-
Absorption d'eau	Ab (%)	2,19	13,37	13,75

La masse volumique apparente du NSB est supérieure à celle du RSB alors que leurs masses volumiques réelles sont équivalentes, cela peut être expliqué par la nature des gravats, de masse volumique est de l'ordre $2,7 \text{ g/cm}^3$, dont est issu le RSB d'une part et l'omission de la partie fine ($<63\mu\text{m}$) dans le calcul des densités selon la norme NF EN 1097-6 : 2013 d'autre part. En outre, l'absorption d'eau du RSB est conséquente de 13%, sept fois plus élevée que celle du NSB. Cette valeur semble élevée par rapport à celle constatée dans la littérature [6 ; 9 ; 51 et 156]. Plusieurs paramètres ont été identifiés pouvant affecter la densité et l'absorption d'eau, comme la nature et la qualité les matériaux de base, la taille, la porosité du RMC et le mode de concassage qui influe directement la rugosité du RSB ainsi que le taux de fines.

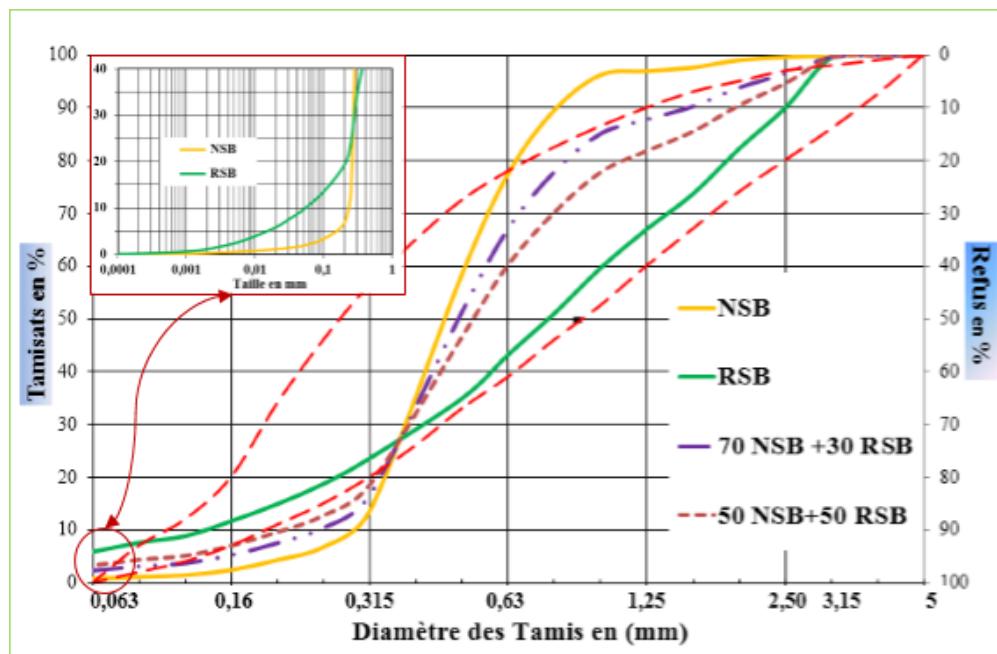


Figure 6.3 Courbes granulométriques des sables utilisés (Par tamisage et par Laser)

La figure 6.3 montre que la granularité du RSB est bien étalé, toutefois c'est un sable grossier avec un MF=2,94, alors que le NSB est constitué en majorité par la fraction (0,315/1,25), c'est un sable plutôt fin avec MF=2,38. L'analyse granulométrique par laser de la fraction 0-200 μm a révélé que le sable recyclé renferme un taux élevé de fines ($< 63\mu\text{m}$) et fillers ($< 125\mu\text{m}$) soit 6% et 11% respectivement, contrairement au sable naturel qui contient 0,4% de fines et seulement 1,4 % de fillers.

La substitution volumique du NSB par du RSB génère des sables plus au moins uniformes, comme celui (50% NS + 50% RS). Notant que le sable recyclé sans fillers (RSB-F) est obtenu par tamisage à sec du RSB.

6.3 Préparation et formulation des Mortiers

L'impact de l'incorporation du sable recyclé avec et sans fillers dans le squelette granulaire et en particulier de son état hydrique sur les propriétés du mortier a été étudié à partir de quatre séries.

III.6 Caractérisation des matériaux et propriétés des mortiers à l'état frais

La méthode de formulation des mortiers, pré-humidification des sables recyclés, le mode de malaxage et l'échantillonnage sont détaillés dans le chapitre (voir § 4.1.1). Les différentes compositions de mortiers de maçonnerie réalisées sont représentées dans les tableaux 6.8 et 6.9.

Tableau 6.8 Différentes Compositions des mortiers formulés à base de RSB.

Séries	Mortiers	Ciment (kg/m ³)	NSB (kg/m ³)	RSB (kg/m ³)	E (L)	Ead (L)	ETot (L)	ETot/C	SP (% C)
Série 1	M0	506	1518	0	253	0	253	0,50	-
	M15	506	1290	227	253	20	273	0,54	-
	M30	506	1062	454	253	41	294	0,58	-
	M40	506	911	605	253	54	307	0,61	-
	M50	506	759	757	253	32	321	0,63	-
	M75	506	379	1135	253	102	355	0,70	-
Série 2	M100	506	0	1514	253	136	389	0,77	-
	M15A	506	1290	227	253	2	255	0,50	0,5
	M30A	506	1062	454	253	4	256	0,51	1,0
	M40A	506	911	605	253	7	260	0,51	2,0
	M50A	506	759	757	253	11	264	0,52	3,0
	M75A	506	379	1135	253	14	267	0,53	4,0
Série 2	M100A	506	0	1514	253	21	274	0,54	6,0

(A) : Mortier avec du superplastifiant

Tableau 6.9 Différentes Compositions des mortiers formulés à base de RSB-F

Séries	Mortiers	Ciment (kg/m ³)	NSB (kg/m ³)	RSB-F (kg/m ³)	E (L)	Ead (L)	ETot (L)	ETot/C	SP (% C)
Série 3	M15-F	506	1518	0	253	0	253	0,50	-
	M30-F	506	1290	226	253	11	264	0,52	-
	M40-F	506	1062	453	253	23	276	0,54	-
	M50-F	506	911	604	253	33	286	0,57	-
	M75-F	506	759	755	253	45	298	0,59	-
	M100-F	506	379	1132	253	68	321	0,63	-
Série 4	M15-FA	506	1290	226	253	1	253	0,50	0,15
	M30-FA	506	1062	453	253	1	254	0,50	0,25
	M40-FA	506	911	604	253	2	255	0,50	0,5
	M50-FA	506	759	755	253	4	256	0,51	1,0
	M75-FA	506	379	1132	253	11	264	0,52	3,0
	M100-FA	506	0	1510	253	0	253	0,50	6,0

(A) : Mortier avec du superplastifiant

Le dosage du SP est plus élevé dans la 2^{ème} série de mortiers à base de RSB par rapport à celui de la 4^{ème} série à base du RSB-F, cela est dû au à l'effet des fillers qui sont caractérisés par des surfaces spécifiques importantes.

6.4 Caractérisation et propriétés des mortiers à l'état frais

6.4.1 Introduction

Dans cette partie, nous présentons l'ensemble des résultats du comportement rhéologique des mortiers recyclés en les comparants notamment à ceux du mortier de référence. Nous détaillerons les différentes caractéristiques physiques des mortiers de maçonnerie à l'état frais. Nous intéresserons à l'exploitation des mesures d'affaissement au cône d' Abrams, des masses volumiques, le volume d'air occlus, la plasticité et la résistance au cisaillement, pour mettre en évidence l'impact des granulats recyclés sur les comportements rhéologiques des mortiers :

- La relation entre le pourcentage des fillers du sable recyclé et la quantité d'eau de pré-mouillage et leur incidence sur le rapport E/C.
- l'influence de l'incorporation du superplastifiant/haut réducteur d'eau et son dosage sur les propriétés physiques des mortiers.

6.4.2 Volume d'air occlus

Les volumes d'air occlus des mortiers élaborés dans notre étude sont reportés dans le tableau 6.10.

Tableau 6.10 Le volume d'Air Occlus dans les mortiers.

Mortiers avec fillers	M0	M15	M30	M40	M50	M75	M100	M15A	M30A	M40A	M50A
Air Occlus (%)	6,4±0,3	7,2±0,5	6,3±0,3	7,6±0,4	7,0±0,3	6,1±0,4	5,7±0,2	6,5±0,4	5,2±0,4	4,5±0,4	2,7±0,3
Mortiers sans fillers	M0	M15-F	M30-F	M40-F	M50-F	M75-F	M100-F	M15A-F	M30A-F	M40A-F	M50A-F
Air Occlus (%)	6,4±0,3	7,3±0,4	6,9±0,2	6,7±0,4	7,4±0,5	7,1±0,6	6,1±0,6	4,6±0,3	4,3±0,5	4,1±0,4	4,3±0,3

Le tableau 6.10 regroupe les résultats de mesures d'air occlus effectuées sur le mortier de référence et sur les mortiers recyclés avec et sans du superplastifiant, à base du sable avec et sans fillers. Les résultats retenus représentent la moyenne de trois mesures. On constate que l'ajout des granulats recyclés tend à favoriser l'emprisonnement d'air dans la matrice. Le volume d'air occlus augmente légèrement de 6,4 % pour le mortier de référence jusqu'à 7,6% et 6,7% pour les mortiers incorporant 40% de RSB et RSB-F, respectivement. L'augmentation significative du volume d'air occlus dans les mortiers composites de RSB-F est sans doute liée à la morphologie des granulats qui enferment des bulles d'air comme cela a été indiqué dans le paragraphe précédent.

Cependant, le comportement rhéologique est modifié par le superplastifiant, et on constate que volume d'air occlus diminue avec l'augmentation du remplacement du sable naturel et a fortiori avec l'augmentation du dosage en superplastifiant. Par exemple pour un dosage maximum de superplastifiant qui de l'ordre de 3%, on enregistre une diminution de l'air occlus de 10%.

6.4.3 Masse volumique apparente

Les masses volumiques apparentes des mortiers (ρ_{app}) sont déterminées selon la norme NF EN 1015-6/A1 : 2007. L'évolution de la masse volumique à l'état frais des mortiers en fonction de la teneur volumique en sable recyclé (%) est donnée par la figure 6.4 et 6.5.

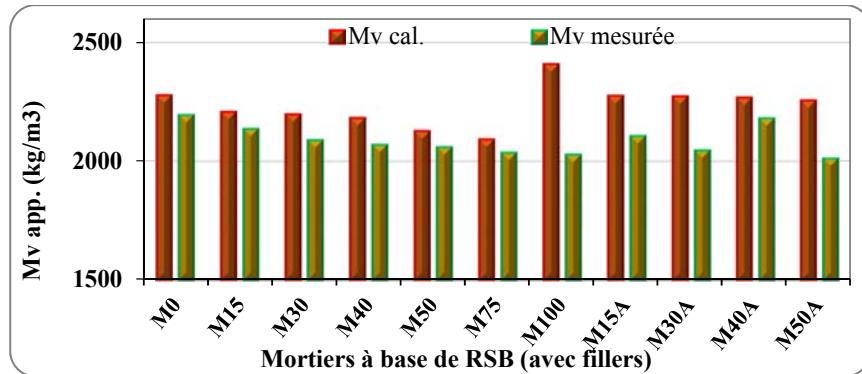


Figure 6.4 Masses volumiques à l'état frais des différents mortiers à base de RSB.

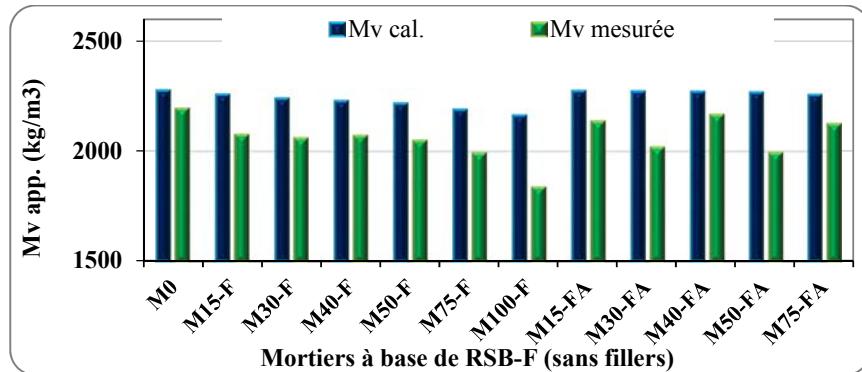


Figure 6.5 Masses volumiques à l'état frais des différents mortiers à base de RSB-F.

Les résultats obtenus montrent qu'il y a une diminution de la masse volumique de tous les mortiers sans adjuvants, pour les deux séries, cette diminution est plus prononcée avec l'augmentation du taux en RSB. Les valeurs de la masse volumique diminuent de 2277 kg/m³ pour le mortier de référence à 2088 kg/m³, 2058 kg/m³ et 2027 kg/m³, respectivement, pour les mortiers contenant 30%, 50 et 100% de RSB. La réduction de la masse volumique des mortiers recyclés à 100% par rapport à celle du M0 représentent 6% et 3% pour le RSB et RSB-F, respectivement. Suite à l'équivalence des masses volumiques réelles des sables utilisés, cette diminution est attribuable principalement à l'augmentation de la teneur en eau avec l'augmentation de la teneur en sable recyclé. Une légère augmentation des masses volumiques des mortiers adjuvantés (2^{ème} et 4^{ème} séries) est constatée. Ces résultats concorde avec ceux trouvés par Fernández-Ledesma (2016) [71] : une légère diminution était attendue en raison de l'augmentation légère de la teneur en eau, seulement une diminution maximale de 1% pour RSB=50% et une augmentation de 1% pour RSB-F=75%. Ces résultats peuvent être expliqués de trois manières différentes. La plus grande quantité des particules très fines (<0,063 mm) dans le RSB qui à faible taux de remplacement a un effet sur

la compacité matrice de mortier produit par conséquent une densité plus élevée. Le coefficient d'uniformité plus élevé de RCA donne une plus grande compacité au mélange (27 ,28). La plus faible densité de particules du RCA, à des taux de remplacement supérieurs à 25%, a un effet plus important que les deux précédents. Cela est probablement dû à l'effet du superplastifiant qui améliore la compacité du mortier avec un volume d'air occlus = 2,7% seulement (mortier M75-FA).

6.4.4 Maniabilité

La maniabilité des mortiers a été déterminée, à l'aide d'un mini cône "Mortier Béton Equivalent" (MBE), selon le protocole décrit dans le chapitre 4 (§ 4.2.3).

Les valeurs de l'affaissement du mortier à différentes formulations, sont données par la figure 6.6. Celle-ci montre que, à $t=0$ s : l'affaissement reste toutefois similaire pour tous les mortiers à base de RSB et sans adjuvant (1^{ère} Série). On rappelle que dans notre cas, le mortier de référence, correspond à une teneur de 0% en sable recyclé a été élaboré avec un rapport E/C = 0,5. Lors de la substitution du sable naturel par celui recyclé, la quantité d'eau ajoutée est lié directement avec le taux de RSB, provoquée par la forte absorption d'eau des recyclés (13%) par rapport au sable naturel siliceux (environ 2%) et aux différences de granulométrie entre le NSB fin et le RSB grossier. L'accroissement du taux de sable recyclé sans fillers (RSB-F) dans les mortiers (3^{ème} série), augmente légèrement l'affaissement du mortier. Cette maniabilité peut être expliquée par la qualité rugueuse du sable recyclé et la texture sphérique du sable naturel et le pourcentage d'eau ajoutée lors de pré-mouillage du sable (6%).

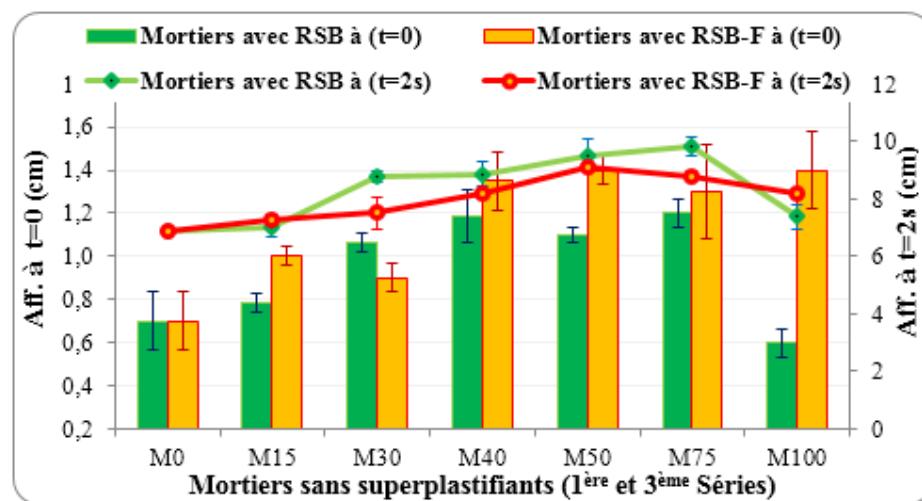


Figure 6.6 Affaissement des mortiers sans superplastifiant.

L'incorporation du superplastifiant dans les mortiers (Figure 6.7), augmente légèrement l'affaissement du mortier, jusqu'à 50% de substitution. Le rapport E/C est presque constant et les variations d'affaissement sont plus remarquables pour les mortiers à base de RSB, Cette tendance est due à un surdosage en superplastifiant, qui est lié directement au taux des fillers dans les mortiers. Le meilleur affaissement pour la 2^{ème} série est constaté pour les mortiers M30A et M40A.

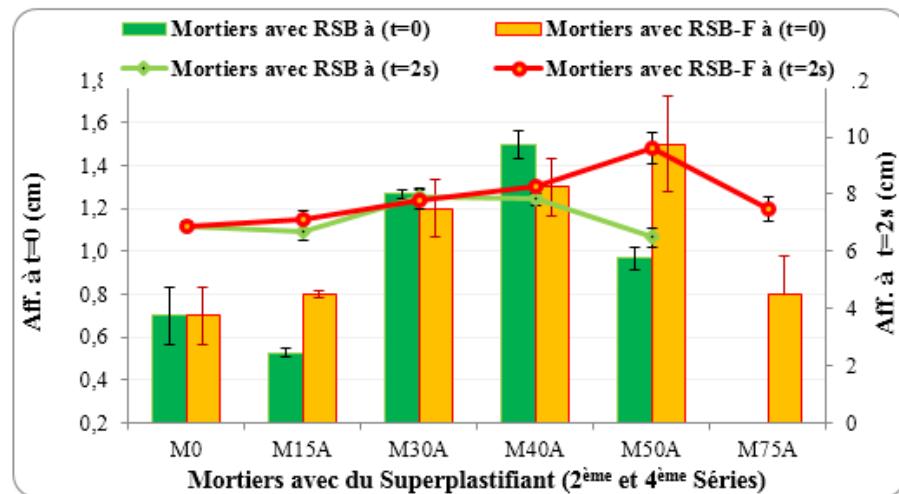


Figure 6.7 Affaissement des mortiers avec du superplastifiant.

Ces variations restent toutefois faibles par rapport à l'objectif de maintenir une rhéologie constante pour la composition des mortiers.

6.4.5 Plasticité des mortiers

La plasticité des mortiers confectionnés a été évaluée par le débit d'écoulement selon le protocole décrit dans le chapitre 4 (§ 4.2.4), et les résultats d'essai sont représentés dans la figure 6.8.

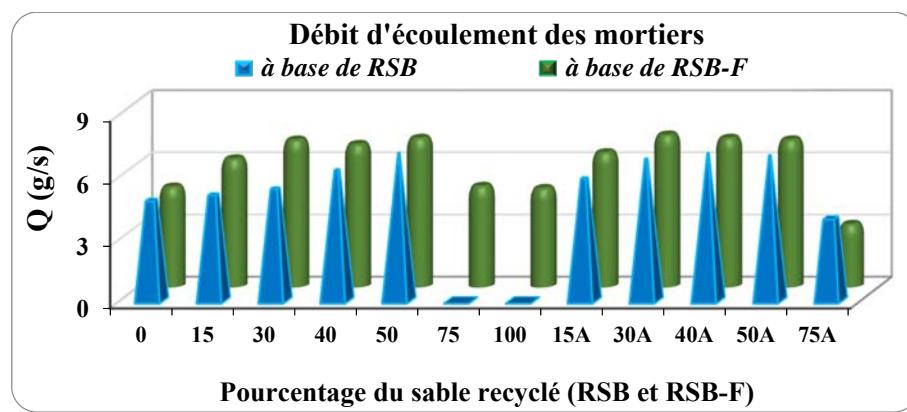


Figure 6.8 Débit d'écoulement des mortiers recyclés sans superplastifiant.

Au regard des résultats présentés dans la figure 6.8 relative au débit d'écoulement des mortiers, on constate que la fluidité des deux séries de mortiers sans adjuvant avec et sans fillers augmente avec l'augmentation de E/C sauf pour le M75 et M100 dont on a eu un colmatage au niveau de la trappe de sortie du plastimètre. Avec l'incorporation du superplastifiant, la fluidité du mortier (M30-FA) à base de 30 % de RSB-F est mieux que celle du même mortier avec fillers (M30A), à l'inverse pour le mortier à base de 50% de sable recyclé brut qui est plus plastique que celui sans fillers, cela dû au dosage du superplastifiant.

6.4.6 Résistance au cisaillement des mortiers

Les résultats obtenus des résistances au cisaillement des mortiers frais, déterminées à l'aide d'un scissomètre de laboratoire (voir § 4.2.5), sont données par la figure 6.9.

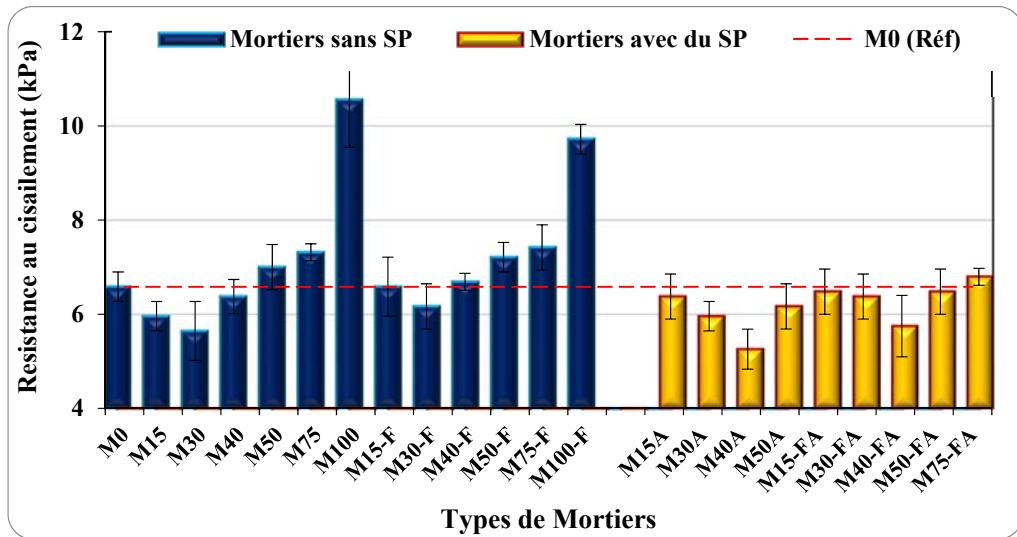


Figure 6.9 Résistance au cisaillement des mortiers formulés

L'influence des fillers sur la cohésion des mortiers recyclés par rapport au mortier témoin est bien remarquable. Pour des taux de RSB et RSB-F inférieur à l'optimum (30%), la résistance au cisaillement diminue progressivement, on enregistre des diminutions de 14% pour RSB=30% et seulement 6% pour RSB-F=30%. Au-delà de 30%, la cohésion des mortiers augmente en fonction du pourcentage du sable recyclé, elle atteint les maximums de 60% pour 100% de RSB et 48% pour RSB-F=100%. L'incorporation du superplastifiant dans les mortiers favorise l'éparpillement de leurs composants, notamment les mortiers à base de RSB, la réduction de résistance au cisaillement est de 6% pour M40A par rapport à M40 et de 11% pour M75-FA par rapport à M75-F.

6.4.7 Temps de prise des mortiers

Le temps de prise des mortiers a été déterminé selon la norme NF NE 480-2 : 2014 et à l'aide de l'appareil de Vicat automatique (§ 4.2.6), les résultats du temps de début et fin de prise des mortiers à base de RSB sont donnée par la figure 6.10.

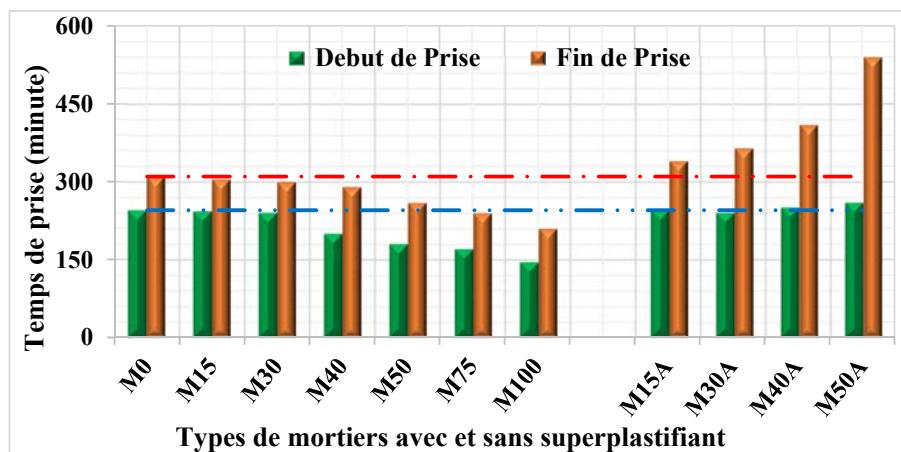


Figure 6.10 Temps de prise des mortiers à base de RSB

Le temps de prise des mortiers recyclés est influencé par l'absorption du sable recyclé, on constate, d'après la figure 6.10, que les temps de début et fin de prise diminuent avec l'augmentation du pourcentage du sable recyclé (RSB), une différence d'une heure et demi enregistrée entre le début de prise du mortier naturel et celui recyclé à 100%. Cependant, avec l'incorporation du superplastifiant dans les mortiers, on remarque que le temps de début de prise reste inchangé pour tous les mortiers adjutantés, qui est le même pour le mortier de référence soit 04 h 05 min. À l'inverse, le temps de fin de prise est conséquent soit presque quatre heures de différence entre le M50A et le M0. C'est sans doute, l'implication du superplastifiant, qui ralentit le temps d'hydratation du ciment.

Chapitre 7

Caractérisation des mortiers à l'état durci

7.1 Caractéristiques mécaniques

La caractérisation mécanique des mortiers est basée sur leurs résistances en compression uniaxiale, flexion simple 3 points et à la traction par fendage. Les essais mécaniques statiques ont été réalisés à l'aide d'une presse type Instron® Zwick/Roell (voir § 5.1), et à des échéances de : 7, 28 et 56 jours, conformément à la norme NF EN 1015-11/A1 : 2007.

7.1.1 Résistance à la Flexion

L'essai de flexion trois points a été déterminé sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16 cm³). Les résultats des résistances à la flexion des différents mortiers sans et avec du superplastifiant sont représentés sur les figures 7.1 et 7.2, respectivement.

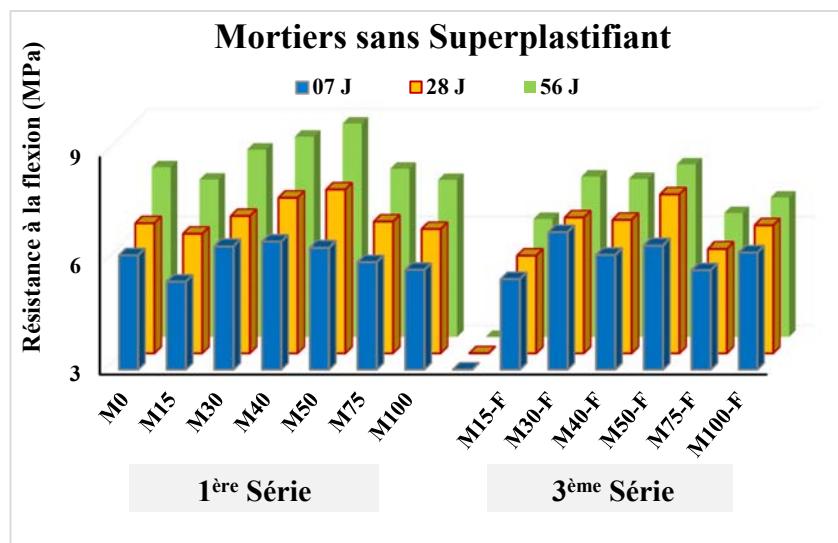


Figure 7.1 Résistance à la flexion des différents mortiers sans adjuvant

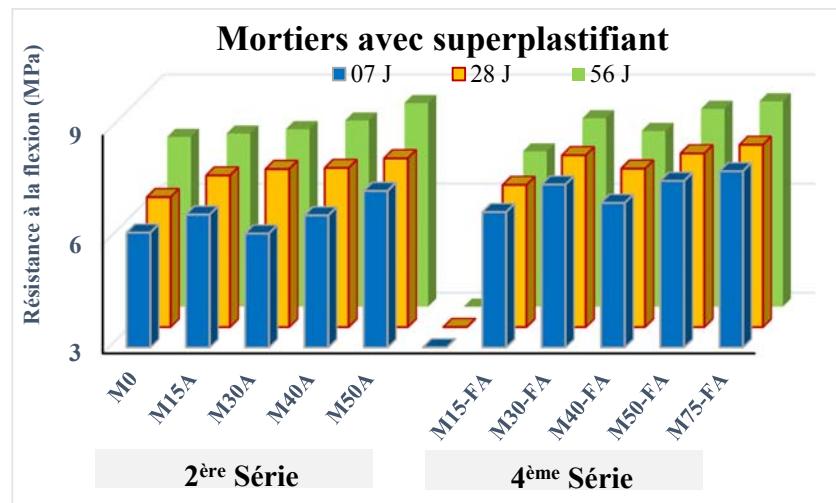


Figure 7.2 Résistance à la flexion des différents des mortiers adjuvants

7.1.2 Résistance à la compression

Les résistances en compression uni-axiale, mesurées sur les demi-prismes des éprouvettes obtenues après leur rupture par flexion, des différents mortiers sont illustrées par les figures 7.3 et 7.4. Elles correspondent à la moyenne des valeurs obtenues pour les six éprouvettes.

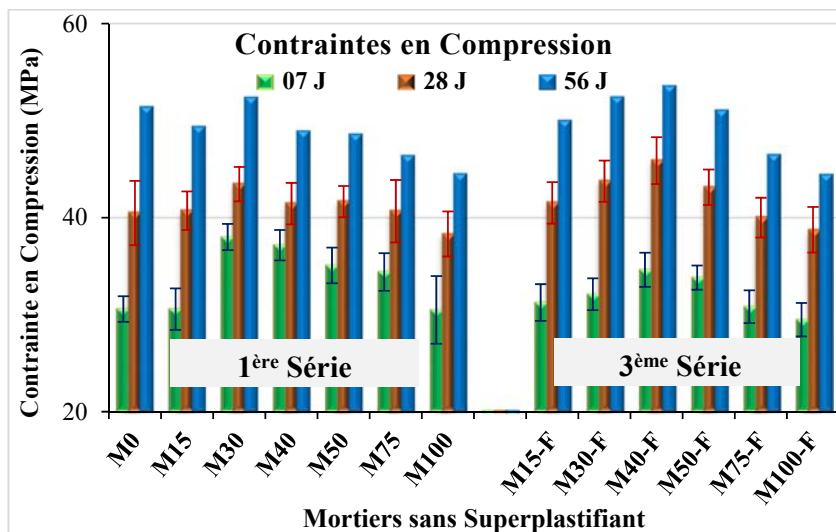


Figure 7.3 Résistance en compression simple des mortiers sans superplastifiant

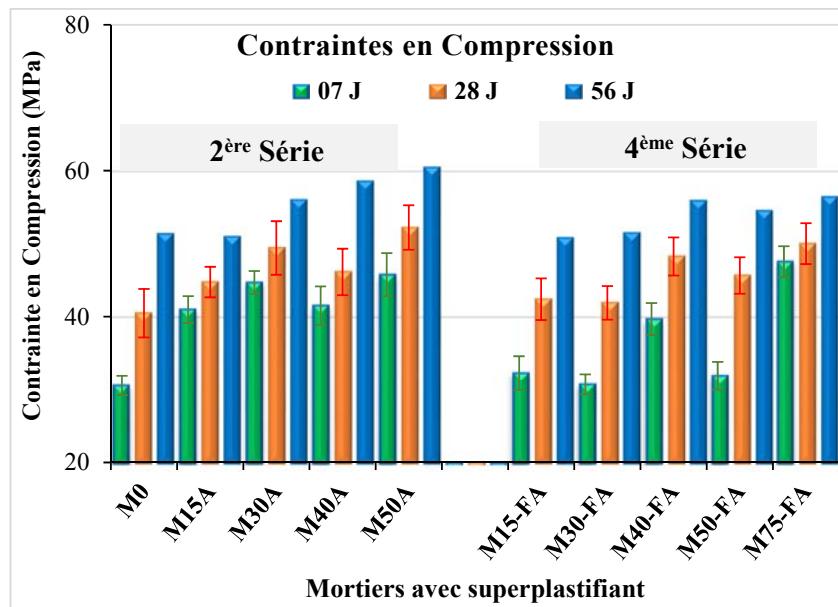


Figure 7.4 Résistance en compression simple des mortiers avec superplastifiant

7.1.3 Résistance à la traction par fendage

La résistance à la traction est déterminée par un essai de fendage, conformément à la norme NF EN 12 390-6, sur des éprouvettes cylindriques de dimensions (40x80 mm²) et a des échéances de : 7, 28 et 56 jour de conservation.

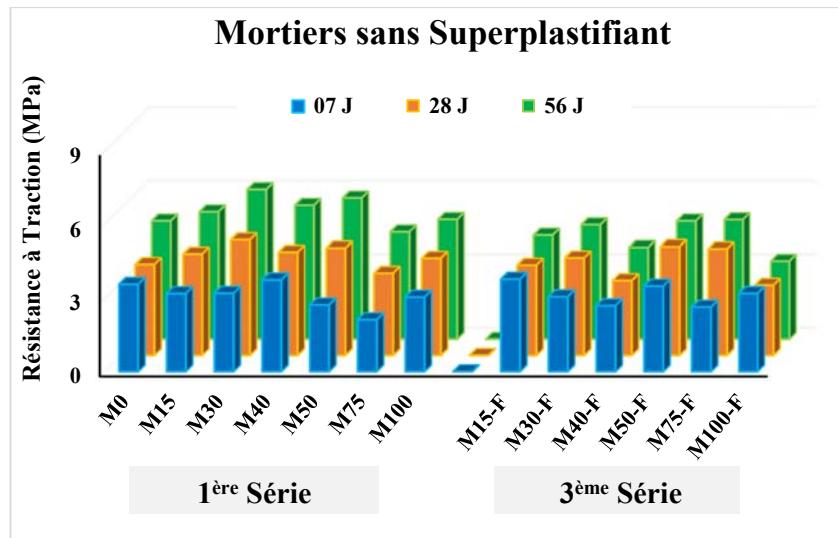


Figure 7.5 Résistance à la traction par fendage des mortiers avec superplastifiant

III.7 Caractérisation des mortiers à l'état durci

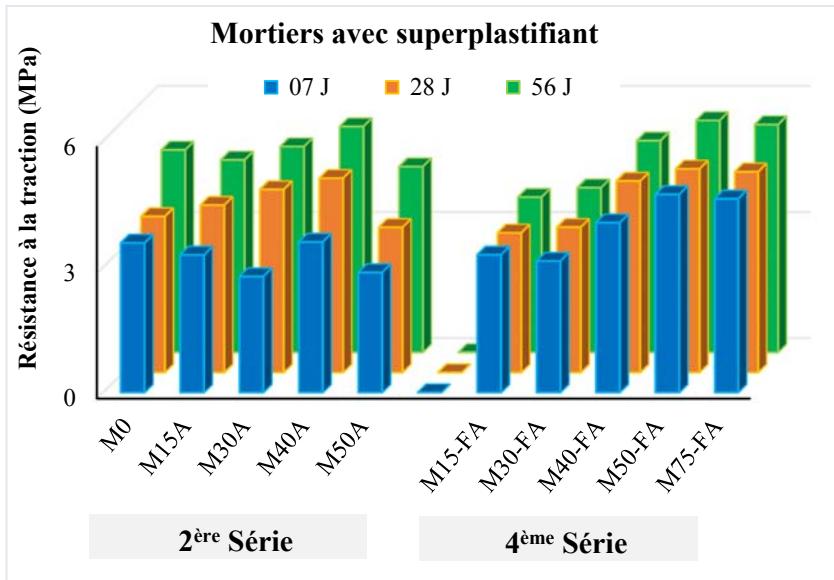


Figure 7.6 Résistance à la traction par fendage des mortiers sans superplastifiant.

7.1.4 Evolution du module d'élasticité

Le module d'élasticité statique de la résistance à la compression a été déterminé après 28 jours de durcissement dans l'eau, en utilisant la même presse destinée à la mesure des résistances mécaniques selon la norme NF EN 13412 : 2006. Les résultats enregistrés du module de Young des différents mortiers, en fonction du taux de remplacement de NSB par RSB et RSB-F, sans et avec du superplastifiant sont illustrés par la figure 7.7.

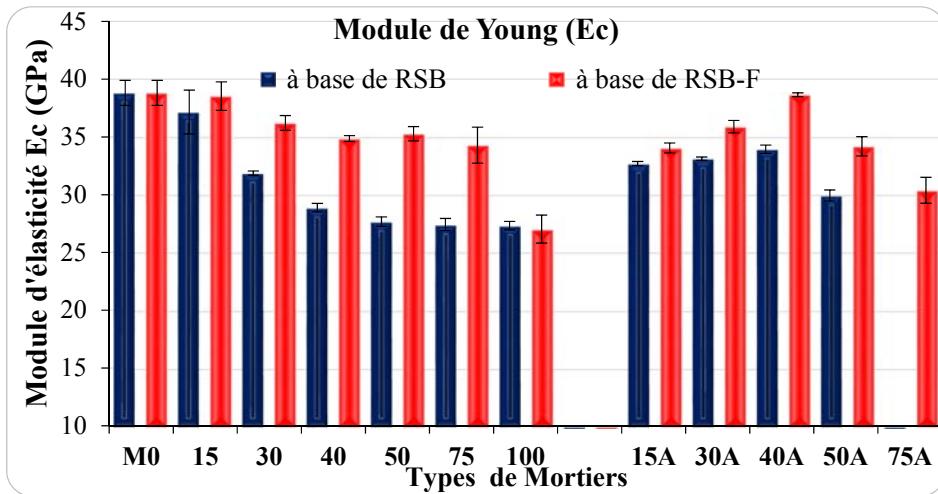


Figure 7.7 Evolution du module de Young de différents mortiers confectionnés

7.1.5 Evolution Module d'élasticité dynamique

Les résultats du module d'élasticité dynamique des mortiers mesuré par la méthode ultrasonique sont illustrés sur la figure 7.8

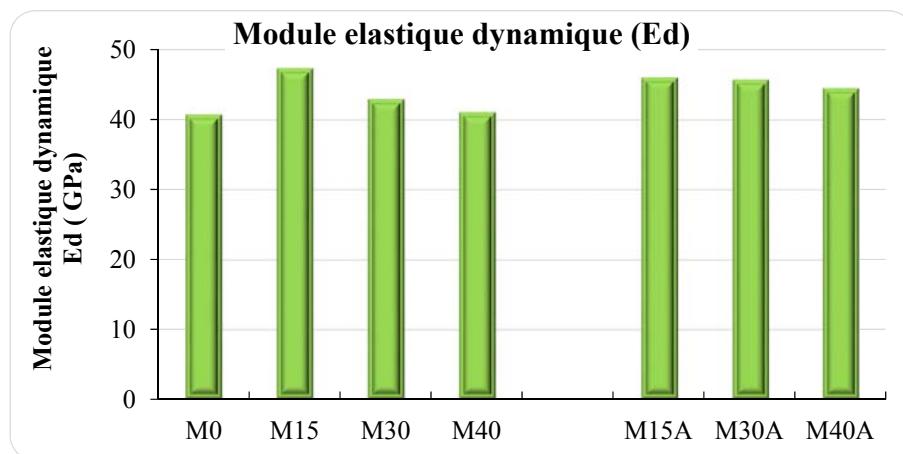


Figure 7.8 Modules d'élasticité dynamique de différents mortiers à base de RSB

7.1.6 Analyse des résultats de résistances mécaniques

A partir des retours d'expérience mentionnés par la littérature, l'utilisation de sable recyclé peut conduire à des problèmes de régularité des bétons produits, tant sur l'ouvrabilité que sur les résistances mécaniques. Ce constat est expliqué par la variabilité de la teneur en fines des sables, liée à la teneur en résidu de pâte cimentaire rattachée aux granulats.

Au jeune âge (7 jours), et à travers la figure 7.3, les résistances en compression des mortiers recyclés sans superplastifiant, de deux séries (1^{ère} et 3^{ème} séries), montrent des valeurs plus élevées que celles du mortier témoin naturel (M0). Ces améliorations de la résistance peuvent s'expliquer par l'existence probable d'une partie de ciment anhydre provenant du sable recyclé, qui n'est pas encore été hydratée [174 et 175]. Dans cette étude, les bétons concassés utilisés pour la fabrication du sable recyclé ont moins de 6 mois. Les gains de résistance enregistrés s'élèvent à 25% pour un taux de 30% de RSB, et 40% d'amélioration de résistance pour le mélange à 40% de RSB-F. Ces constatations sont en accord avec celles rapportées par Zhao et al. [23] et Neno et al. [176]. Ces améliorations de résistances de 15 % enregistrées entre le M40-F et celui M30 peuvent être expliquées par l'homogénéisation des sables, naturel fin et recyclé grossier d'une part, et à la diminution du rapport E/C qui est lié la présence des fillers. A l'âge de 28 et 56 jours de maturation, les mêmes tendances sont observées. A 56 jours de maturation, les résistances en compression des mortiers recyclés non adjuvants et pour des taux inférieurs à 50% du RSB sont meilleures que celles du mortier naturel de référence et le meilleur gain de résistance (23%) est enregistrée dans M30. Comme précédemment, une importante augmentation était attendue en raison de l'incorporation du superplastifiant avec un rapport E/C presque constant, l'amélioration de la résistance du M30A est de 32% par rapport au M30 et 62% par rapport à M0. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Sajedi et al. (2011) [177].

Avec l'incorporation du superplastifiant (figure 7.4), toutes les résistances des mortiers recyclés sont en hausses, du fait, de l'accroissement de la compacité des mortiers avec moins d'air occlus (tableau 6.10) et avec E/C est quasiment constant (variations de 0,50 à 0,54 enregistrés dans la 2^{ème} série et 0,50 à 0,52 dans la 4^{ème} série) pour une maniabilité fixe. Cette augmentation de résistances

III.7 Caractérisation des mortiers à l'état durci

est bien remarquable avec les mortiers à base de RSB-F. L'augmentation du pourcentage du sable recyclé dans les mortiers engendre l'augmentation du taux du SP. Ce dernier, avec son effet de défloction-dispersion des composants de mortiers, particulièrement les grains de ciment, minimise la teneur d'air occlus et par conséquent augmente la compacité. Ce qui explique l'augmentation des résistances en fonction du taux de substitution du sable naturel par celui recyclé. Notant que le taux maximum du sable recyclé trouvé dans la littérature de 30%, a été dépassé. Dans tous les cas les résistances en compression les plus faibles sont constatées pour les mortiers à base du RSB à 100, avec une chute de 9% par rapport à M0.

Les résistances de traction par flexion 3 points (figure 7.1) des mortiers recyclés sans superplastifiant à base du RSB-F, sont meilleures que celles du mortier témoin, constatées pour l'échéance à 28 et 56 jours. La meilleure résistance est réalisée avec le mélange à 50% de RSB-F, ce qui représente un gain de 14% par rapport à celle du mélange M0. Cependant, pour les mélanges composés avec RSB les résistances ne sont pas assez notables par rapport à celle obtenue avec le mélange témoin.

Les résistances à la traction par fendage (figure 7.5) des mortiers recyclés avec du RSB et sans adjuvants sont en général faibles par rapport au mortier témoin et aussi par rapport aux ceux avec du sable recyclé sans fillers. Néanmoins, il faut noter qu'il y a eu des améliorations de résistances à 28 et 56 jours des mortiers à base de RSB-F dont le taux n'excède pas 40%. Ces résultats sont analogues à ceux trouvés dans la littérature [21 ; 28 ; 156 et 178].

Divers facteurs peuvent être la cause de cette différence. Le RSB contient une quantité importante de particules fines ce qui conduira à une surface spécifique élevée influençant fortement la demande en eau du sable recyclé. De plus, une forte teneur de particules fines peut perturber l'empilement granulaire lors du malaxage et ainsi provoquer une diminution de la résistance [150 et 179]. Or, le RSB-F est caractérisé par des grains plus aigus et plus poreux, de sorte que la liaison avec la pâte de ciment du mélange est meilleure [55 et 71]. Avec l'introduction du superplastifiant, les résistances à traction par fendage et à la flexion sont bien améliorées, particulièrement pour les mélanges sans fillers (figure 7.2 et figure 7.6). Par rapport au mortier témoin et à 28 jours, les gains de résistances à la traction des mortiers à base RSB-F, sont 40% en fendage contre par 29% en flexion. Cette nette amélioration de la résistance est due à l'effet du SP.

Les modules de Young de tous les mortiers recyclés sont faibles que celui du mortier ordinaire de référence (figure 7.7), et que cette variation est d'autant plus grande que le taux remplacement par sable recyclé augmente, particulièrement avec celui contenant des fillers (RSB). Le module élastique du mortier recyclé à 100 % chute de 26 % par rapport au mortier de référence. Les modules de Young des mortiers adjuvantés sont bien améliorés par rapport à ceux sans superplastifiant. Cette amélioration notable est enregistrée pour le M50-FA II avec un pourcentage de 14% par rapport à M50A. Ces résultats concordent avec ceux de la résistance à la compression et à la flexion, qui étaient également plus élevés dans les mortiers confectionnés avec du RSB-F.

On constate d'après la figure 7.8 que le module d'élasticité dynamique présente un comportement similaire à celui de le module d'élasticité statique, en l'occurrence une réduction en fonction du taux de substitution et amélioration avec l'ajout du superplastifiant. Le rapport entre

le module d'élasticité statique et le module d'élasticité dynamique qui est toujours inférieur à l'unité. La valeur varie entre 70% (M40) et 78% (M0).

7.2 Propriétés relatives à la durabilité

L'un des aspects les plus moins étudiés des mortiers et bétons recyclés est lié à leur durabilité dans des environnements agressifs. Dans la littérature consultée très peu d'études se sont intéressées à l'étude de la durabilité des mortiers et bétons formulés avec une intégration totale des granulats recyclés particulièrement le sable avec ses fines.

Notre examen des indicateurs de durabilité est consacré aux mortiers à base de sable recyclé avec fillers (RSB), afin de déterminer les inconvénients liés à son utilisation. Les propriétés physiques déterminées sont notamment l'absorption d'eau par capillarité, la perméabilité au gaz et les retraits libre et endogène. La durabilité des mortiers a été aussi évaluée pour étudier leurs comportements sous des sollicitations chimiques et physiques telles que la lixiviation, cycles gel-dégel et cycles thermiques 20C°/80C°.

7.2.1 Absorption d'eau par capillarité

La détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité des mortiers durcis après 56 jours de conservation, sur des éprouvettes cylindriques (4x8 cm²) conformément à la norme NF EN 1015-18 (2003). Les résultats de l'évolution de l'absorption d'eau des mortiers avec et sans superplastifiant sont représentés dans la figure 7.9.

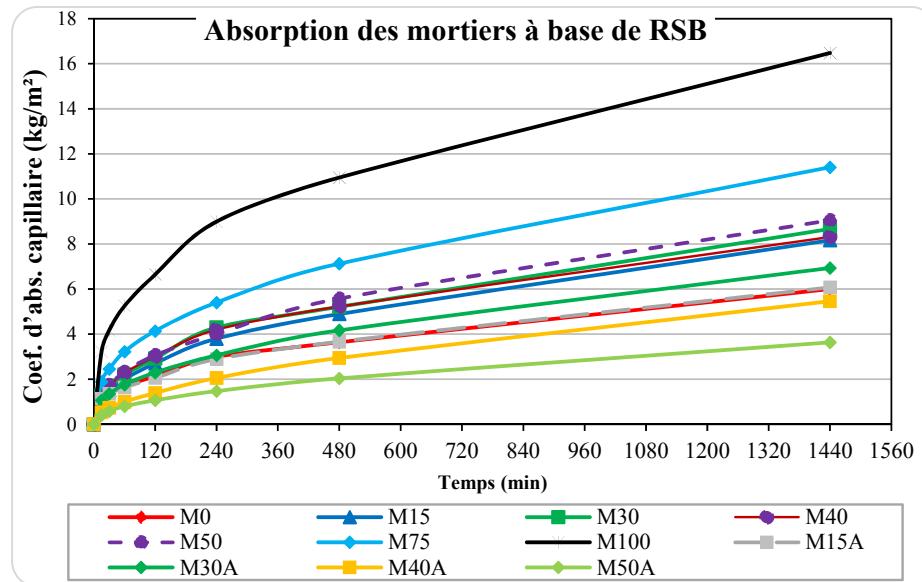


Figure 7.9 Evolution d'absorption d'eau des différents mortiers en fonction du temps

L'évaluation de l'effet du sable recyclé, avec et sans fillers sur l'absorption capillaire des mortiers effectuée après 56 jours de cure, montre que dès la première heure de l'essai, la cinétique d'absorption capillaire de tous les mortiers recyclés augmente rapidement, en particulier pour celui

III.7 Caractérisation des mortiers à l'état durci

recyclé à 100%. Ce comportement est attendu à cause de l'aspect du sable recyclé, qui présente une surface rugueux et qui se caractérise par une forte absorption d'eau. Après la première phase (de 0 à 8 heures), la figure 7.9 illustre que l'évolution de l'absorption d'eau des mortiers sans adjuvant est modérée et presque similaire, sauf pour les mortiers contenant plus de 50% de sable recyclé, qui est importante jusqu'à 24 heures.

Par ailleurs, nous pouvons constater le coefficient d'absorption capillaire est plus faible pour les mortiers contenant du superplastifiant par rapport au mortier témoin. Il diminue avec l'augmentation du taux du superplastifiant, cela est dû à l'effet de ce dernier qui améliore la compacité et minimise la porosité des mortiers.

7.2.2 Porosité communicante et Densité apparente

La porosité communicante accessible à l'eau et la densité apparente sont déterminées selon la méthode LCPC n° 58 (§ 5.3.3). Chaque essai a été réalisé sur deux prélèvements de 5 cm d'épaisseur découpé au centre d'éprouvettes cylindrique (11x22 cm²). Les résultats trouvés de la porosité accessible à l'eau et la densité apparente des différents mortiers durcis sont représentés sur la figure 7.10.

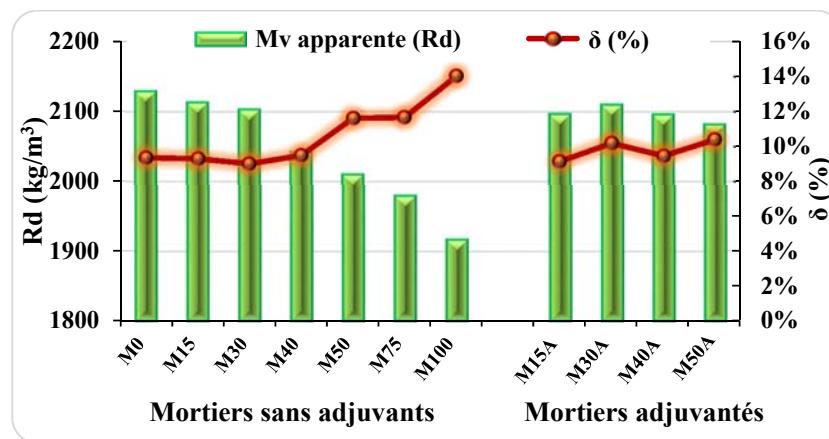


Figure 7.10 Densité apparente et porosité accessible à l'eau des différents mortiers

Les densités apparentes des mortiers recyclés (figure 7.10) diminuent avec l'augmentation de leur porosité accessible communicante et avec l'augmentation du taux de substitution du sable naturel par celui recyclé et en moins avec les mortiers contenant du superplastifiant. Cependant avec un taux de 30% de RSB en enregistre une meilleure compacité avec une porosité de 9%.

7.2.3 Perméabilité au gaz

7.2.3.1 Détermination de la perméabilité apparente

La mesure de la perméabilité apparente des mortiers de maçonnerie a été réalisée après 56 jours de conservation et à l'aide d'un perméamètre à charge constante (voir § 5.3.4) avec des pressions de percolation $P_1 = 2 \text{ bars}$ et de confinement $P_c = 5 \text{ bars}$ et les résultats trouvés sont illustrés dans la figure 7.11.

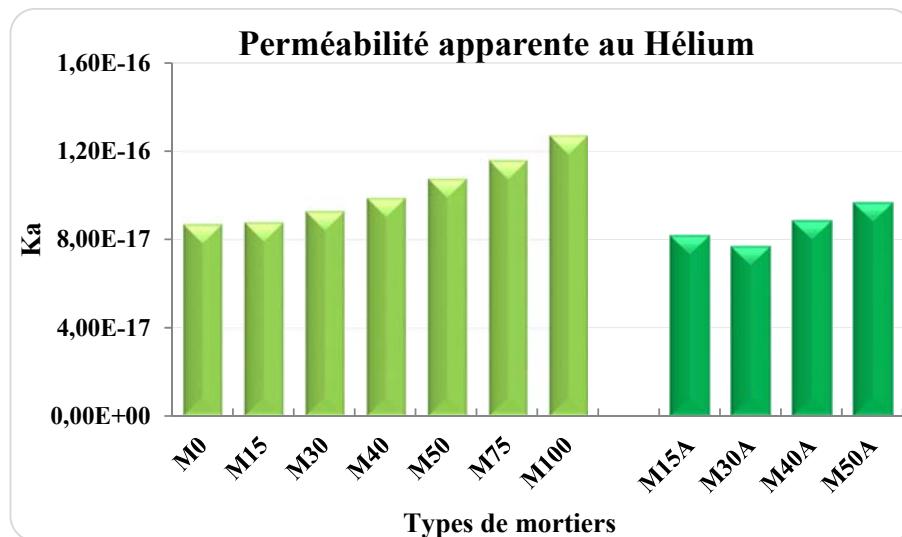


Figure 7.11 Perméabilité apparente au gaz des mortiers recyclés âgés de 56 jours

7.2.3.2 Détermination de la perméabilité intrinsèque

Pour chaque mortier âgé de 56 jours, deux échantillons ont été testés et 4 pressions de percolation du gaz ont été effectuées pour identifier la perméabilité intrinsèque. En faisant varier la pression de 2, 3, 4 et 5 bars, on détermine les différentes valeurs moyennes de la perméabilité apparente (K_a) obtenue pour chaque mortier aux différentes pressions, tableau 7.1, ainsi la perméabilité intrinsèque (K_V) est calculée par la méthode de Klinkenberg (voir §5.3.4.3), tel que : $K_V = \text{fonction} \left(\frac{1}{P_m} \right)$. Les résultats trouvés sont représentés dans la figure 7.12.

Tableau 7.1 Perméabilité apparente de chaque mortier aux différentes pressions.

Pression de percolation	M0	M15	M30	M40	M50	M75	M100	M15A	M30A	M40A	M50A
2 bars	8,680E-17	8,770E-17	9,277E-17	9,879E-17	1,075E-16	1,158E-16	1,271E-16	8,200E-17	7,690E-17	8,850E-17	9,671E-17
3 bars	1,571E-16	1,672E-16	2,057E-16	2,264E-16	2,399E-16	2,357E-16	2,666E-16	1,722E-16	1,255E-16	1,730E-16	2,015E-16
4 bars	1,233E-16	1,412E-16	1,589E-16	1,666E-16	1,828E-16	1,784E-16	2,031E-16	1,288E-16	9,483E-17	1,200E-16	1,502E-16
5 bars	1,004E-16	1,018E-16	1,274E-16	1,342E-16	1,417E-16	1,458E-16	1,692E-16	1,050E-16	7,538E-17	8,830E-17	9,382E-17

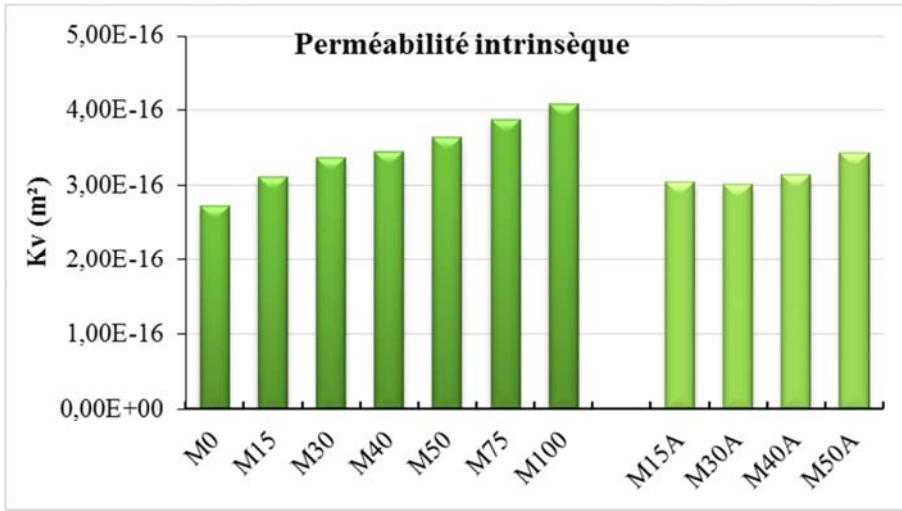


Figure 7.12 Perméabilité intrinsèque des différents mortiers après 56 jours de maturation

7.2.3.3 Résultats et discussions

Il est clair, d'après les figures 7.11 et 7.12, les perméabilités aux gaz (K_a et K_v) des mortiers recyclés sans superplastifiant sont beaucoup plus influencées par l'incorporation du sable recyclé (RSB) au-delà du taux de 15%. Cependant, elles augmentent que légèrement pour les mortiers adjuvantés avec des taux supérieurs à 40% de RSB. Cela est dû à l'effet du superplastifiant/haut réducteur d'eau, qui améliore la compacité du mortier et minimise le dosage en eau (voir le tableau 6.8). Le mortier M30A qui a enregistré une porosité minimale (meilleure compacité), montre la plus faible perméabilité apparente au gaz, avec une valeur de $7,69 \cdot 10^{-17} m^2$.

Pour expliquer cette variation, on peut supposer que l'interface matrice-sable recyclé regroupe souvent des pores augmentant ainsi la perméabilité. En outre, les granulats recyclés agissent comme des ponts entre les pores créant ainsi des interconnexions, ce qui permet au gaz de s'écouler à travers la structure du mortier. L'augmentation de la perméabilité intrinsèque est plus significative pour les mortiers à base de RSB. La valeur de (K_v) varie entre $3,02 \cdot 10^{-16} m^2$ pour les mortiers adjuvantés contenant 30% de RSB à $4,08 \cdot 10^{-16} m^2$ pour les mortiers contenant 100% de RSB. Cela peut être lié à l'augmentation de la porosité communicante et de l'air occlus de ces mortiers.

7.2.4 Retrait libre total et endogène

Afin d'évaluer l'influence de l'incorporation du sable recyclé sur les variations dimensionnelles des mortiers de maçonnerie dues au retrait, nous avons étudié l'évolution du retrait endogène ainsi que le retrait libre dans trois localités différentes : salle sèche, salle du laboratoire et salle humide. Trois éprouvettes ($4 \times 4 \times 16 cm^3$), de chaque mortier, sont démolées et placées dans un environnement différent pendant deux mois. Les évolutions de retraits des mortiers recyclés en fonction du temps sont illustrées dans les figures 7.13, 7.14, 7.15 et 7.16.

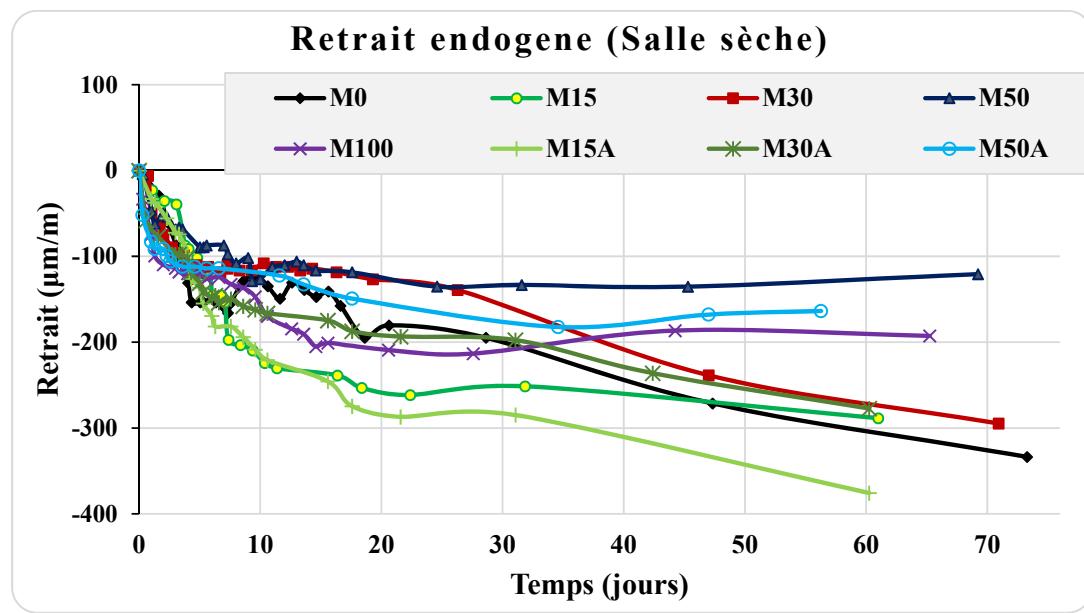


Figure 7.13 Evolution du retrait endogène des différents mortiers

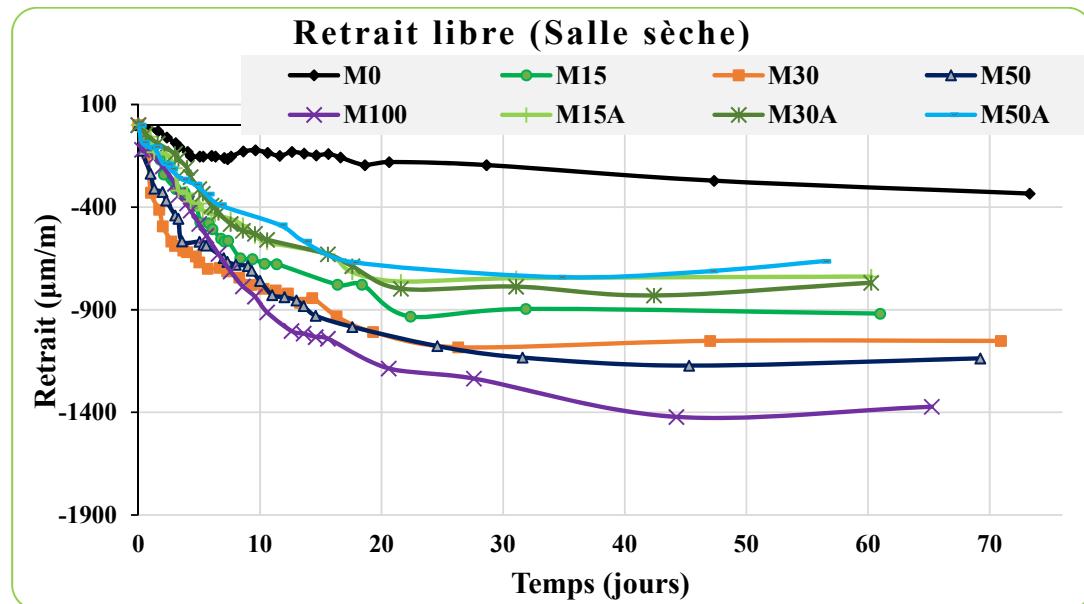


Figure 7.14 Evolution du retrait libre des différents mortiers

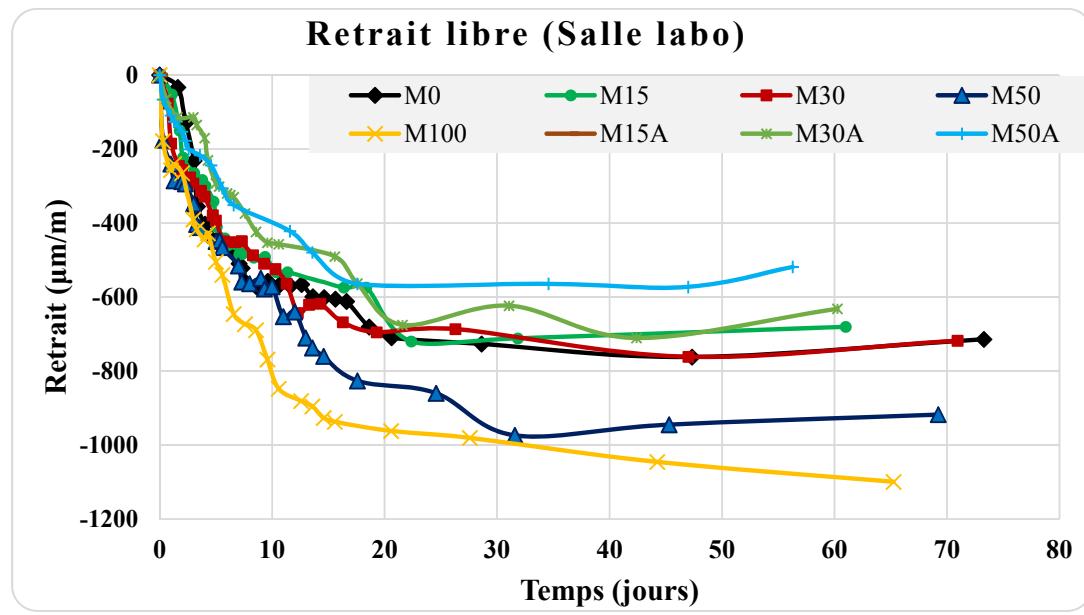


Figure 7.15 Evolution du retrait libre des différents mortiers dans la salle labo

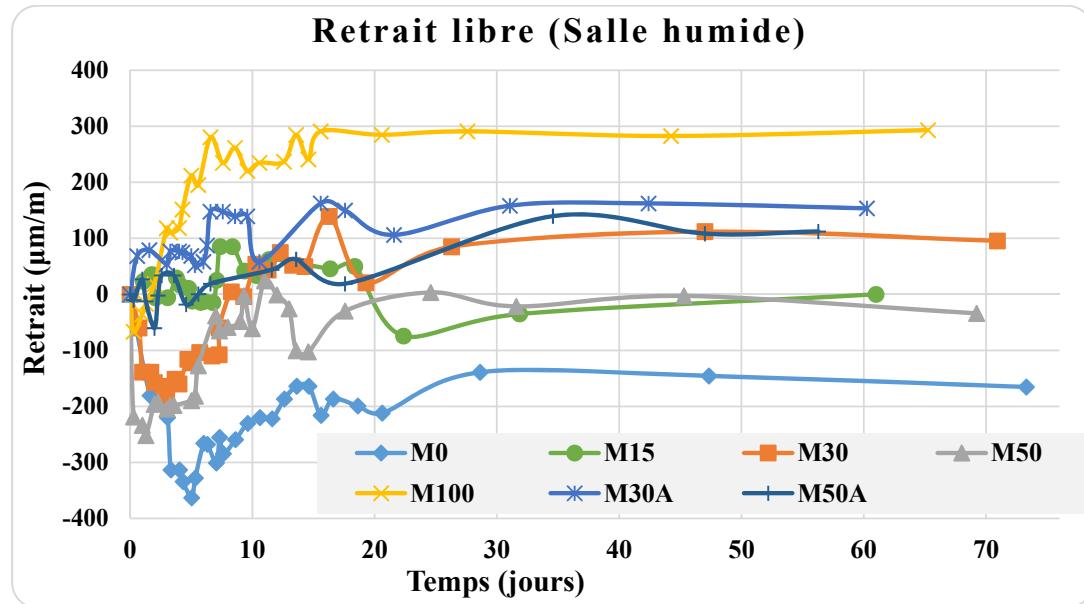


Figure 7.16 Evolution du retrait libre des différents mortiers dans la salle humide

Dans la salle humide et au cours des cinq premiers jours, le mortier de référence (M0) a enregistré un retrait important ($\varepsilon = -400 \mu\text{m}$) et avec une cinétique très rapide. Au-delà, il a subi un gonflement jusqu'au quinzième jour, et son retrait se stabilise aux alentours de ($\varepsilon = -200 \mu\text{m}$). Les mêmes constations sont relevées pour les mortiers recyclés sans superplastifiant, sans toutefois observer un retrait conséquent. Cependant, les éprouvettes du mortier recyclé à 100% ont subis un gonflement dès le premier jour et il se stabilise à partir du 15^{ème} jour, à une valeur de ($\varepsilon = +300 \mu\text{m}$).

Les résultats de mesure des retraits des mortiers après 28 jours sont représentés par la figure 7.17.

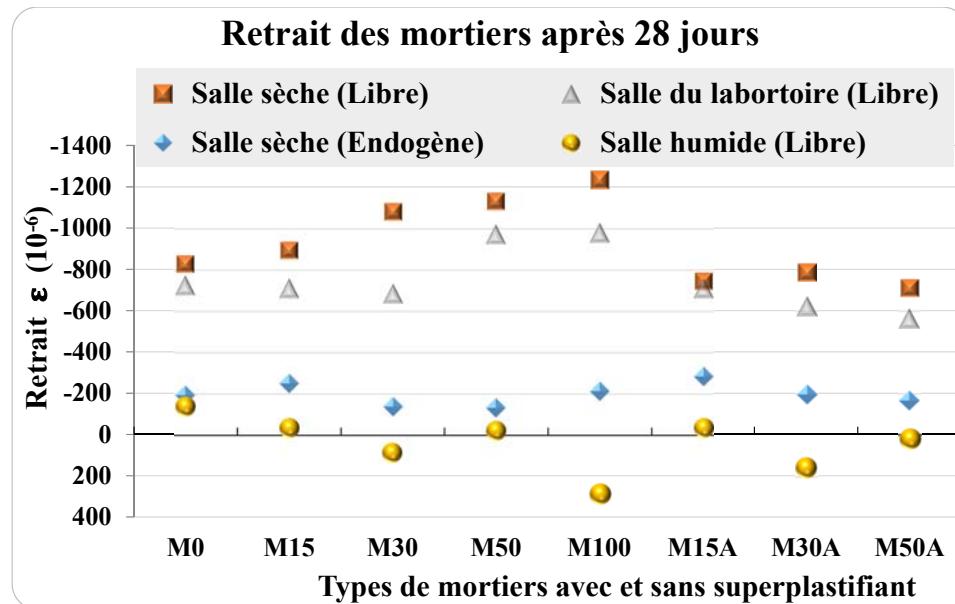


Figure 7.17 Comparaison des retraits des différents mortiers dans quatre environnements (après 28 jours d'exposition)

La figure 7.17 montre clairement, que l'incorporation du sable recyclé a un impact considérable sur le retrait libre des mortiers sans superplastifiant, particulièrement pour ceux placés à la salle sèche et moins important pour les mortiers rangés dans salle du laboratoire dont l'humidité relative est de 80%. Un autre facteur qui influence le rétrécissement du béton est les conditions hygrométriques de l'environnement externe. L'humidité et la température sont des facteurs clés du développement du rétrécissement conduisant à un retrait de séchage plus élevé lorsque l'humidité diminue, ou à un retrait plus important à des températures élevées.

Après 28 jours de conservation à la salle sèche, les valeurs moyennes du retrait total des mortiers recyclés, à base de 15%, 30%, 50% et 100% de RSB, sont supérieures à celles enregistrées pour le mortier conventionnel de 10%, 30%, 45% et 50%, respectivement. Toutefois, les retraits des mortiers avec du superplastifiant sont presque similaires quel que soit l'environnement d'exposition.

7.2.5 Etude des effets des cycles gel-dégel

L'objectif de cette étude est d'évaluer les effets du gel-dégel sur les propriétés physiques et mécaniques usuelles des mortiers à base de sable recyclé avec et sans adjuvant. Les cycles gel-dégel affectent le comportement mécanique des matériaux ; c'est pourquoi nous avons déterminé la résistance en traction par flexion trois points et la résistance en compression simple au terme de 30 et 60 cycles d'exposition.

III.7 Caractérisation des mortiers à l'état durci

Les figures 7.18 et 7.19 présentent une comparaison des résistances en flexion et en compression des éprouvettes de mortiers soumises au gel-dégel à celles des échantillons conservés à température ambiante et qui n'ont pas subi l'effet du gel.

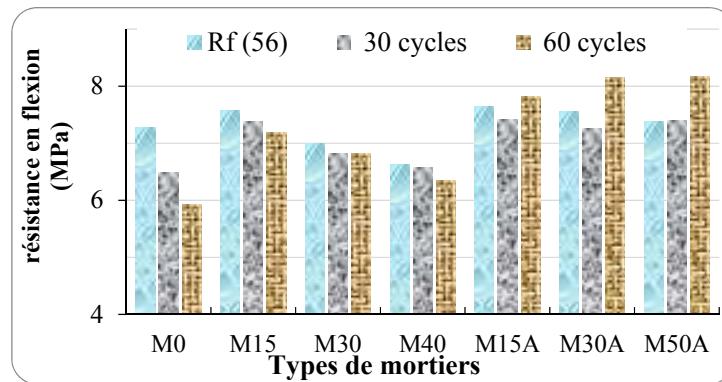


Figure 7.18 Résistance à la flexion des mortiers avant et après effets au gel-dégel

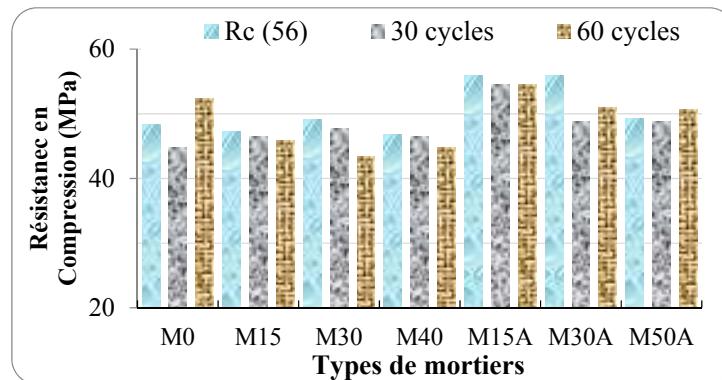


Figure 7.19 Résistance en compression des mortiers avant et après effets au gel-dégel

On peut constater, après 30 cycles de gel-dégel, que l'action du gel produit dans tous les cas une perte de résistance par rapport à l'échantillon témoin. La perte de résistance est bien remarquable pour le mortier naturel, avec une chute de résistance de 11 à 19%. Cette diminution de résistance traduit la dégradation du mortier par fissuration et création de vides entraînant la diminution de la cohésion entre le sable et la pâte de ciment. Contrairement, les mortiers recyclés sont moins sensibles aux effets de gel-dégel, et la perte de résistance diminue avec l'augmentation du taux du sable recyclé dans les mortiers. On enregistre seulement une diminution de résistance de 1 à 5%. La porosité initiale élevée provoquée par la morphologie particulière du sable recyclé (plus poreux) peut être invoquée pour expliquer ces résultats.

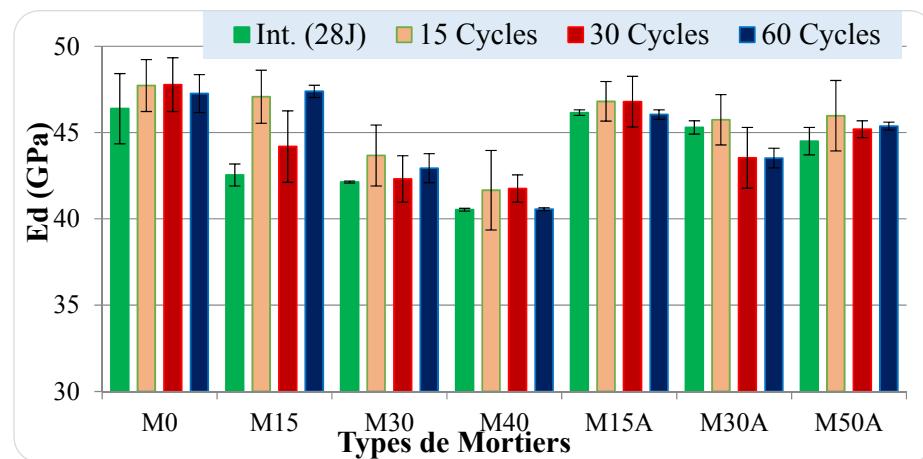


Figure 7.20 Evolution du module d'élasticité dynamique (Ed) en fonction du nombre de cycles gel-dégel

A travers la figure 7.20, on peut constater que les mortiers fabriqués à base de sable recyclé, présentent généralement de bonnes résistances à l'action du gel-dégel, principalement ceux avec du superplastifiant. Cela est dû sans doute, à l'existence des pores et micro pores dans le sable recyclé (mortier de ciment rattaché).

7.2.6 Etude des effets des cycles séchage-imbibition

7.2.6.1 Effets sur la variation de masses

La figure 7.21 présente l'évolution de perte de masses des mortiers en fonction du nombre de cycles séchage-imbibition.

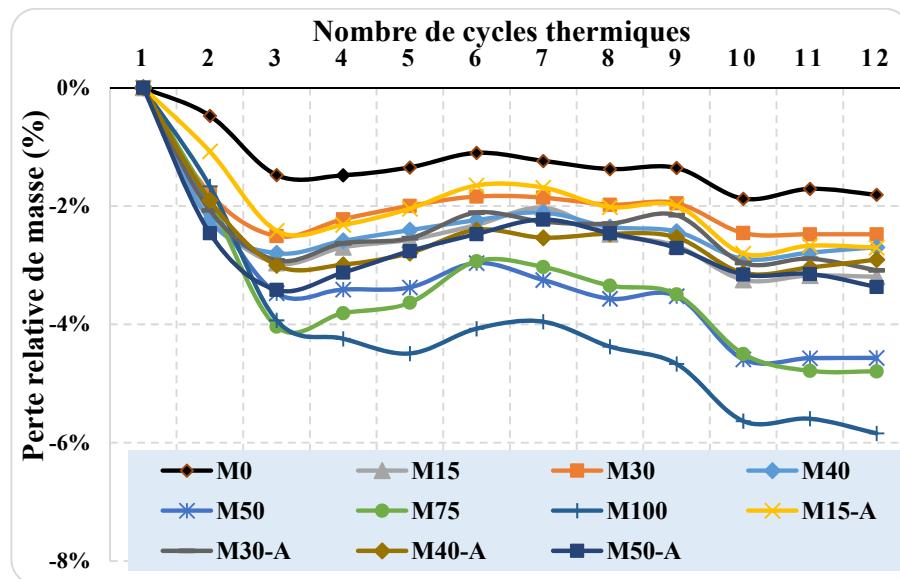


Figure 7.21 Evolution de la perte de masses des mortiers en fonction du nombre de cycles séchage-mouillage.

III.7 Caractérisation des mortiers à l'état durci

De la figure 7.21, on constate, que pour tous les mortiers étudiés et quel que soit le taux de substitution, les mortiers présentent un retrait significatif au terme des 3 premiers cycles de séchage. Ces retraits attendus sont dus à l'évaporation croissante de l'eau contenue dans les éprouvettes. On constate également qu'entre le 4^{ème} cycle et le 8^{ème} cycle, les retraits font place à un gonflement (expansion) systématique observable sur tous les échantillons.

Bien qu'il soit difficile de confirmer ou d'infirmer le principe de ce gonflement. Pour justifier ce résultat, en se basant sur les hypothèses avancées par Dang Tuan Anh dans sa thèse [169]. Le retrait et le gonflement se produisent simultanément dès le début des essais avec des intensités différentes au cours des cycles successifs. Au début des essais l'évaporation est intense et induit une contraction des éprouvettes par succion capillaire. Toutefois, au cours des cycles de séchage, les mouvements hydriques et l'accroissement de la température induisent parallèlement des réactions complémentaires de recristallisation des grains de C-S-H, en modifiant leurs microstructures et leurs morphologies. De nouveaux hydrates (portlandite) se forment en milieu confiné dans un béton durci seraient à l'origine de gonflements qui s'opposent au retrait initialement constaté. En d'autres termes, c'est le retrait qui prédomine pendant toute la première phase de l'expérimentation mais au-delà du seuil critique de cycles, lorsque l'éprouvette est suffisamment appauvrie en eau et que le retrait tend à se stabiliser de nouveaux hydrates précipitent à partir de l'eau contenue dans les capillaires fins et donnent lieu à des gonflements complémentaires. C'est ce qui expliquerait la remontée des courbes.

7.2.6.2 Effets sur la résistance en compression

Les résistances en compression des différents mortiers traités montrent un accroissement par rapport aux mortiers témoins maintenus à la salle humide à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Le taux d'augmentation de résistance calculé par rapport au mortier sain, est indiqué en pourcentage sur le diagramme des contraintes des mortiers exposés aux cycles séchage-mouillage, figure 7.22.

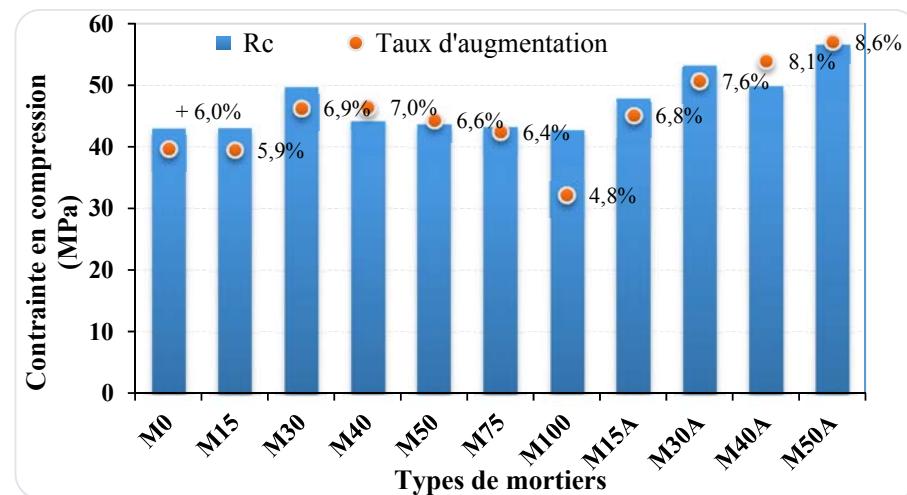


Figure 7.22 Evaluation des résistances en compression des mortiers recyclés sous l'effet des cycles thermiques

L'étude expérimentale a montré que les cycles séchage-imbibition ont entraîné une augmentation des résistances mécaniques en compression pour tous les mortiers élaborés. Ce résultat est très probablement dû à deux processus qui se produisent au cours de ces cycles thermiques : la formation de nouveaux hydrates d'une part et la contraction de la matrice en raison de la succion capillaire provoquée par l'évaporation de l'eau des pores, d'autre part ; d'après Benboudjema reporté par Hannawi (2011) [165].

7.2.7 Diffusion des ions chlorures

Les échantillons cylindriques (4x4 cm²) utilisés dans cette étude sont des moitiés des éprouvettes cylindriques (4x8 cm²) de différents mortiers confectionnés. Ils sont immergés partiellement (profondeur de 2 cm) dans une solution composée de NaCl (0,51 mol/l) et NaOH (0,1 mol/l) pendant 28 jours. Le coefficient de diffusion apparent des ions de chlorures est déterminé en fonction du temps d'immersion des échantillons dans la solution NaCl et la profondeur de pénétration des ions chlorures. Cette profondeur est déterminée, selon le protocol cité précédemment (§ 5.3.9), à partir des mesures de l'épaisseur de la couche contenant les ions chlorures (zone blanche sous l'effet de pulvérisation d'une solution de nitrate d'argent faiblement concentrée).

Les résultats trouvés de (X_d) ainsi de ($D_{hs}(\text{dif})$) sont résumés et représentés dans le tableau 7.2. Des photos des échantillons sont représentées en Annexe 2.

Tableau 7.2 Résultats de la profondeur de pénétration des ions chlorures

Types de Mortiers	Profondeur (X_d) mesurée à 28 jours (mm)	Le coefficient de diffusion apparent des ions de chlorures (10^{-10} m ² /s)
M0	80	6,95
M15	85	7,29
M30	75	6,45
M40	87	7,12
M50	88	10,54
M75	90	10,96
M100	120	15,13
M15A	76	6,61
M30A	73	8,19
M40A	75	7,47
M50A	70	8,56

On remarque que la diffusion des ions de chlorures dépend principalement de degré de porosité des mortiers. Elle augmente avec l'augmentation du taux du sable recyclé, cependant elle est influencée par l'ajout du superplastifiant et la compacité des mortiers.

7.2.8 Lixiviation aux acides sulfuriques (0,5M/L)

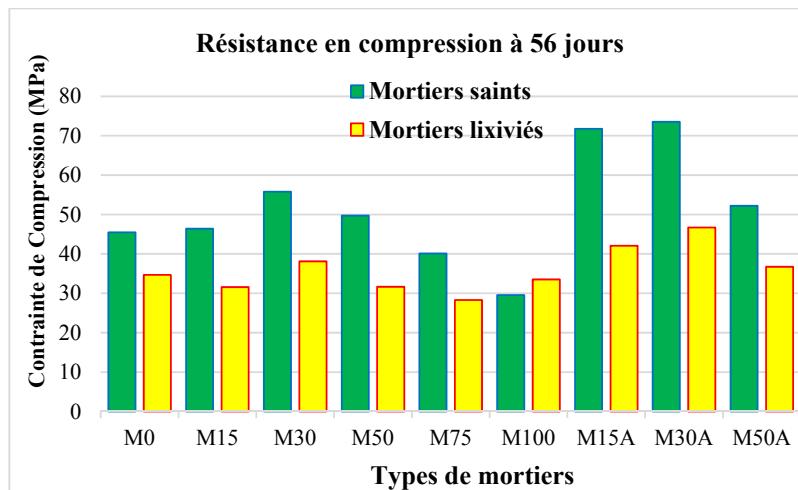


Figure 7.23 Comparaison des résistances en compression des mortiers saints et lixivés

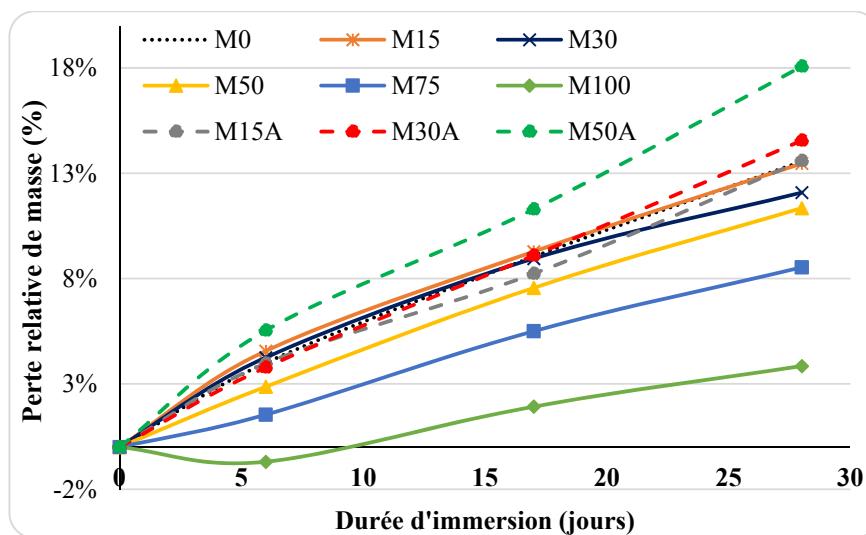


Figure 7.24 Evolution de la perte de masse en fonction du temps d'immersion

Après 28 jours d'immersion des éprouvettes dans l'acide sulfurique (figure 7.23), les pertes de résistances en compression des mortiers non adjuvantés enregistrent des augmentations jusqu'au taux de 50% de RSB avec un pourcentage de 36%, alors le mortier recyclé à 100% montre un gain de résistance de 13%. Cependant, les pertes de résistances sont plus importantes pour les mortiers adjuvantés, 41% pour M15A, elles diminuent avec l'augmentation du superplastifiant.

A travers la figure 7.24 on constate que les pertes de masse les plus importantes ont été observées dans les mortiers avec du superplastifiant dont leur compacité est élevée. Inversement aux mortiers non adjuvantés, caractérisés par des grandes porosités. Le mortier recyclé à 100% a subit une augmentation de masse dès le début d'attaque, et une perte relative de masse faible à 28 jours de (4%), figure 7.25-d, par comparaison à M0 (14%) et M50A (18%). Cela peut s'expliquer

par la formation de l'étringite suite à la réaction chimique du gypse avec les C₃A, ce dernier est le résultat de la réaction de l'acide sulfurique avec le Portlandite [180], et la porosité des mortiers a facilité la pénétration de l'acide et le contact avec les hydrates.

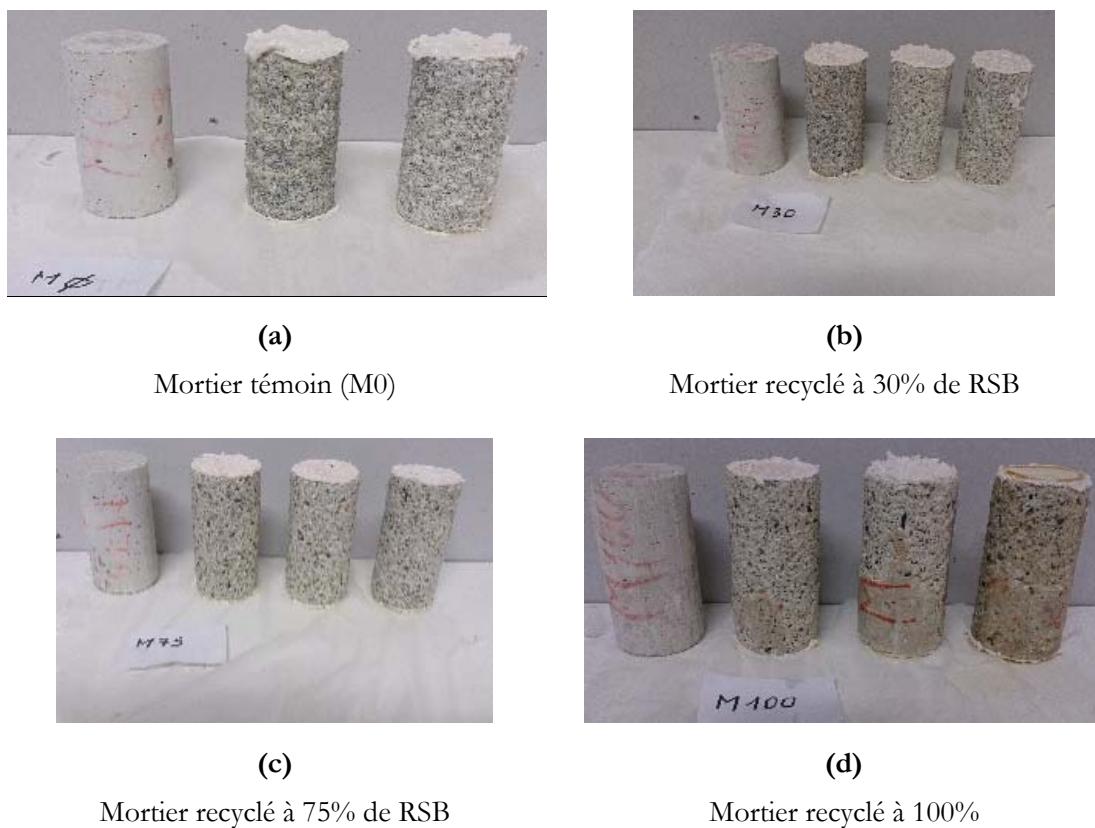


Figure 7.25 Photographie des états des éprouvettes avant et après attaques acide

7.3 Conclusion

Il se dégage de cette partie de notre travail expérimental concernant l'étude des mortiers de maçonnerie plusieurs constatations :

1. L'étude comparative entre les mortiers à base de sables recyclés RSB et RSB-F a mis en évidence leurs principales caractéristiques physiques et physico-chimiques et leurs influences sur les propriétés des mortiers confectionnés que ce soit rhéologiques ou mécaniques :
 - ✓ Le sable recyclé est caractérisé par un taux élevé de fines (<63 µm) supérieur à 5% et par un taux élevé de fillers (<125 µm) supérieur à 10% ce qui conduit à une absorption d'eau très importante : 13,4 %, sept fois supérieure à celle du sable naturel.
 - ✓ Le pré-mouillage du sable recyclé est indispensable et les quantités d'eau optimums de pré-mouillage déterminées sont de l'ordre de 9% du poids du RSB et de 6% du poids du RSB-F pour maintenir la plasticité désirée des mortiers recyclés.

III.7 Caractérisation des mortiers à l'état durci

- ✓ La meilleure plasticité et la plus grande compacité sont constatées pour le mortier à base de 30% de RSB (M30) avec une porosité minimale de 9%, cela du probablement à l'effet filler.
 - ✓ Les performances mécaniques en flexion, en compression et à la traction par fendage, dans toutes les échéances, des mortiers à base du sable recyclé sans fillers sont meilleures que celles des mortiers à base de sable brut (avec fillers). A 7 jours, les mortiers recyclés ont montré des résistances en compression plus élevées que celle du mortier naturel de référence. Cependant, à 28 et à 56 jours, les résistances en compression enregistrent des optimums pour 30% de RSB et 50% de RSB-F, qui sont supérieurs à ceux trouvés dans la littérature (20 à 30%). Les contraintes de traction par flexion et par fendage augmentent avec la substitution du sable naturel par le sable recyclé jusqu'à un optimum de 50% puis elles chutent.
 - ✓ L'incorporation du superplastifiant dans les mortiers améliore considérablement le comportement mécanique des mortiers recyclés, en particulier la résistance en compression dont on a enregistré un gain de 40 % pour un taux de 75 % de RSB-F.
2. La durabilité des mortiers recyclés durcis à base de RSB, à travers l'étude des indicateurs de durabilité généraux et spécifiques, montre :
- ✓ Une forte capacité d'absorption d'eau, une porosité accessible à l'eau élevée et une perméabilité au gaz importante en fonction du taux du sable recyclé. Cela est engendré sans doute à la proportion importante des pores capillaires.
 - ✓ les mortiers recyclés ont approuvé une durabilité potentielle équivalente, voire meilleure que celle du mortier de référence. Principalement vis-à-vis aux effets du gel-dégel, des acides et même à 100% de sable recyclé.
 - ✓ En termes d'agressions chimiques, la résistance des mortiers recyclés à la lixiviation aux acides est bien remarquable, particulièrement avec le taux de 100% du RS, suite à la formation de l'étringite qui provoque la chute de résistance mécanique et la carbonate de calcium qui joue le rôle d'une barrière de protection.

Quatrième partie

Étude des bétons ordinaires recyclés

Chapitre 8

Caractérisation et propriétés physiques des bétons à l'état fraîcheur

8.1 Introduction

Il ressort de l'étude bibliographique que les granulats recyclés les plus appropriés pour la confection d'un béton recyclé structurel sont celles obtenues à partir de déchets de béton. Mis à part le granulat naturel, l'autre composant principal de ce granulat recyclé est le mortier cimentaire (RMC) rattachée à la surface de ce dernier. Ce RMC est la cause des principales différences entre les granulats naturels et les granulats de béton recyclé. Les granulats recyclés possèdent une capacité d'eau beaucoup plus élevée que les granulats naturels et peuvent donc grandement influencer la rhéologie du béton à l'état frais et par conséquent sur son comportement mécanique à court et à long terme. L'utilisation des granulats grossiers de béton recyclé a été largement étudiée ces dernières années, mais peu de données ont été rapportées sur l'utilisation de granulats recyclés fines. En outre, un manque de données fiables sur les propriétés à long terme du béton de granulats recyclés doit être souligné [37].

L'état hydrique des granulats recyclés au moment du malaxage est un paramètre très important à maîtriser [69 et 74]. L'état de saturation étant généralement défini à partir d'une absorption mesurée jusqu'à 24 heures [9]. Cette dernière condition semble être très bénéfique pour le béton frais et durci [55]. La littérature est riche concernant l'effet des granulats recyclés sur les résistances mais il faut noter que les conclusions ne convergent pas vers un seul et unique constat. Peu d'études se sont intéressées à l'étude des indicateurs de durabilité concernant des bétons formulés avec une intégration totale des granulats recyclés (sable et graviers) [216]. L'étude de la durabilité des bétons recyclés s'avère donc une étape indispensable afin de leur attribuer un domaine d'utilisation.

Dans ce contexte, l'objectif de cette partie est de mettre en évidence l'influence du sable recyclé contenant des fines et du gravier recyclé à l'état saturé à surface sèche (SSS) sur l'évolution, dans le temps, des caractéristiques des bétons à base de ces recyclés. La procédure expérimentale a été réalisée sur différentes compositions de bétons ordinaires sans adjuvants, à base des granulats naturels et recyclés avec différentes combinaisons granulaires (sable et gravier). La formulation des bétons incorporant ces recyclés est basée sur la méthode de composition de Dreux-Gorisso [60]. En prenant comme données de base la classe de résistance cible C35/45, en prenant en considération le même type et dosage du ciment (400 kg pour 1m³ de béton), la même classe de consistance S2 (béton plastique, affaissement de 5 à 9 cm) et la même classe d'environnement EA2 et selon les directives de l'Eurocode béton (EC 2), Norme NF EN 206-1/CN : 2012 et une même squelette granulaire de compacité constante ($c = 0,790$) .

Cette quatrième partie de thèse est consacrée à l'étude des bétons ordinaires recyclés sans adjuvant. Les essais expérimentaux sont devisés en deux chapitres distincts. Le premier est destiné à l'identification et la caractérisation matériaux utilisés à travers des tests de détermination des propriétés chimiques et physico-mécaniques, effectués en conformité avec les normes en vigueur ainsi à définir la méthode de préparation et la composition des bétons. Ainsi à l'évaluation des caractéristiques des bétons recyclés à l'état frais, Le deuxième chapitre consiste à comparer les comportements mécaniques, à la flexion et en compression uni-axiale dans le temps, des bétons recyclés avec ceux du béton naturel de référence. Il examine et analyse les indicateurs de durabilité de ces bétons, à savoir : l'absorption d'eau, la porosité communicante, la perméabilité aux gaz, cycles séchage-imbibition, diffusion naturelle des ions de chlorure et la lixiviation aux acides. Et enfin, les conclusions pour permettre de mieux maîtriser l'effet de l'incorporation des granulats recyclés, en particulier le sable recyclé avec fines.

8.2 Constituants de base

8.2.1 L'eau

L'eau utilisée pour l'ensemble des essais est celle du robinet exempte d'impuretés, qui répond aux prescriptions de la norme NF EN 1008 : 2002.

8.2.2 Ciment

Le liant hydraulique utilisé dans la formulation des bétons ordinaires recyclés est le même ciment utilisé pour la confection des mortiers de maçonnerie. Ces caractéristiques minéralogiques et chimiques sont reportées dans le chapitre 6 (§ 6.2.2).

8.2.3 Granulats

Deux types de granulats ont été utilisés : granulats naturels et granulats recyclés. Trois classes de fractions granulaires ont été choisies (0/3,15 ; 3,15/8 et 8/16). Celles-ci permettent d'avoir des bétons ternaires avec une étendue granulaire meilleure et une formulation adaptée aux exigences voulues "Consistance et Résistance", ainsi un gravier recyclé avec un minimum de pâte cimentaire rattachée aux granulats [30 et 31].

8.2.3.1 Granulats naturels (GN)

Deux types de granulats naturels ont été utilisés, provenant de la région de Bretagne - France ; dont : un sable alluvionnaire (NSB), de coupure (0/3,15 mm) et graviers concassés (GNB), de coupures (3,15/8 et 8/16 mm).

8.2.3.2 Granulats recyclés (GR)

Les granulats recyclés sont fabriqués au niveau du laboratoire du département de génie civil à l'université de Annaba en Algérie. Ils sont obtenus après concassage d'un vieux béton de structure

âgée plus de 30 ans, dans un concasseur à mâchoire. Un sable recyclé (RSG), de fraction (0/3,15 mm) et graviers recyclés (GRG), de coupures (3,15/8 et 8/16 mm).

8.2.4 Caractérisation des granulats

8.2.4.1 Caractéristiques chimiques et minéralogiques

Les compositions minéralogiques, réalisées par spectrométrie de fluorescence X, essai réalisé à l'INSA de Rennes en France, des granulats utilisés sont données dans le tableau 8.1 :

Tableau 8.1 Compositions chimiques des granulats utilisés

Oxydes en %	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PAF
NSB	0,1	93,3		4,3		0,1		0,1		2,1		99,8
RSG	44,63	26,52	1,01	4,96	0,23	2,36	0,035	0,028	0,6	1,20	1,96	16,44
GRG	39,83	32,81	0,00			1,32		0,09		0,14	1,62	21,81

8.2.4.2 Caractéristiques physiques et mécaniques

Les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats sont déterminées conformément aux normes en vigueur et les résultats d'essais sont présentés dans le tableau 8.2.

Tableau 8.2 Principales Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats utilisés

Granulats		Sables		Graviers				Normes
		NSB	RSG	GNB1	GNB2	GRG1	GRG2	
Fractions	U.	(0/3,15)	(0/3,15)	(3,15/8)	(8/16)	(3,15/8)	(8/16)	
Caractéristiques physiques								
Masse volumique apparente		g/cm ³	1,41	1,24	1,54	1,49	1,14	1,09
Masse volumique réelle		g/cm ³	2,59	2,51	2,63	2,74	2,52	2,56
Module de finesse		FM	2,38	2,78	-	-	-	NF EN 933-1
Coefficient d'aplatissement		A (%)	-	-	9,3		10,1	NF EN 933-3
Equivalent de sable		SE (%)	92,52	87,52	-	-	-	NF EN 933-8
Propreté superficielle		P (%)	-	-	3,5		7,2	NF EN 1097-2
Teneur en eau		W (%)	1,12	2,93	0,31	0,18	4,57	1,93
Absorption d'eau		Ab (%)	2,19	12,81	0,95	0,64	6,83	5,37
Caractéristiques mécaniques								
Coefficient Micr-Deval		MDE	-	-	22,31		38,6	NF EN 1097-1
Coefficient Los-Angeles		LA	-	-	29,47		39,52	NF EN 1097-2

On constate d'après le tableau 8.2 que tous les granulats sont propres et les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats recyclés sont sensiblement inférieures à celles des granulats naturels, suite la présence du vieux mortier de ciment rattaché (RMC) aux granulats recyclés [54].

La densité des granulats recyclés saturés à surface sèche, notamment celle du sable recyclé, est plus faible que celle des granulats naturels. En règle générale, il est vérifié que plus la teneur en RMC et en impuretés est élevée, plus la densité de granulats grossiers recyclés diminue [157]. À cet égard, encore une fois, cette propriété est influencée par les déchets d'origine, le niveau de traitement et la fraction granulométrique. Toutes les densités de nos recyclés sont supérieures à la valeur minimale de densité, entre 2000 et 2200 kg/m³, limité par la recommandation RILEM [158].

L'absorption d'eau des granulats recyclés est beaucoup plus élevée que celle des granulats naturels. La principale raison de cette différence est la présence du RMC. Ce mortier de ciment a une porosité plus élevée que les granulats et, par conséquent, les granulats recyclés absorbent plus d'eau que le type conventionnel. En outre, en raison du fait que le pourcentage de mortier collé est plus élevé dans la fraction de sable que dans la fraction grossière [151], l'absorption d'eau augmente à mesure que la fraction de taille diminue. Puisque la phase la plus faible des déchets est le mortier collé, il sera plus affecté par le processus de concassage que les granulats d'origine. À cet égard, les fractions fines seront principalement constituées de mortier collé. Les valeurs d'absorption d'eau obtenues pour les granulats recyclés sont assez conséquentes, elles sont au-dessus de 10%, limite fixée par la plupart des normes internationales [158]. Elles vont de 12,81% (pour le RSG), à la valeur moyenne de 6,1% (pour les GRG).

En raison de la séparation et de l'écrasement du RMC poreux des granulats recyclés pendant les essais de la fragmentation dynamique, leurs résistances à l'abrasion et aux chocs, évalués à partir des essais de Micro-deval (MDE) et Los Angeles (LA), sont relativement plus faibles que celles des granulats naturels [159]. Cependant, les valeurs de coefficients de résistance dynamiques enregistrés pour les granulats recyclés étaient au-dessous des limites indiquées par les normes les plus restrictives, c'est-à-dire 40 et 50, respectivement. Selon González-Taboada et al. (2016) [14], le gravier recyclé avec un taux d'absorption d'eau inférieure à 7% fournit un coefficient de Los Angeles inférieur à 42%.

Les analyses granulométriques des granulats réalisées selon la norme NF EN 933-1, sont représentées dans la figure 8.1.

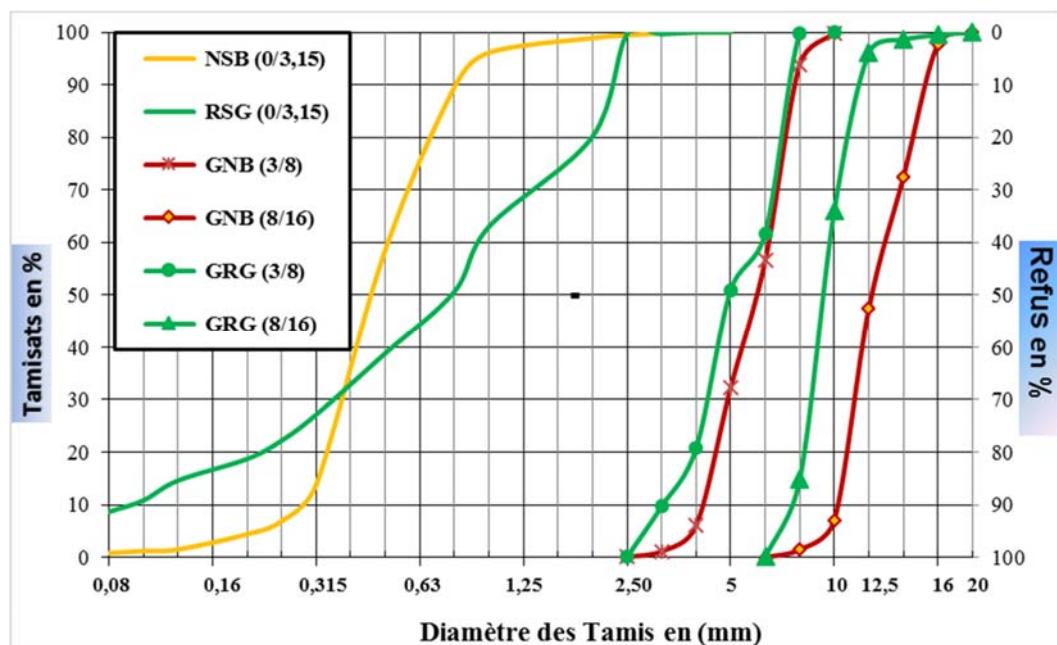


Figure 8.1 Courbes granulométriques des granulats utilisés

Le classement des granulats recyclés est directement lié au processus de concassage appliqué aux déchets de béton d'origine [14]. L'analyse granulométrique des granulats utilisés, à travers la figure 8.1, nous montre un comportement différent pour les granulats grossiers et fins. La distribution granulométrique des graviers recyclés ne diffère pas sensiblement des graviers naturels, ils ont le même étalement. Par conséquent, le sable recyclé montre des fractions granulométriques plus étendues que le sable alluvionnaire naturel. On souligne que le sable recyclé est principalement composé de gravier, d'une petite quantité de sable de taille moyenne et une fraction importante de fines. Ces constatations sont conformées par les modules de finesse des deux sables, cela est dû principalement au procédé de concassage utilisé et de la qualité initiale du béton [14 et 160].

8.3 Préparation et formulation des Bétons

L'absorption d'eau élevée des granulats recyclés affecte le comportement rhéologique du béton frais. Pour s'affranchir de celle-là, une quantité d'eau supplémentaire est indispensable pour conserver une ouvrabilité plastique similaire (S2) pour tous les bétons.

Le maintien de l'ouvrabilité est meilleur lorsque l'état hydrique du granulat recyclé est inférieur ou égal à sa saturation [9]. Les procédures de pré-saturation des graviers recyclés et la méthode de formulation des bétons sont détaillées dans le chapitre concernant les protocoles d'essais (voir § 4.1.2). Les compositions complètes avec les différentes combinaisons granulaires sont données dans le tableau 8.3.

Tableau 8.3 Différentes compositions des bétons ordinaires formulés

Composants	Mvabs	Unités	BT	BS15	BS30	BS50	BS100	BG15	BG30	BG50	BG100	BGS15
CEM I 52,5	3,15	kg/m ³	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
NSB	2,59		544	490	414	303	0	571	571	571	571	493
RSG	2,51			84	172	293	604					84
GNB1	2,63		339	320	300	299	286	296	243	174		273
GNB2	2,74		929	908	902	879	849	758	624	446		774
GRG1	2,52							50	100	167	333	46
GRG2	2,56							125	250	417	833	128
G/S	-		2,33	2,14	2,05	1,98	1,88	2,15	2,13	2,11	2,04	2,12
E. Calculée		L/m ³	184	185	185	185	185	184	184	184	184	185
E. Ajoutée.	1		0	8	21	31	41	6	13	19	33	13
E. Totale			184	193	206	216	226	190	197	203	217	198
E/C	-		0,46	0,48	0,52	0,54	0,57	0,48	0,49	0,51	0,54	0,50
Aff.	-	cm	9	6	7,5	6,5	6	7	7	8	6,5	9

A partir du tableau 8.3, il faut noter les points suivants :

- Les graviers recyclés ont subi une saturation d'eau pendant 24 heures avant gâchage pour maintenir le niveau de saturation souhaitée [120 et 137], ils sont utilisés saturés à surface sèches (SSS), les autres granulats sont utilisés à l'état naturel (sec).
- Le gravier naturel est substitué par celui recyclé pour des différents pourcentages volumiques de 0, 15, 30, 50, 75 et 100%. Cependant le sable naturel est remplacé par le sable recyclé jusqu'à un taux volumiques max de 30%. Ce dosage correspond le plus souvent à la limite haute relevée dans la littérature, au-delà de laquelle les propriétés du béton peuvent être altérées (voir §3.3.2.1).
- Les mesures de la hauteur d'affaissement du béton frais ont été effectuées à l'aide du cône d'Abams, selon la norme NF EN 12350-2 : 2012. L'ouvrabilité est maintenue identique des différents bétons de la classe de consistance S2 (de 5 à 9 cm). Le besoin en eau du béton frais, pour atteindre cette maniabilité visée, est très influencé par la teneur et le type de granulats recyclés, en particulier le sable recyclé caractérisé par sa porosité importante et sa teneur élevée en fines.
- L'absorption d'eau élevée des granulats recyclés affecte le comportement rhéologique du béton frais. Cette absorption est constatée dans les compositions à base de ces granulats [55]. Pour s'affranchir de celle-ci, une quantité d'eau supplémentaire est indispensable pour conserver une ouvrabilité plastique similaire (S2) pour tous les bétons.

8.4 Propriétés physiques des bétons à l'état frais

8.4.1 Introduction

Dans cette partie, et afin de préciser l'impact des granulats recyclés (sables et graviers) sur les propriétés physiques, nous présentons l'ensemble des résultats du comportement rhéologique des bétons recyclés en les comparants notamment à ceux du béton naturel de référence. Nous détaillerons les caractéristiques physiques des bétons ordinaires à l'état frais, par l'exploitation des mesures des masses volumiques et le volume d'air occlus.

8.4.2 Volume d'air occlus

Le tableau 8.4 regroupe les résultats de mesures d'air occlus effectuées sur les différentes compositions de bétons ordinaires sans adjavants, à base des granulats naturels et recyclés avec différentes combinaisons granulaires (sable et gravier). Les résultats retenus représentent la moyenne de trois mesures.

Tableau 8.4 Volume d'Air occlus dans les différents bétons confectionnés.

Types de Béton	BT	BS15	BS30	BS50	BS100	BG15	BGS15	BG30	BG50	BG100
Air Occlus (%)	1,42	1,26	1,73	2,15	2,67	1,90	1,65	1,95	1,75	2,13

On constate que le volume d'air occlus des bétons à base de sable recyclé est légèrement supérieur à ceux incorporant le même pourcentage du gravier recyclé. Les augmentations enregistrées, du volume d'air occlus par rapport au béton témoin (BT), variant de 21 % pour le béton contenant 30% du RSG jusqu'à 86% et pour les bétons à base du sable recyclé à 100%. Cette augmentation significative du volume d'air occlus dans les bétons recyclés est sans doute liée à la morphologie de ces granulats qui emprisonne des bulles d'air dans la matrice cimentaire des bétons.

8.4.3 Masse volumique apparente

Les masses volumiques apparentes des bétons (ρ_{app}) à l'état frais sont déterminées selon la norme NF EN 1015-6/A1 : 2007. La figure 8.2 présente les résultats de l'évaluation de la masse volumique à l'état frais des différents bétons formulés.

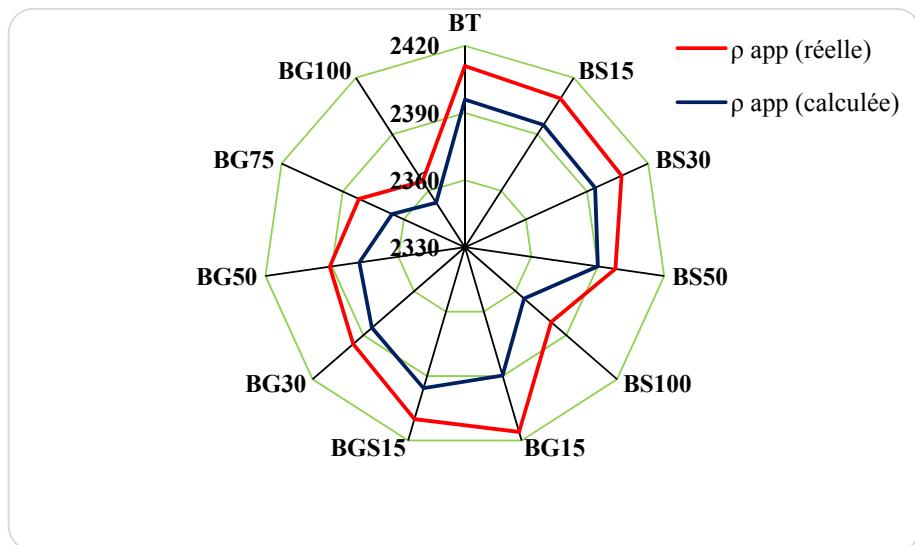


Figure 8.2 Evaluation des masses volumiques à l'état frais des différents bétons.

La figure 8.2 montre que la masse volumique apparente est diminuée dès lors que des granulats recyclés, moins denses que les granulats naturels, sont incorporés. Cette diminution est plus prononcée avec l'augmentation du taux du sable recyclé et en moins avec l'incorporation du gravier recyclé. Une perte significative de la masse volumique est observée pour le béton à base 100% de gravier recyclé. Cette diminution est attribuable à la densité faible des granulats recyclés, d'une part, et à l'augmentation de la teneur en eau engendrée par l'absorption conséquence des granulats recyclés suite à la présence d'une structure alvéolaire de l'ancien mortier collé aux granulats recyclés. Les caractéristiques intrinsèques, principalement par la teneur élevée des fines. De nombreuses études ont confirmé ces résultats [12 ; 13 et 31].

L'anarchie a pris une telle ampleur
que les gens ne parlent que de béton
et rarement de fleurs.

Athmene Daoudi

Chapitre 9

Etude du comportement des bétons à l'état durci

9.1 Comportement mécanique des bétons

9.1.1 Introduction

Cette partie est consacrée à l'étude du comportement des bétons sous sollicitations mécaniques. Tous les travaux portant sur les bétons recyclés ont mis en évidence une perte réelle des résistances mécaniques lorsqu'on introduit des granulats recyclés dans les matériaux cimentaires. C'est donc en parfaite connaissance de ces conclusions que nous avons entrepris de déterminer les résistances de nos bétons. Les principales variables de composition sont le type des granulats recyclés et leurs dosages volumiques. Pour comprendre le comportement des bétons recyclés, plusieurs caractéristiques mécaniques dans le temps ont été déterminées, résistances à la flexion et en compression, ainsi que le module d'élasticité. Le comportement mécanique des bétons d'étude a été déterminé à différents échéanciers 7, 28, 56 et 90 jours.

9.1.2 Résistance à la flexion quatre points

Le comportement des bétons en flexion a été étudié à l'aide d'un dispositif de 4 points. L'évaluation de la résistance en flexion des bétons recyclés en comparaison avec celle du béton témoin a été réalisée sur des éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm³, à raison de deux éprouvettes pour chaque béton. Les résistances en flexion des différents bétons, dans le temps, sont représentées sur la figure 9.1.

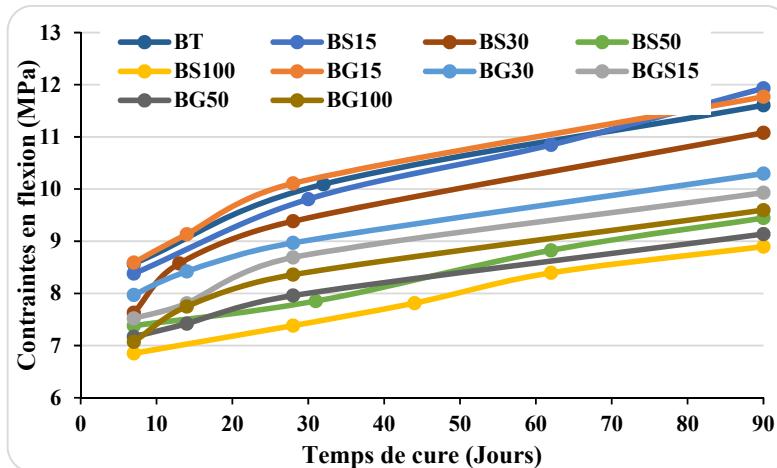


Figure 9.1 Evolution de la résistance en flexion des bétons en fonction du temps.

9.1.3 Résistance en compression uni-axiale

La résistance à la compression du béton est généralement considérée comme sa propriété la plus principale des propriétés mécaniques, car elle donne généralement une caractéristique globale de la qualité du béton et qui est directement liée avec d'autres propriétés.

Dans cette étude, le comportement mécanique en compression est évalué à l'aide des paramètres globaux : contraintes et déformations. Ces paramètres sont la résultante des comportements locaux qui se produisent au sein du matériau. L'évolution des résistances en compression uni-axiale, en fonction du temps, ont été déterminées sur les quatre demi-prismes des éprouvettes obtenues après leur rupture par flexion et suivant le protocole normatif NF EN 12390-3 : 2012. La vitesse de chargement est de 0,5 MPa/s jusqu'à la rupture. La charge appliquée est assurée par une presse hydraulique de 3000 kN contrôlée en force (voir § 5.1). La figure 9.2 présente l'évolution de la résistance en compression dans le temps et la figure 9.3 présente les résultats des résistances obtenus à 28 jours.

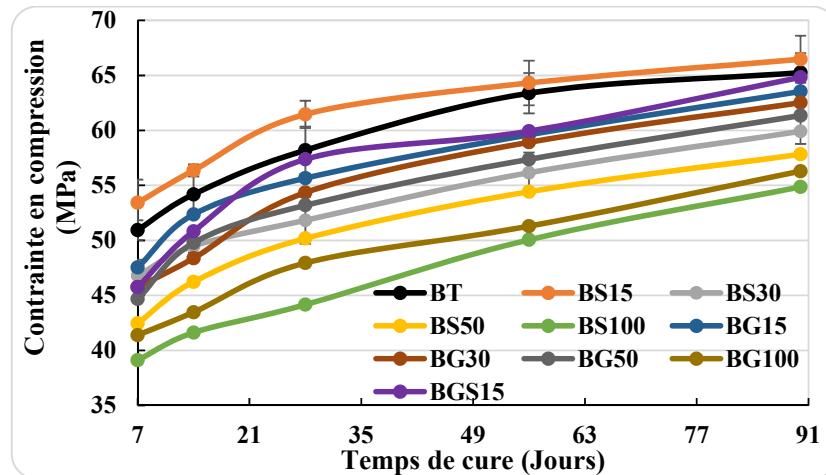


Figure 9.2 Evolution de la résistance en compression en fonction du temps.

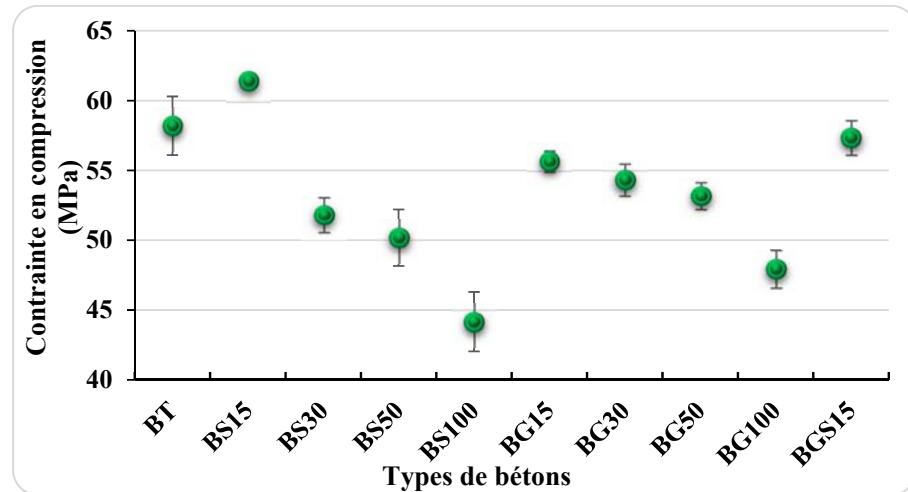


Figure 9.3 Evaluation de la résistance en compression des différents bétons à 28 jours

9.1.4 Evaluation du module d'élasticité

Les modules d'élasticité statique de la résistance à la compression (E_c) sont déterminés à l'aide des courbes contrainte/déformation. Les déformations sont calculées à partir des déplacements moyens enregistrés par les trois capteurs de déplacements LVDT disposés autour de l'éprouvette. Le module de Young d'élasticité a été déterminé en utilisant la même presse destinée à la mesure des résistances mécaniques, type Controlab Perrier Labotest de capacité de 3000 kN et selon la norme NF EN 12390-13 : 2014. Une éprouvette cylindrique (11x22 cm²) est utilisée pour chaque type de béton ; elle est rectifiée et testée à 28 jours de durcissement, éprouvette conservée en chambre humide où la température de l'enceinte est de $T = 20^\circ\text{C}$. Les résultats obtenus du module d'élasticité pour les différents bétons sont donnés dans le tableau 9.1 où chaque valeur correspond à la moyenne obtenue à partir de trois essais.

Tableau 9.1 Module d'élasticité des différents bétons confectionnés.

Types de béton	BT	BS15	BS30	BS50	BS100	BG15	BG30	BG50	BG100	BGS15
E_c (GPa)	63,37	56,33	52,64	53,67	44,12	56,72	54,28	52,64	43,59	54,91

La figure 9.4 représente la relation entre le module d'élasticité et la résistance en compression à 28 jours pour chaque béton. Ainsi, on note une bonne corrélation entre ces deux propriétés mécaniques et le module d'élasticité suit la même tendance que la résistance en compression.

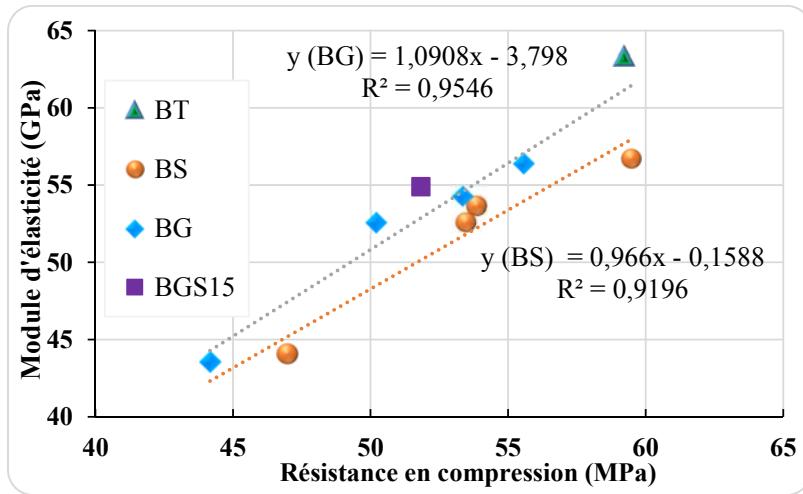


Figure 9.4 Relations entre le module d'élasticité et la résistance en compression à 28 jours.

9.1.5 Analyse des résultats de comportements mécaniques

Tout d'abord, on peut voir à partir de la figures 9.1 que l'évolution de la résistance à la flexion des bétons dans le temps des bétons dans n'est pas homogène. Cependant, on constate très clairement comme on pouvait s'y attendre, que le remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés entraîne une diminution de résistance qui dépend de type du granulat considéré et varie selon la fraction volumique de recyclés introduit. Les résistances à la flexion des bétons incorporant du sable recyclé montrent des valeurs plus faibles, particulièrement dès que le taux de substitution du sable naturel par celui recyclé dépasse les 50%. Cela est dû, sans doute, à la quantité importante des fines présentes dans le RSG, caractérisées par leur grande porosité et par conséquent influençant le rapport E/C. La meilleure résistance, dans le temps, enregistrée est celle du béton à base de 15% de gravier recyclé (BG15). Cependant, la résistance en flexion la plus faible est celle du béton à base de sable recyclé à 100%. Après 90 jours de maturation, la baisse de résistance observée, par rapport au béton témoin, est de 18,6% et 23,3% des bétons BS50 et BS100 et seulement de l'ordre de 17,3 % et 20,8% par rapport aux BG50 et BG100, respectivement. Pour un taux de substitution du gravier naturel de 30%, la résistance diminue de 11,4% alors que pour la substitution du sable naturel de 30%, elle diminue seulement de 4,5%.

La figure 9.2 montre que dans tous les cas des bétons examinés, les résistances caractéristiques (à 28 jours) en compression uni-axiale sont néanmoins supérieures à 35 MPa même pour des taux de substitutions aussi élevés que 50%. Ces bétons satisfont donc aux exigences de béton ordinaire selon l'Eurocode 2. Toutes les résistances des bétons recyclés évoluent au cours du temps d'une façon similaire que le béton témoin. Elles varient de façon importante avec le dosage en granulats recyclés. Le béton (BS15) montre toujours la plus grande résistance dans le temps, cela est dû probablement à sa compacité et contient moins de vide. La résistance du béton naturel de référence est supérieure à celles des bétons recyclés, notamment ceux incorporant du sable recyclé, caractérisé par sa teneur élevée en fines. Les performances mécaniques des bétons dépendent fortement des caractéristiques intrinsèques des granulats utilisés [57].

Par conséquent, l'évolution de la résistance du béton à base de 15% de RSG est remarquable par rapport aux autres bétons recyclés. La baisse de résistance est remarquable, jusqu'à 28 jours de conservation, une chute de 10,9% (BS30) et 6,6% (BG30) de la résistance en compression est observée pour les spécimens incorporant 30% des granulats recyclés. Elle est de l'ordre de 24,1% pour le béton BS100 et de 17,6 % pour le béton BG100. Cependant, après 3 mois de maturation, la baisse de résistance est inférieure à 10,5 MPa de tous les bétons recyclés.

Comme nous le montre le tableau 9.1, les mêmes tendances ont été observées pour les résultats du module de Young des différents bétons. On peut voir que les granulats recyclés ont un effet significatif sur le module d'élasticité, Plus le dosage en granulats recyclés augmente plus le module d'élasticité diminue. Ces résultats sont en bon accord avec les résultats de la littérature qui indiquent une diminution du module d'élasticité de 45% pour un recyclé 100% [14]. Cette réduction est la conséquence de l'utilisation des granulats recyclés caractérisés par une porosité plus élevée et un module élastique plus faible que ceux des granulats naturels. Une substitution de 15% du squelette granulaire par des granulats recyclés entraîne une diminution de 10,5% (BS15), 10,9% (BG15) et 13,4% (BSG15) du module d'élasticité. La faible rigidité des granulats recyclés et l'existence probable des fissures et microfissures au niveau des granulats recyclés, principalement au niveau des grains de gravier sont les principales explications à cette chute. En effet selon Neuville, le module d'élasticité dépend du module d'élasticité des granulats et de la fraction volumique qu'ils occupent dans la matrice cimentaires [57]. Il faut ajouter à cela la qualité de la zone de transition interfaciale (ITZ) entre les granulats recyclés et la matrice cimentaire [161].

9.2 Etude des indicateurs relatifs à la durabilité

9.2.1 Introduction

L'objectif de cette étude, que nous avons effectué sur les bétons à base de granulats recyclés principalement le sable brut contenant des fillers, est d'évaluer certains paramètres primordiaux influençant leur durabilité à savoir l'absorption capillaire, la porosité accessible à l'eau, la perméabilité au gaz et d'observer le comportement de ces bétons exposés à diverses ambiances agressives telles que : séchage/mouillage, diffusion naturel des ions de chlorure et la lixiviation au acide sulfurique.

9.2.2 Mesure de l'absorption d'eau par capillarité

La mesure de l'absorptivité des différents bétons a été réalisée conformément aux recommandations dans la synthèse des travaux du projet GranDuBé et les démarches d'essai sont consignées dans la deuxième partie (§ 5.3.2). Les échantillons prismatiques testés sont de dimensions 5x5x10 cm³ découpés des éprouvettes cubiques 10x10x10 cm³ dans le sens du coulage du béton.

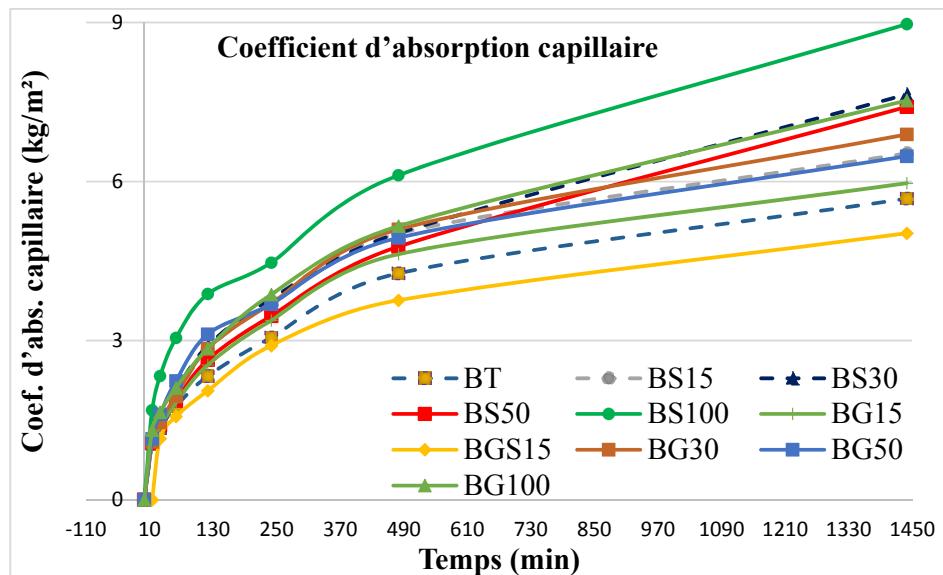


Figure 9.5 Evolution de l'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps

On constate sur la figure 9.5, que l'absorption d'eau par capillarité de tous les bétons est similaire. La cinétique de variation des masses, dès les premières minutes de l'essai, est importante ; en particulier pour les bétons à base de sable recyclé, et qui reste remarquable jusqu'à 24 heures. Les résultats obtenus par Laneyrie, (2014) dans sa thèse [15] montrent que l'absorption dans les cinq premières minutes atteint 85% de l'absorption à 24 heures.

Les valeurs maximales d'absorptions d'eau par capillarité sont constatées pour les bétons à base de granulats recyclés à 100% et plus particulièrement avec du sable recyclé (BS100). Ce comportement est attendu à cause du comportement des granulats recyclés, qui présentent un pourcentage d'absorption d'eau plus élevé, et à la qualité du sable recyclé, qui renferme une partie importante de fines, composée majoritairement de la pâte cimentaire poreuse, formée suite à l'utilisation du concasseur à mâchoires [162]. L'absorption d'eau des bétons à base gravier recyclé est identique à celle du béton témoin BT. Toutefois, dans les dernières heures l'absorption d'eau par capillarité tend à se stabiliser légèrement.

9.2.3 Mesures de la porosité accessible à l'eau et la densité apparente

Les mesures de la porosité communicante accessible à l'eau (R_d) et la densité apparente (δ) des différents bétons ont été réalisées en respectant la norme NF NE 18-459 : 2010 (voir § 5.3.3). L'essai a été effectué sur deux prélèvements de 5 cm d'épaisseur, pour chaque béton, découpé au centre d'éprouvettes cylindrique 11x22 cm² âgées de 56 jours. Les résultats obtenus sont présentées sur la figure 9.6.

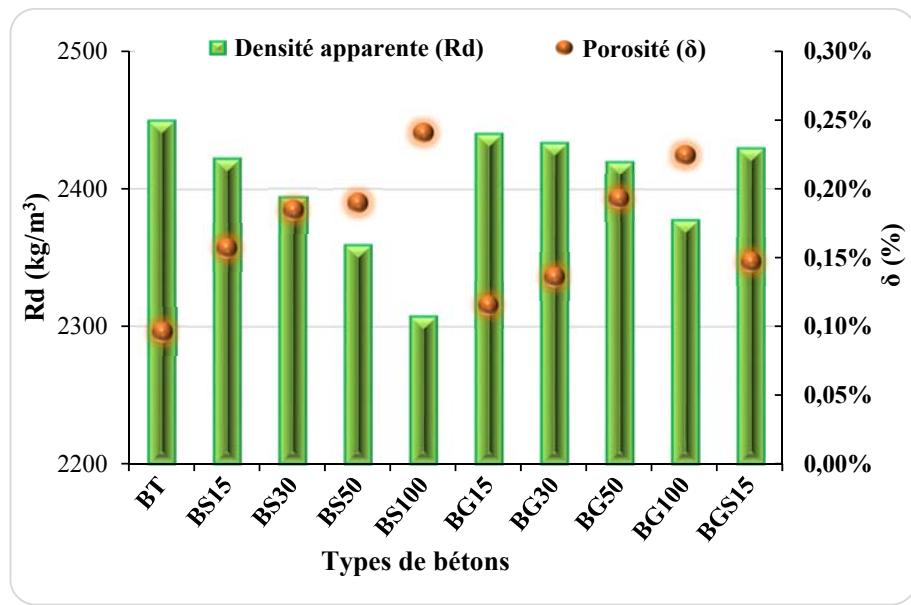


Figure 9.6 Densité apparente et porosité communicante des différents bétons âgés de 56 jours

Les densités apparentes des bétons recyclés, représentées sur la figure 9.6, diminuent significativement avec l'augmentation du pourcentage des granulats recyclés, notamment avec l'incorporation du sable recyclé. Elles sont liées aux densités des granulats utilisés. Cependant, la porosité communicante à l'eau est liée directement à la porosité des granulats et au rapport E/C. Elle augmente avec l'augmentation du taux de substitution du sable naturel par celui recyclé et en moins avec les bétons contenant du gravier recyclé. Cependant, on a enregistré une diminution de la porosité pour un taux de 50% de RSG, ce qui implique que sa compacité est meilleure avec une porosité de 0,12%. Il est à remarquer, par ailleurs que les valeurs de la porosité des bétons recyclés demeurent remarquablement supérieures à celles du béton témoin, la porosité accessible à l'eau la plus élevée est celle du béton BS100 de proportion de 60 % par rapport au béton témoin et de 7 % par rapport au béton à base gravier recyclé.

9.2.4 Essai de perméabilité au gaz d'Hélium

9.2.4.1 Détermination de la perméabilité apparente

La mesure de la perméabilité au gaz a été réalisée selon le mode opératoire recommandé et cité dans le projet GranDuBé [163]. Elle a été accomplie à l'aide d'un perméabilimètre à charge constante de type CEMBUREAU avec des pressions de percolation $P_1 = 2 \text{ bars}$ et de confinement $P_c = 8 \text{ bars}$. Les échantillons testés sont des disques de 5 cm d'épaisseur (5x11cm) découpé au centre d'éprouvettes cylindrique (11x22 cm) de chaque béton, figure 9.7.



Figure 9.7 Photographie d'un échantillon de béton destinée pour la mesure de la perméabilité au gaz

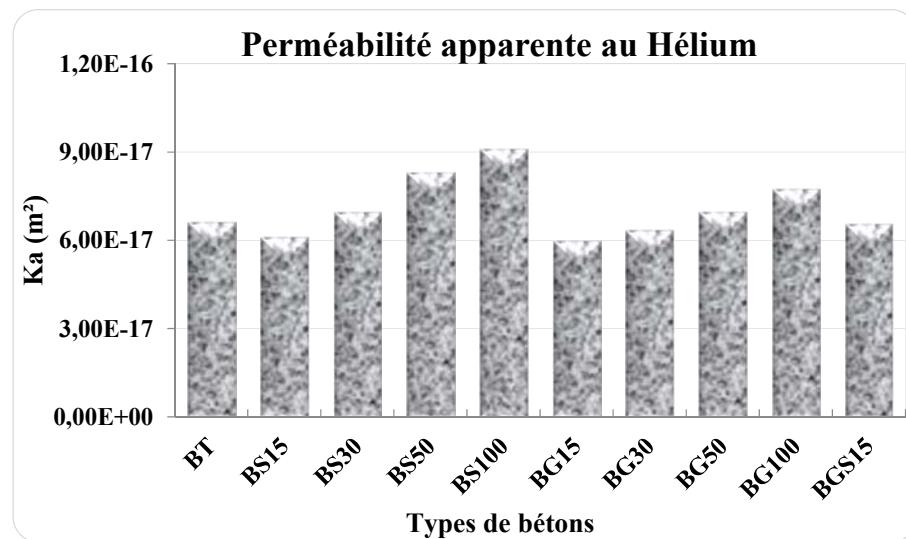


Figure 9.8 Perméabilité apparente au gaz des bétons âgés de 56 jours

On constate d'après la figure 9.8 que le coefficient apparent de perméabilité (K_a) des bétons est très influencé par la présence des fines et des fillers que par l'existence de la pâte cimentaire rattachée aux granulats recyclés. Autrement dit, la perméabilité apparente au gaz augmente de façon très importante avec l'augmentation du taux du sable recyclé que par la variation du pourcentage du gravier recyclé. Particulièrement, la perméabilité du béton BS100 est plus élevée de 17% et 38% par rapport à celles des bétons BG100 et BT, respectivement. Néanmoins, ces bétons recyclés avec leurs perméabilités sont classés comme bétons peu poreux.

Puisque les résistances mécaniques en compression à 28 jours des bétons d'étude, sont supérieures à 35 MPa (la résistance cible) et que le coefficient apparent de perméabilité (K_a) supérieur à 10^{-15} m^2 .

9.2.4.2 Détermination de la perméabilité intrinsèque

Pour chaque béton âgé de 56 jours, deux échantillons ont été testés et 4 pressions de percolation du gaz ont été effectuées pour identifier la perméabilité intrinsèque. En faisant varier la pression de 2, 3, 4 et 5 bars, on détermine les différentes valeurs moyennes de la perméabilité apparente (K_a) obtenue pour chaque béton aux différentes pressions (figures 9.9 et 9.10).

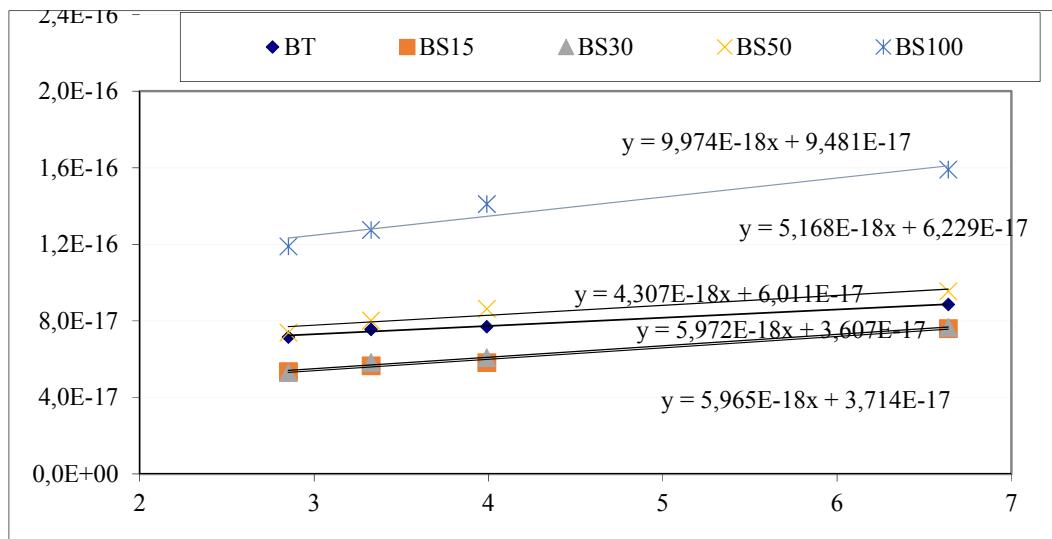


Figure 9.9 Détermination de (K_V) pour les bétons à base GRG par la méthode de Klinkenberg

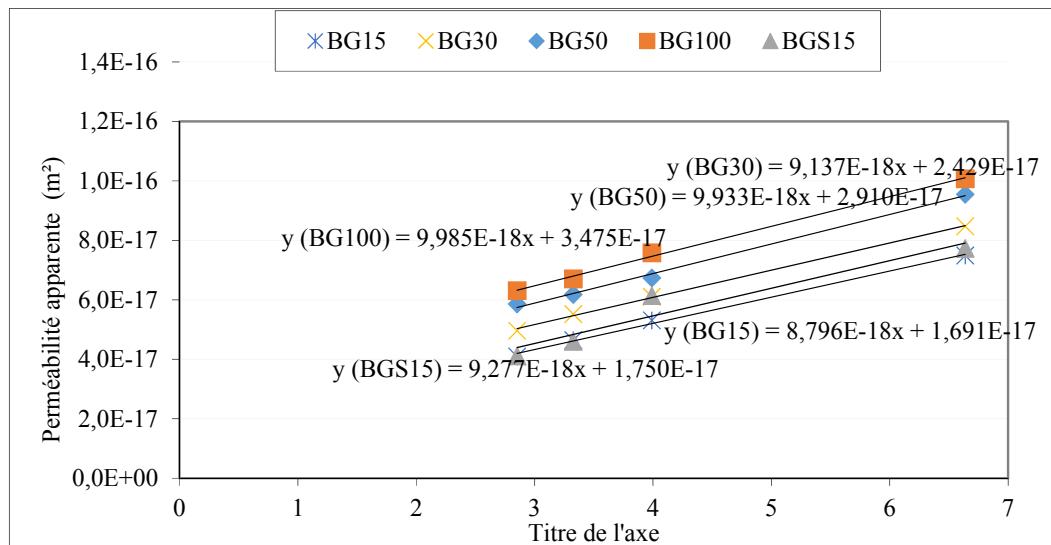


Figure 9.10 Détermination de (K_V) pour les bétons à base RSG par la méthode de Klinkenberg

Les résultats trouvés de la perméabilité intrinsèque (K_V) des différents bétons sont représentés dans la figure 9.11.

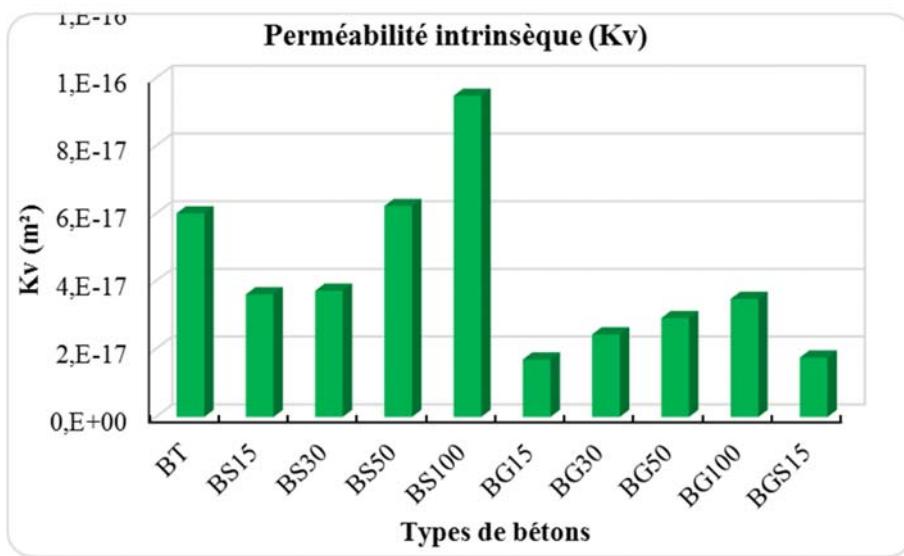


Figure 9.11 Evaluation de la perméabilité intrinsèque des bétons âgés de 56 jours

De la figure 9.11, la perméabilité intrinsèque des bétons augmente avec l'augmentation du taux de remplacement de RCA, en particulier avec du sable recyclé. La perméabilité intrinsèque la plus élevée est enregistrée par le béton à base de 100% de RSG, tandis que la valeur la plus faible est observée dans le béton à base de 15% de gravier recyclé (BG15). A 56 jours de maturation, les différences de pourcentage entre les valeurs les plus élevées et les plus faibles de perméabilité pour le même type de granulats recyclés sont de 163 % et 106 % pour les bétons à base de sable recyclé et à base de gravier recyclé, respectivement. Cette diminution de la perméabilité intrinsèque est due à la porosité élevée du sable recyclé qui augmente avec l'augmentation du taux de substitution.

Selon l'étude de Kwan et al. (2011) [26], le remplacement des graviers naturels par ceux recyclés dans la pratique n'affecterait pas de manière significative la durabilité à long terme des bétons recyclés de structure.

9.2.5 Etude des effets des cycles séchage-imbibition

9.2.5.1 Effets sur la variation de masses

La figure 9.12 présente l'évolution de perte de masses des bétons en fonction du nombre de cycles séchage-imbibition.

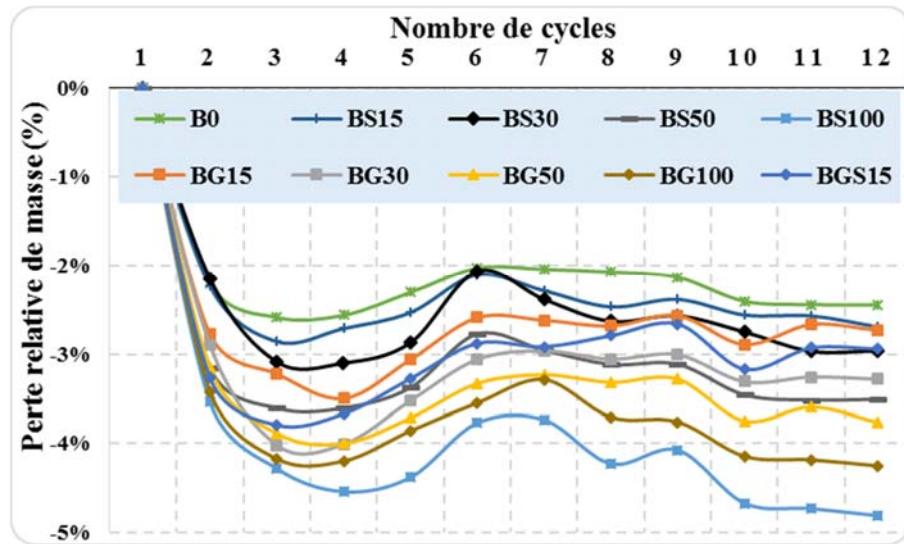


Figure 9.12 Evolution de la perte de masses des bétons en fonction du nombre de cycles séchage-mouillage.

On remarque, à travers la figure 9.12, que pour tous les bétons étudiés présentent des retraits significatifs au terme des 3 premiers cycles de séchage. On constate également qu'entre le 4^{ème} cycle et le 6^{ème} cycle, les retraits font place à un gonflement (expansion) systématique observable sur tous les échantillons. Cela est dû à l'évaporation d'eau qui induit une contraction des éprouvettes par succion capillaire. L'accroissement de la température, au cours des cycles de séchage, provoque des mouvements hydriques qui engendrent des réactions complémentaires de recristallisation des grains de C-S-H, en modifiant leurs microstructures et leurs morphologies. De nouveaux hydrates (portlandite) se forment en milieu confiné dans un béton durci seraient à l'origine de gonflements qui s'opposent au retrait initialement constaté. En d'autres termes, c'est le retrait qui prédomine pendant toute la première phase de l'expérimentation mais au-delà du seuil critique de cycles (6^{ème} cycle), lorsque l'éprouvette est suffisamment appauvrie en eau, le retrait tend à se stabiliser.

9.2.5.2 Effets sur la résistance en compression

Les taux de gain de résistance en compression des différents bétons après les 12 cycles séchages-imbibition sont représentés par la figure 9.13.

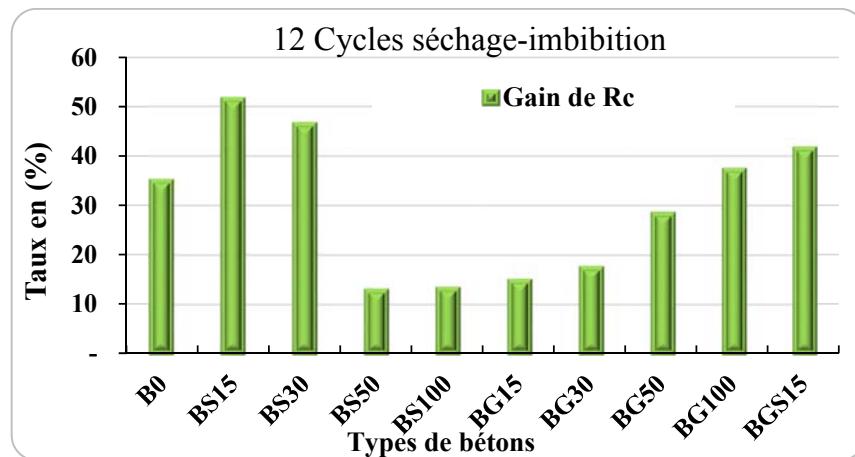


Figure 9.13 Evaluation de la résistance en compression après 12 cycles séchage-imbibition

A travers la figure 9.13, tous les bétons étudiés ont subi des gains de résistance en compression, néanmoins ces derniers sont variable d'un béton à un autre. Les augmentations de résistances marquantes avec 52% et 46% sont enregistrées pour les bétons à base de sable recyclés BS15 et BS30, respectivement. Cependant, le gain de résistance augmente avec l'augmentation du taux d'incorporation du gravier recyclé dans la formulation du béton.

9.2.6 Essai de lixiviation au acide sulfurique

Les échantillons utilisés sont de forme prismatique ($5 \times 5 \times 10 \text{ cm}^3$), obtenus par découpe des éprouvettes cubiques ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) dans le sens du coulage du béton. Ils sont mis dans un bain en solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) pendant 28 jours, avec une concentration 0,5M, surélevées sur des cales avec une agitation manuelle et sans renouvellement de solution. La figure 9.14 présente les pertes de résistances des différents bétons après 28 jours d'attaque, en comparaison des bétons saints à l'âge de 56 jours de maturation.

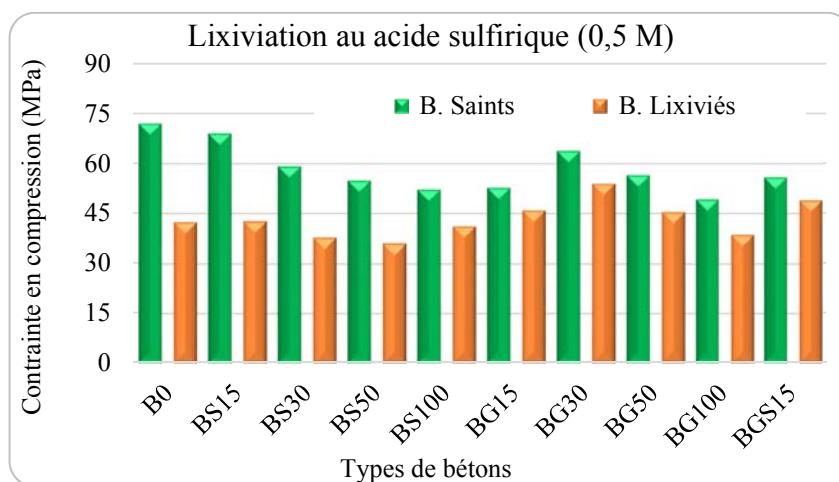


Figure 9.14 Evaluation de la résistance en compression après attaque sulfurique après 28 jours

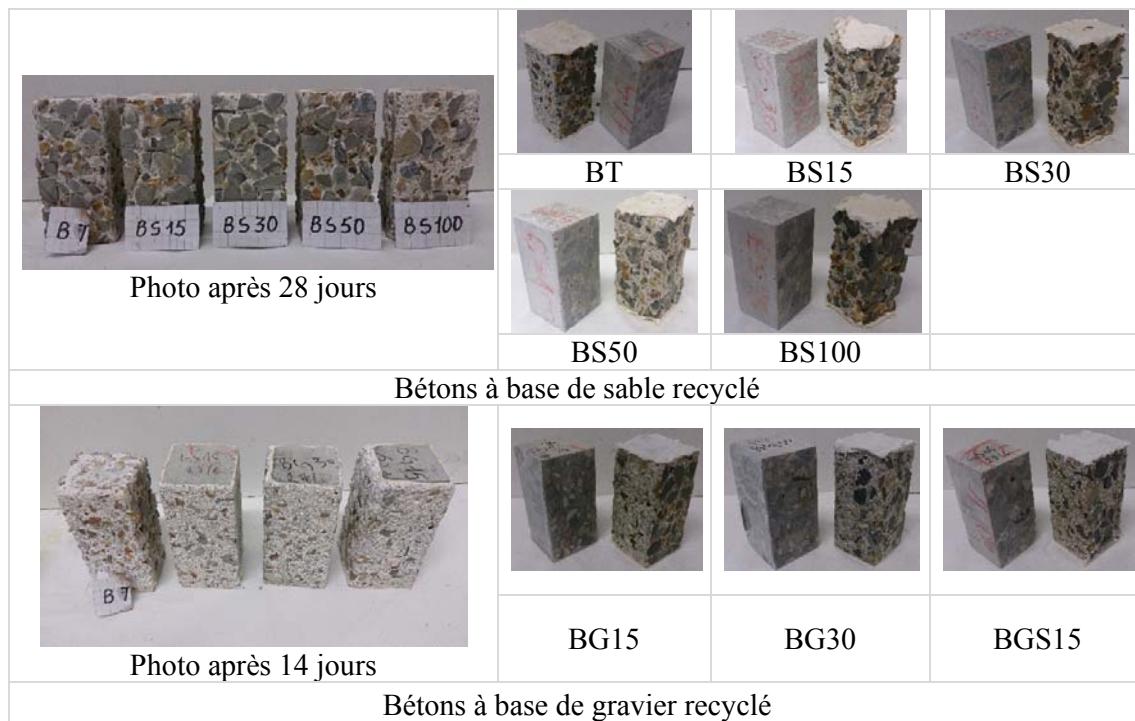


Figure 9.15 Photos d'attaque d'acide sulfurique (0,5 M) sur les bétons après 28 jours.

La lixiviation semble être un phénomène diffusif. La figure 9.14 montre la diminution de la résistance en compression des bétons recyclés après 28 jours de lixiviation. L'attaque de l'acide sur tous les bétons est remarquable et la dégradation maximale constatée de 9,96 % pour le béton BS100 et de 4,78 % pour le béton BG100. Alors BGS15 donne une diminution de 3,2 % et qui a montré une résistance significative par rapport aux autres.

Les dégradations des bétons constatées visuellement sont analogues (figure 9.15) et la dégradation est homogène sur les faces latérales découpés de l'échantillon, par contre sur les faces contre coffrages, la dégradation est remarquable car elles contiennent plus de pâte cimentaire. D'une manière générale la lixiviation est analogue pour tous les bétons. Les dégradations maximales sont prélevées pour le béton recyclé à 100%, BS100, cela est dû sans doute à la porosité des granulats d'une part et la teneur élevée en portlandite et de la calcite d'autre part, caractérisés par leur forte solubilité aux acides. Alors que les bétons à base des graviers recyclés montrent une résistance aux attaques des acides, cela est dû probablement à la faible quantité de la pâte cimentaire rattachée à ces graviers siliceux. Les bétons à faible pourcentage de granulats recyclés (BS15, BG15 et BGS15) montrent une résistance à la lixiviation comparable à celle du béton témoin naturel.

9.2.7 Diffusion des ions chlorures

Les différents échantillons de béton utilisés pour cet essai sont des moitiés des éprouvettes prismatiques ($5 \times 10 \text{ cm}^2$). Le Protocol d'essai est décrit dans la partie 2 cité précédemment (§ 5.3.9). Le calcul du coefficient de diffusion apparent des ions de chlorures ($D_{ns(dif)}$) dépend principalement de la profondeur de pénétration des ions chlorures (X_d). Cette dernière est

déterminée, à partir des mesures de l'épaisseur de la couche contenant les ions chlorures (Zone blanche sous l'effet de pulvérisation d'une solution de nitrate d'argent faiblement concentrée). Les résultats obtenus des deux caractéristiques sont résumés et représenté dans le tableau 9.2.

Tableau 9.2 Profondeur de pénétration des ions chlorures et le coefficient de diffusion apparent des bétons

Types de bétons	Profondeur (X_d) mesurée à 28 jours (mm)	Le coefficient de diffusion apparent des ions de chlorures ($D_{ns(dif)}$) ($10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$)
BT	73,3	5,55
BS15	81,4	6,85
BS30	84,8	7,43
BS50	96,5	9,62
BS100	98,2	9,97
BG15	76,4	6,03
BG30	79,6	6,55
BG50	83,7	7,24
BG100	95,3	9,39
BGS15	75,1	5,83

Le tableau 9.2 montre que la diffusion des ions de chlorures des bétons recyclés augmente avec l'augmentation des granulats recyclés. En d'autres termes, elle est liée à la porosité du béton confectionné. On constate que le coefficient de diffusion apparent des bétons à base de sable recyclé est plus important que celui des bétons à base du gravier recyclé. En effet, ce dernier est caractérisé par une porosité plus faible que celle du sable recyclé, caractérisé par sa forte teneur en fines, composées en majorité d'ancien mortier durci (RMC). En raison de la forte porosité à la nouvelle zone de transition interfaciale entre l'ancien RMC et la nouvelle pâte cimentaire fourni un chemin plus facile aux agressions chimiques. Dans certaines études Kou et al. (2012) et Wang et al. (2013) [132 et 164] ont été relevées les mêmes observations, et que le béton recyclé a révélé sa faible résistance à la diffusion des ions de chlorures.

9.3 Conclusions

Cette partie expérimentale s'est intéressée à l'évaluation de la faisabilité d'utiliser les granulats recyclés avec différentes combinaisons granulaires (sable et gravier) et différentes compositions de bétons ordinaires recyclés sans adjuvants, de classe C35/45. Son objectif est d'apprécier dans quelle mesure ces recyclés sont compatibles aux états frais et durci.

A partir des résultats présentés, il ressort plusieurs appréciations :

- ✓ La principale différence entre les granulats naturels (NA) et ceux recyclés (RCA) est due à la présence de mortier cimentaire (RMC) rattachée à la surface de ces derniers. Par

conséquent, leurs qualités et quantités sont l'un des facteurs clés qui contrôlent la qualité des granulats de béton recyclés.

- ✓ Les granulats recyclés possèdent des caractéristiques et propriétés physico-mécaniques plus faibles que celles des granulats naturels. En fait, ils se caractérisent par une densité saturée à surface sèche (SSS) plus faible qui diminue avec la taille maximale des granulats, une grande porosité, une capacité d'absorption d'eau beaucoup plus élevée et des résistances à la fragmentation plus faibles, qui sont les principales raisons de perte des qualités des RCA par rapport aux NA.
- ✓ Le coefficient de Los Angeles du granulat de béton recyclé est plus élevé que celui des granulats naturels. Il augmente avec l'absorption d'eau et diminue avec la densité et la taille maximale des agrégats. Selon la littérature [14], le gravier recyclé avec un taux d'absorption d'eau inférieure à 7% fournit un coefficient de Los Angeles inférieur à 42%.
- ✓ La granulométrie des graviers recyclés est similaire à celle des graviers naturels. Cependant, le sable recyclé est généralement plus étendu que le granulat fin naturel. De plus, la rugosité superficielle des granulats de béton recyclé est élevée, ce qui affecte également la perte de maniabilité dans le béton.
- ✓ Le maintien de l'ouvrabilité est meilleur lorsque l'état hydrique du granulat recyclé est inférieur ou égal à sa saturation. Elle assure une plasticité permettant une mise en œuvre adéquate. Avant de commencer l'opération de malaxage de béton, il est conseillé d'utiliser les granulats recyclés saturés à surfaces sèches [9 et 55].
- ✓ L'incorporation de granulats recyclés dans le béton, particulièrement le sable recyclé, provoque une diminution de leurs densités à l'état frais et durci, une augmentation de la capacité d'absorption d'eau et une forte porosité que le béton naturel. Cela est dû sans doute à la proportion en volume importante des pores capillaires caractérisant le RMC.
- ✓ Les comportements mécaniques à la flexion, en compression uni-axiale et surtout du module d'élasticité des bétons recyclés sont inférieurs à ceux du béton naturel de référence. Cependant, les résistances caractéristiques des différents bétons recyclés sont généralement satisfaisantes, elles remplissent donc les exigences de l'Eurocode 2 pour le béton ordinaire. Les propriétés des granulats recyclés (absorption d'eau et densité) et leur pré-saturation influencent la qualité de l'ITZ et donc la résistance à la compression du béton.
- ✓ La substitution des granulats naturels par les recyclés, sables ou graviers, à un pourcentage de 30%, limite trouvée dans la littérature, dans la composition du béton n'a pas influencé ces propriétés mécaniques et le taux de substitution du gravier recyclé peut atteindre les 50%.
- ✓ D'autre part, les résultats d'essais relatifs aux indicateurs de durabilité montrent nettement que l'utilisation du sable recyclé, au-delà du taux de 50% dans le béton, est préjudiciable vis-à-vis du développement durable. Les valeurs élevées d'absorption d'eau par capillarité des bétons recyclés sont une indication propre de leur porosité et de la perméabilité élevée de ce type de béton.

IV.9 Etude du comportement des bétons à l'état durci

- ✓ Pour la diffusion des ions de chlorures et la lixiviation aux acides forts, l'utilisation de sable recyclé peut conduire à des problèmes de régularité des bétons produits, tant sur les résistances mécaniques que sur la durabilité. Ce constat est expliqué par la variabilité de la teneur en fines des sables, liée à la teneur en résidu de RMC sur les grains. Car les agressions chimiques se portent principalement sur la pâte de ciment, elles sont d'autant plus graves que le béton est poreux et s'il contient de l'eau libre.
- ✓ Enfin, cette étude comparative entre les bétons naturels et les bétons recyclés a mis en évidence que ces derniers possèdent des caractéristiques acceptables en termes de résistance et de durabilité, et la valorisation des granulats recyclés, en particulier les graviers, pour la fabrication des bétons semble une voie prometteuse. Cependant, l'utilisation des granulats recyclés dans le béton armé en présence d'un environnement agressif est fortement préjudiciable pour la tenue des armatures, d'autant plus que leur coefficient d'absorption est élevé.

Conclusions générales

Le devenir de grandes quantités de déchets de construction et de démolition (C&DW) chaque année constitue un problème économique et environnemental majeur. D'autre part, le domaine du bâtiment et des travaux publics (BTP) doit faire face à long terme à un problème d'appauvrissement des ressources en granulats naturels. Pour ces raisons, notre travail se situe dans le contexte du développement durable et porte sur l'étude des potentialités de valorisation de C&DW dans les matériaux de construction. Bien que, de nombreuses études sont actuellement menées pour trouver une solution à ce double problème environnemental.

Objectifs de cette recherche

L'objectif principal de ce travail expérimental était d'étudier la possibilité de valorisation du recyclage des matériaux issus des bétons déconstruits en les intégrant dans de nouveaux matériaux cimentaires, mortiers et bétons. Nous avons traité les deux types de granulats recyclés : le gravier et le sable selon deux aspects : incorporation du sable recyclé avec et sans fillers (particules inférieures à 125 µm) dans la composition de mortiers de maçonnerie et l'utilisation de gravier recyclés dans le squelette granulaire du béton ordinaire sans adjuvant. Il est aussi envisagé de mieux comprendre le comportement de ces composites à court terme et à long terme et d'évaluer l'effet des différents paramètres recensés influençant ces comportements. Dans ce contexte, nous avons tenté de répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les principales caractéristiques des granulats recyclés issus de béton de démolition et quelle est la différence majeure avec les granulats naturels ?
- Quelle est l'influence du sable recyclé avec ses fines et fillers sur les propriétés des matériaux cimentaires ?
- Le pré-mouillage du sable recyclé et la pré-saturation du gravier recyclé ou l'incorporation du superplastifiant permettent-ils de réduire la porosité et l'absorption d'eau élevée des composites recyclés ?
- Quels sont les taux optimums des granulats recyclés au sein de ces matériaux ?
- Est-il possible d'utiliser ces granulats recyclés pour le béton structurel et quelle est leur influence sur la durabilité ?

Architecture de l'étude

Les travaux effectués durant cette thèse se décomposent en quatre parties principales. Dans la première partie, nous effectuons une revue de la littérature afin de cerner la problématique des granulats recyclés, et principalement issus de béton de démolition et les principales caractéristiques des granulats recyclés (chimiques, physiques et mécaniques) (chapitre 1), l'influence des granulats recyclés (fines, sables et graviers) sur les comportements des matériaux cimentaire à l'état frais et durci (chapitre 2). La seconde partie est consacrée à la description des techniques expérimentales, après avoir explicité nos choix de matériaux utilisés, nous accomplissons les démarches de

Conclusions générales

caractérisation de ces matériaux (chapitre 3), et déployons les méthodologies expérimentales de formulation et d'étude des matériaux cimentaires (mortier et béton) à l'état frais (chapitre 4) ainsi que les dispositifs et essais de caractérisation mécanique et l'étude de durabilité de ces matériaux à l'état durci (chapitre 5).

Ensuite, une étude expérimentale sur les mortiers de maçonnerie est entreprise afin d'en étudier leurs comportements, à court et long terme, à partir de la caractérisation des matériaux utilisés et détermination des propriétés des mortiers à l'état frais (chapitre 6), influence du sable recyclé sur le comportement mécanique du mortier durci et leur incidence sur la durabilité (chapitre 7). Cette étude expérimentale est effectuée, à l'aide de la méthode MBE, dans l'optique d'utiliser les résultats comme outil d'aide à la formulation des bétons recyclés proposé dans la quatrième partie. Dans cette dernière partie, nous explicitons d'abord les matériaux utilisés, la formulation et la composition des différents bétons ordinaires sans adjuvants, suivi de la phase de caractérisations des différents bétons recyclés physiques et mécaniques à l'état frais (chapitre 8). Nous effectuons une étude des bétons avec ces différentes combinaisons à l'état durci, portant essentiellement sur les effets d'influence du sable recyclé avec fines sur leur comportement mécanique et leur durabilité (chapitre 9).

Synthèse générale

Revue de la littérature

La synthèse des principaux travaux bibliographiques scientifiques correspondant à notre thème a permis de dresser une vue globale des connaissances acquises sur l'utilisation des matériaux issus de bétons de démolition. Elle met en évidence que le béton d'origine, le processus de recyclage et la fraction granulométrique sont les trois problèmes primordiaux qui doivent être contrôlés lors de la production de granulats de béton recyclés. Les caractéristiques chimiques et physico-mécaniques des granulats recyclés sont liées étroitement aux trois facteurs principaux : propriétés du béton de démolition source de ces granulats, processus de production et taille obtenue par le procédé de concassage des granulats recyclés.

Les principales différences entre les granulats recyclés et les granulats naturels sont dues à la présence de mortier de ciment attaché (RMC). Par conséquent, la qualité et la quantité de ce RMC sont l'un des facteurs clés qui contrôlent la qualité des granulats de béton recyclés et, en fait, la performance du béton recyclé. Cette gangue de mortier, connue pour présenter une forte porosité, est la raison principale qui confère aux granulats recyclés des caractéristiques intrinsèques plus mauvaises que celles de granulats naturels. Ainsi, l'incorporation de granulats recyclés dans de nouvelles matrices cimentaires (bétons ou mortiers) peut engendrer des altérations des propriétés d'usage à l'état frais et à l'état durci.

Propriétés des granulats recyclés

Dans la première phase de l'étude expérimentale, nous insistons sur la nécessité d'identifier, analyser et caractériser les principales propriétés des matériaux utilisés, notamment les granulats recyclés (RCA). Les propriétés physiques et mécaniques des granulats recyclés en particulier les sables dépendent fortement de la nature et de la qualité des déchets de construction et de

démolition, source de ces granulats. Nous montrons que les propriétés chimiques et physiques des RCA sont sensiblement inférieures à celles des granulats naturels (NA). La principale différence entre les granulats naturels et ceux recyclés est due à la présence de mortier cimentaire (RMC) rattachée à la surface de ces derniers. Par conséquent, leurs qualités et quantités sont l'un des facteurs clés qui contrôlent la qualité des matériaux cimentaires recyclés. Les RCA possèdent des caractéristiques et propriétés physico-mécaniques plus faibles que celles des NA. En fait, ils se caractérisent par une densité saturée à surface sèche (SSS) plus faible qui diminue avec la taille maximale des granulats, une grande porosité, une capacité d'absorption d'eau beaucoup plus élevée et des résistances à la fragmentation plus faibles, qui sont les principales raisons de perte des qualités des RCA par rapport aux NA. Le coefficient de Los Angeles des RCA est plus élevé que celui des granulats naturels et d'après la littérature, il augmente avec l'absorption d'eau et diminue avec la densité et la taille maximale des granulats. La granulométrie des graviers recyclés est similaire à celle des graviers naturels, suite à l'utilisation du même mode de concassage. Cependant, la rugosité superficielle des RCA est élevée, ce qui affecte également la perte de maniabilité. Le sable recyclé est généralement plus étendu que le granulat fin naturel. De plus, ce sable recyclé est caractérisé par un taux élevé de fines ($<63 \mu\text{m}$) supérieur à 5% et par un taux élevé de fillers ($<125 \mu\text{m}$) supérieur à 10% ce qui conduit à une absorption d'eau très importante : 13,4 %, sept fois supérieure à celle du sable naturel.

Mortiers de maçonnerie

Il ressort de manière palpable que l'incorporation du sable recyclé par substitution du sable naturel dans les mortiers engendre des pertes d'ouvrabilité et des comportements mécaniques amoindris. L'étude bibliographique a montré l'influence négative du RMC sur les caractéristiques rhéologiques et sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires recyclés. Le pré-mouillage du sable recyclé est indispensable, pour s'affranchir d'une probable absorption de l'eau de gâchage par le sable recyclé, d'une part et pour maintenir la même plasticité désirée des mortiers confectionnés d'autre part. Les optimums des quantités d'eau de pré-mouillage déterminées sont de l'ordre de 9% du poids du sable recyclé avec fillers (RSB) et de 6% du poids du sable recyclé sans fillers (RSB-F).

Nous constatons en effet que à travers l'étude comparative entre les mortiers à base de sables recyclés RSB et RSB-F a mis en évidence leurs principales caractéristiques physiques et physico-chimiques et leurs influences sur les propriétés des mortiers confectionnés que ce soit rhéologiques ou mécaniques. Les performances mécaniques en flexion et à la traction par fendage, dans toutes les échéances, des mortiers à base du RSB-F sont meilleures que celles des mortiers à base de RSB. Les contraintes de traction par flexion et par fendage augmentent avec la substitution du sable naturel par le sable recyclé jusqu'à un optimum de 50% puis elles chutent. A 7 jours, les mortiers recyclés ont montré des résistances en compression plus élevées que celle du mortier naturel de référence. Cependant, à 28 et à 56 jours, les résistances en compression enregistrent des optimums pour 30% de RSB et 50% de RSB-F, qui sont supérieurs à ceux trouvés dans la littérature (20 à 30%). Notant que, l'incorporation du superplastifiant semble apporter aux mortiers de maçonnerie étudiés des améliorations intéressantes de leurs propriétés rhéologiques et leur comportement

Conclusions générales

mécanique, particulièrement pour les mortiers recyclés, dont on a enregistré un gain de la résistance en compression de 40 % pour un taux de 75 % de RSB-F.

La durabilité des mortiers recyclés à base de sable recyclé avec fines (RSB), à travers l'étude des indicateurs de durabilité généraux et spécifiques, montre une forte capacité d'absorption d'eau, une porosité accessible à l'eau élevée et une perméabilité au gaz importante en fonction du taux du sable recyclé. Cela est engendré sans doute à la proportion en volume importante des pores capillaires. Cependant, les mortiers recyclés ont approuvé une durabilité potentielle équivalente, voire meilleure que celle du mortier de référence. Principalement vis-à-vis aux effets du gel-dégel, des acides et même avec un taux de 100% de RSB. En plus, en termes d'agressions chimiques, la résistance des mortiers recyclés à la lixiviation à l'acide sulfurique est bien remarquable, particulièrement avec le taux de 100% du RSB, suite à la formation de l'étringite qui provoque la chute de résistance mécanique et la carbonate de calcium qui joue le rôle d'une barrière de protection.

Bétons ordinaires sans adjuvant

Cette partie expérimentale s'est intéressée à l'évaluation de la faisabilité d'utiliser les granulats recyclés avec différentes combinaisons granulaires (sable et gravier) et différentes compositions de bétons ordinaires recyclés sans adjuvants, de classe C35/45. Son objectif est d'apprécier dans quelle mesure ces recyclés sont compatibles aux états frais et durci. Le maintien de l'ouvrabilité est meilleur lorsque l'état hydrique du granulat recyclé est inférieur ou égal à sa saturation. Elle assure une plasticité permettant une mise en œuvre adéquate. Avant de commencer l'opération de malaxage de béton, il est conseillé d'utiliser les granulats recyclés saturés à surfaces sèches. L'incorporation de granulats recyclés dans le béton, particulièrement le RSB, provoque une diminution de leurs densités à l'état frais et durci, une augmentation de la capacité d'absorption d'eau et une forte porosité que le béton naturel. Cela est dû sans doute à la proportion en volume importante des pores capillaires caractérisant le RMC.

Les comportements mécaniques à la flexion, en compression uni-axiale et surtout du module d'élasticité des bétons recyclés sont inférieurs à ceux du béton naturel de référence. Ils diminuent de façon linéaire avec l'augmentation du taux des RCA, et plus particulièrement avec celui du RSB. Cependant, les résistances caractéristiques des différents bétons recyclés confectionnés sont généralement satisfaisantes, elles remplissent donc les exigences de l'Eurocode 2 pour le béton ordinaire. Les propriétés des granulats recyclés (absorption d'eau et densité) et leur pré-saturation influencent la qualité de l'ITZ et donc la résistance à la compression du béton. La substitution des granulats naturels par les recyclés, sables ou graviers, à un pourcentage de 30%, limite trouvée dans la littérature, dans la composition du béton n'a pas influencée ces propriétés mécaniques et le taux de substitution du gravier recyclé peut atteindre les 50%.

D'autre part, les résultats d'essais relatifs aux indicateurs de durabilité montrent nettement que l'utilisation du sable recyclé, au-delà du taux de 50% dans le béton, est préjudiciable vis-à-vis du développement durable. Les valeurs élevées d'absorption d'eau par capillarité des bétons recyclés sont une indication propre de leur porosité et de la perméabilité élevée de ce type de béton. Pour la diffusion des ions de chlorures et la lixiviation aux acides forts (acide sulfurique), l'utilisation de

sable recyclé peut conduire à des problèmes de régularité des bétons produits, tant sur les résistances mécaniques que sur la durabilité. Ce constat est expliqué par la variabilité de la teneur en fines des sables, liée à la teneur en résidu de RMC sur les grains. Car les agressions chimiques se portent principalement sur la pâte de ciment, elles sont d'autant plus graves que le béton est poreux et s'il contient de l'eau libre.

L'étude comparative entre les bétons naturels et les bétons recyclés a mis en évidence que ces derniers possèdent des caractéristiques acceptables en termes de résistance et de durabilité, et la valorisation des granulats recyclés, en particulier les graviers, pour la fabrication des bétons semble une voie prometteuse. Cependant, l'utilisation des granulats recyclés dans le béton armé en présence d'un environnement agressif pourra être préjudiciable pour la tenue des armatures, d'autant plus que leur coefficient d'absorption est élevé.

Enfin, ce travail de thèse a donc montré la faisabilité de l'utilisation de granulats recyclés pour la confection de nouveaux mortiers de maçonnerie et de bétons ordinaires. Dans la limite des pourcentages de ces recyclés vers 30% avec du RSB jusqu'à 50% de RSB-F dans les mortiers et qui peuvent atteindre les 50% pour les graviers recyclés issus de béton de démolition, sans toutes fois oublier la pré-saturation des granulats recyclés et le respect des conditions de cure des matériaux cimentaires.

Recherches futures

Dans cette étude, notre connaissance et notre compréhension des phénomènes régissant le comportement des mortiers et bétons recyclés ont progressé. Néanmoins certains points restent à éclaircir ou à étudier.

- ✓ Les granulats recyclés générés à partir de béton de structure et l'utilisation de superplastifiant ouvrent de nouvelles perspectives pour le béton de granulats recyclés, permettant la production de béton à haute performance.
- ✓ Etude de l'interface pâte/granulat, en confectionnant des bétons recyclés sans sable (gravier + pâte cimentaire).
- ✓ Lors du concassage de déchets de béton, des quantités importantes de fraction fine sont générées et inévitable. L'utilisation du sable recyclé est indispensable dans les bétons de sable comme granulat de base ou comme fillers.

Références bibliographiques

1. Galvín, A.P.; Agrela, F.; Ayuso, J.; Beltrán, M.G. and Barbudo, A.; (2014). Leaching assessment of concrete made of recycled coarse aggregate: physical and environmental characterisation of aggregates and hardened concrete. *Waste Manage.*; 34: 1693-1704.
2. Pedro, D.; De Brito, J. and Evangelista, L.; (2014). Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. *Constr. Build. Mater.*; 71: 141-151.
3. Saheed, O. A.; Lukumon, O. O.; Muhammad, B.; Olugbenga, O. A.; Hafiz, A. A.; Hakeem, A. O. and Kabir, O. K.; 2015. Waste effectiveness of the construction industry: Understanding the impediments and requisites for improvements. *Resour. Conserv. Recycl.*; 102: 101-112.
4. Bilal, M.; Oyedele, L.; Akinade, O.; Ajayi, S. ed; Alaka, H.; Owolabi, H.; Qadir, J.; Pasha, M. and Bello, S.; (2016). Big data architecture for Construction Waste Analytics (CWA): A conceptual framework. *J. Buil. Eng.*; 6: 144-156.
5. Pacheco, J.; de Brito, J.; Ferreira, J. and Soares, D.; (2015). Dynamic characterization of full-scale structures made with recycled coarse aggregates. *J. Clean. Prod.*; 142[4]: 4195-4205.
6. Özalp, F.; Yılmaz, H. D.; Kara, M.; Kaya, Ö.; Şahin, A. (2016). Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone kerb and concrete pipes. *Constr. Build. Mater.*; 110: 17-23.
7. Yves, Charonnat; (2011). PN RECYBETON (RECYclage complet des BETONs). Etude de faisabilité. Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil (IREX).
8. Ait Mohamed Amer adem; (2017). Valorisation des matériaux de démolition dans la construction, Thèse de Doctorat 3ème cycle LMD en génie civil: Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, Algérie.
9. Nguyen, Vu Nam; (2016). Valorisation de fines et granulats issus de bétons recyclés comme matériaux cimentaires. Thèse de doctorat en génie civil: Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), France.
10. Omary, S.; Ghorbel, E. and Wardeh, G.; (2016). Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. *Constr. Build. Mater.*; 6: 1-16.
11. Tabsh, S.W. and Abdelfatah, A.; (2009). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Constr. Build. Mater.*; 23: 1163-1167.
12. Kenai S. et Debieb F.; (2011). Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de briques et de béton concassé. *Mater. Struct.*; 44: 815-824.
13. Arabi N. et Berredjem L.; (2011). Valorisation des déchets de démolition comme granulats pour bétons. Déchets - revue francophone d'écologie industrielle. 60: 25-30.
14. González-Taboada, I.; González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F.; Carro-López, D.; (2016). Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis. *Mater. Construcc.*; 66 [323]: e089.
15. Laneyrie, Cléo; (2014). Valorisation des déchets de chantier du BTP : comportement à haute température des bétons de granulats recyclés. Thèse de doctorat en génie civil: Université de Cergy Pontoise, France.
16. Debieb, F.; Courard, L.; Kenai, S. and Degeimbre, R.; (2010). Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. *Cem. Concr. Compos.*; 32: 421-426.
17. Lamond, J.F.; Campbell, Sr R.L.; Giraldi, A.; Jenkins, N.J.; Campbell, T.R. and Halczak, W.; (2002). Removal and reuse of hardened concrete. *ACI Mater J.*; 99: 300-325.

18. González-Fonteboa, B.; Seara-Paz, S.; de Brito, J.; González-Taboada, I.; Martínez-Abella, F.; Vasco-Silva, R.; (2018). Recycled concrete with coarse recycled aggregate, An overview and analysis. *Mater. Construcc.*; 68[330]: e151.
19. Thomas, C.; Setièn, J.; Polanco, J. A.; Alaejos, P. and Sánchez de Juan, M.; (2013). Durability of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*; 40: 1054-1065.
20. Ulsen, C.; Kahn, H.; Hawlitschek, G.; Masini, E.A.; Angulo, S.C. and John, V.M.; (2013) Production of recycled sand from construction and demolition waste. *Constr. Build. Mater.*; 40: 1168-1173.
21. Evangelista, L. and de Brito, J.; (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cem. Concr. Compos.*; 29[5]: 397-401.
22. Padmini, A.K.; Ramamurthy, K. and Mathews, M.S.; (2009). Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*; 23 [2]: 829-836.
23. Zhao, Z.; Remond, S.; Damidot, D. and Weiya, Xu; (2015). Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. *Constr. Build. Mater.*; 81: 179-186.
24. Braga, M.; de Brito, J. and Veiga, R.; (2012). Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. *Constr. Build. Mater.*; 36: 960-968.
25. Corinaldesi, V. and Moriconi, G.; (2009). Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*; 23[8]: 2869-2876.
26. Kwan, W.H.; Ramli, M.; Kam, K.J. and MZ Sulieman, M.Z.; (2012). Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Constr. Build. Mater.*; 26: 565-573
27. Akbarnezhad, A.; Ong, K.C.G.; Tam, C.T. and Zhang, M.H.; (2013). Effects of the parent concrete properties and crushing procedure on the properties of coarse recycled concrete aggregates. *J. Mater. Civ. Eng.*; 25[12]: 1795-1802.
28. Feys, C.; Joseph, M.; Boehme, L. and Zhang Y.; (2016). Assessment of fine recycled aggregates in mortar. CESB16 Prague Materials Technologies and Components for Sustainable Buildings. 1071-1078.
29. Duan, Z.H.; Kou, S.C. and Poon, C.S.; (2013). Prediction of compressive strength of recycled aggregate concrete using artificial neural networks. *Constr. Build. Mater.*; 40: 1200 -1206.
30. Sánchez de Juan M. and Alaejos Gutierrez P.; (2004). Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, RILEM, Actes du colloque Use of Recycled Materials in Building and Structures, Barcelone, Espagne.
31. de Juan, M.S. and Gutiérrez, P.A.; (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.*; 23[2]: 872- 877.
32. Ferreira, L.; de Brito, J. and Barra, M.; (2011). Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. *Mag. Concr. Res.*; 63 [8]: 617-627.
33. Qiong Liu, Q.; Xiao, J. and Sun, Z.; (2011). Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete. *Cem. Concr. Res.*; 41: 1050-1057.
34. Lee, G.C. and Choi, H.B.; (2013). Study on interfacial transition zone properties of recycled aggregate by micro-hardness test. *Constr. Build. Mater.*; 40: 455-460.
35. Evangelista, L.; Guedes, M.; de Brito, J.; Ferro, A.C. and Pereira, M.F.; (2015). Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. *Constr. Build. Mater.*; 86: 178-188.
36. Belin, P.; Habert, G.; Thiery, M. and Roussel, N.; (2014). Cement paste content and water absorption of recycled concrete coarse aggregates. *Mater. Struct.*; 47[9]: 1451-1465.
37. Manzi, S.; Mazzotti, C. and Bignozzi, M.C.; (2013). Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate. *Cem. Concr. Compos.*; 37[1]: 312-318.
38. Duan, Z.H.; Poon, C.S.; (2014). Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. *Mater. Design*; 58: 19-29.

Références bibliographiques

39. Li, J.; Xiao, H. and Zhou, Y.; (2009). Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*; 23 [3]: 1287-1291.
40. Akbarnezhad, A.; Ong, K.C.G.; Zhang, M.H.; Tam, C.T. and Foo, T.W.J.; (2011). Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.*; 25 [8]: 3469-3479.
41. Juez, M.; Cazacliu, B.; Cothenet, A.; Artoni, R. and Roquet, N.; (2016). Recycled concrete aggregate attrition during mixing new concrete, *Constr. Build. Mater.*; 116: 299-309.
42. Evangelista, L. and de Brito, J.; (2014). Concrete with fine recycled aggregates: A review. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*; 18 [2]: 129-172.
43. Limbachiya, M.C.; Marrocchino, E. and Koulouris, A.; (2007). Chemical-mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate. *Waste Manage.*; 27[2]: 201-208.
44. Angulo, S.C.; Ulsen, C.; John, V.M.; Kahn, H. and Cincotto M.A.; (2009). Chemical-mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brazil. *Waste Manage.*; 29[2]: 721-730.
45. Saiz-Martínez, P.; González-Cortina, M. and Fernández-Martínez, F.; (2015). Characterization and influence of fine recycled aggregates on masonry mortars properties. *Mater. Construcc.*; 65[319]: e058.
46. Kou, S.C.; Poon, C.S.; Etxeberria, M.; (2011). Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cem. Concr. Compos.*; 33[2]: 286-291.
47. Pereira, P.; Evangelista, L. and de Brito, J.; (2012). The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.*; 28[1]: 722-729.
48. Kou, S. C. and Poon, C. S.; (2009). Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates. *Constr. Build. Mater.*; 23[8]: 2877-2886.
49. Evangelista, L. and de Brito, J.; (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cem. Concr. Compos.*; 32: 9-14.
50. Zega, C. J., and Di Maio, Á. A.; (2011). Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. *Waste Manage.*; 31[11]: 2336-2340.
51. Zhao, Zengfeng; (2014). Valorisation des sables de béton recyclé pour la fabrication de mortiers (Re-use of fine recycled concrete aggregates for the manufacture of mortars). Thèse de doctorat en génie civil: Ecole des Mines de Douai et Université Lille 1, France.
52. Tam, V.W.Y.; Wang, K. and Tam, C.M.; (2008). Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis. *J. Hazard Mater.*; 152: 703-714.
53. Fonseca, N.; de Brito, J. and Evangelista, L.; (2011). The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste. *Cem. Concr. Compos.*; 33[6]: 637-643.
54. Agrela, F.; Sánchez de Juan, M.; Ayuso, J.; Geraldés, V.L. and Jiménez, J.R.; (2011). Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. *Constr. Build. Mater.*; 25[10]: 3950-3955.
55. Mefteh, 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.
56. Cartuxo, F.; de Brito, J.; Evangelista, L.; Jiménez, J.R. and Ledesma, E.F.; (2015). Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates - Influence of the superplasticizers. *Constr. Build. Mater.*; 89: 26-47.

57. Neville, A.M.; (2000). Les propriétés du béton, Paris, Edition Eyrolles.
58. Kou, S.C.; Poon, C.S. and Dixon, C.; (2007). Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. *J. Mater. Civ. Eng.*; 19[9]: 709-711.
59. Janker, S.S. and Rao, C.B.K.; (2004). Index of aggregate particle shape and texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning. *Cem. Concr. Res.*; 34[11]: 2021-2027.
60. Dreux, G. et Festa, J.; (1998). Nouveau Guide du Béton. 8ème édition, Paris, Edition Eyrolles, France.
61. Westerholm, M.; Lagerblad, D.; Silfverbrand J. and Forssberg, E.; (2008). Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. *Cem. Concr. Compos.*; 30[4]: 274-282.
62. Miren Etxeberria, L.; (2004). Experimental Study on Microstructure and Structural Behaviour of Recycled Aggregate Concrete. Thèse de doctorat : Université polytechnique de Catalogne - Espagne.
63. Poon, C. S. and Lam, C. S.; (2008). The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks. *Cem. Concr. Compos.*; 30[4] : 283-289.
64. Khoshkenari, A. G.; Shafiq, P.; Moghimi, M. and Mahmud, H. B.; (2014). The role of 0-2 mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete. *Materials & Design*; 64: 345-354.
65. Cuenca-Moyano, G.M.; Martín-Morales, M.; Valverde-Palacios, I.; Valverde-Espinosa, I. and Zamorano, M.; (2014). Influence of pre-soaked recycled fine aggregate on the properties of masonry mortar. *Constr. Build. Mater.*; 70: 71-79.
66. Poon, C.S.; Shui, Z.H. and Lam, L.; (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Constr. Build. Mater.*; 18[6]: 461-468.
67. Topcu, I. B. and Sengel, S.; (2004). Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cem. Concr. Res.*; 34: 1307-1312.
68. Rao, A.; Jha, K.N. and Misra, S.; (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resour. Conserv. Recycl.*; 50: 71-81.
69. Brand, A.S.; Roesler, J.R. and Salas, A.; (2015). Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*; 79: 83-89.
70. Katz, A.; (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cem. Concr. Res.*; 33[5]: 703-711.
71. Fernández-Ledesma, E. Jiménez, J.R.; Ayuso, J.; Corinaldesi, V. and Iglesias-Godino, F.J.; (2016). A proposal for the maximum use of recycled concrete sand in masonry mortar design. *Mater. Construcc.*; 66[321]: e075.
72. Casuccio, M.; Torrijos, M.C.; Giaccio, G. and Zerbino, R.; (2008). Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*; 22 [7]: 1500-1506.
73. Kou, S.C. and Poon, C.S.; (2015). Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*; 77: 501 -508.
74. Koenders, E.A.B., Pepe, M. and Martinelli, E.; (2014). Compressive strength and hydration processes of concrete with recycled aggregates. *Cem. Concr. Res.*; 56: 203-212.
75. Etxeberria, M.; Vázquez, E.; Marí, A. And 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.
76. Li, X.; (2008). Recycling and reuse of waste concrete in China. Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete. *Resour. Conserv. Recycl.*; 53: 36-44.

Références bibliographiques

77. Abd Elhakam, A., Mohamed, A. E. and Awad, E.; (2012). Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. *Constr. Build. Mater.*; 35: 421-427.
78. Zhao, Y.; Zeng, W. and Zhang, H.; (2017). Properties of recycled aggregate concrete with different water control methods. *Constr. Build. Mater.*; 152: 539-546.
79. Kou, S.C.; Poon, C.S. and Agrela, F.; (2011). Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. *Cem. Concr. Compos.*; 33[8]: 788-795.
80. Poon, C.S.; Kou, S.C. and Lam, L.; (2007). Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. *Mater. Struct.*; 40 [9]: 981-988.
81. Kovler, K. and Roussel, N.; (2011). Properties of fresh and hardened concrete. *Cem. Concr. Res.*; 41[7]: 775-792.
82. Xiao, J.; Li, W.; Fan, Y. and Huang, X.; (2012). An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011). *Constr. Build. Mater.*; 31: 364-383.
83. Butler, L.; West, J.S. and 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.
84. Folino, P.; and Xargay, H.; (2014). Recycled aggregate concrete - Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression. *Constr. Build. Mater.*; 56: 21-31.
85. Silva, R.V.; Neves, R.; De Brito, J. and Dhir, R.K.; (2015). Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Compos.*; 62: 22-32.
86. Seara-Paz, S.; González-Fonteboa, B.; Martínez-Abella, F.; González-Taboada, I.; (2016). Time-dependent behaviour of structural concrete made with recycled coarse aggregates. Creep and shrinkage. *Constr. Build. Mater.*; 122: 95-109.
87. Pedro, D.; de Brito, J.; Evangelista, L.; (2017). Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties. *Constr. Build. Mater.*; 154: 294-309.
88. Gonçalves J.P. et al.; (2007). Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars. *Cem. Concr. Res.*; 37[6]: 924-932.
89. Gomez-Soberon, J.M.V.; (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate an experimental study. *Cem. Concr. Res.*; 32: 1301- 1311.
90. González-Taboada, I.; González-Fonteboa, B.; Martínez-Abella, F. and Pérez-Ordóñez, J.L.; (2013). Prediction of the mechanical properties of structural recycled concrete using multivariable regression and genetic programming. *Constr. Build. Mater.*; 106: 480-499.
91. Silva, R.V.; de Brito, J. and Dhir, R.K.; (2015). The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: A review. *European J. Environ. Civ. Eng.*; 19[7]: 825-849.
92. Corinaldesi, V.; (2010). Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Constr. Build. Mater.*; 24 [9]: 1616-1620.
93. González Fonteboa, B., (2002). Hormigones conàridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecànicas y comportamiento estructural a cortante. Thèse de Doctorat, Université de la Coruna - Espagne.
94. Pedro, D.; de Brito, J. and Evangelista, L.; (2015). Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste: influence of the crushing process. *Mater. Struct.*; 48[12]: 3965-3978.
95. Eiras-López, J.; Seara-Paz, S.; González-Fonteboa, B. and Martínez-Abella, F.; (2017). Bond behaviour of recycled concrete. Analysis and prediction of bond stress-slip curve. *J. Mater. Civ. Eng.*; 29 [10].
96. Cassagnabère, F.; Mouret, M.; Lachemi, M.; Escadeillas, G.; Rakotoarimanga, A. et Bertrand, A.; (2012). Impact du taux de substitution de sable recyclé sur les propriétés d'un mortier

- étuvé. Colloque International Francophone NoMaD2012, LMDC/AUGC, Toulouse - France.
- 97. Khatib, J.M.; (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cem. Concr. Res.*; 35[4]: 763-769.
 - 98. Ji, T.; Chen, C.Y.; Chen, Y.Y.; Zhuang, Y.Z.; Chen, J.F. and Lin, X.; (2013). Effect of moisture state of recycled fine aggregate on the cracking resistibility of concrete. *Constr. Build. Mater.*; 44: 726-733
 - 99. Baron J. et Olivier J. P.; (1997). Les bétons, bases et données pour leur formulation. Association technique de l'industrie des liants hydrauliques. 2^{ème} tirage, Edition Eyrolles.
 - 100. Tavakoli, M. and Soroushian, P.; (1996). Strengths of recycled aggregate concrete made using field- demolished concrete as aggregate. *ACI materials Journal*. 93[2]: 178-181.
 - 101. Sánchez de Juan M. and Gutiérrez, P. A.; (2004). Influence of recycled aggregate quality on concrete properties. International RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures. Barcelona, Spain.
 - 102. Behera, M.; Bhattacharyya, S.K.; Minocha, A.K.; Deoliya, R.; Maiti, S.; (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Constr. Build. Mater.*; 68: 501-516.
 - 103. Sucic, A.; Lotfy, A.; (2016). Effect of new paste volume on performance of structural concrete using coarse and granular recycled concrete aggregate of controlled quality. *Constr. Build. Mater.*; 108: 119-128.
 - 104. Malešev, M.; Radonjanin, V. and Marinković, S.; (2010). Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. *Sustainability*; 2: 1204-1225.
 - 105. Chakradhara Rao, M.; Bhattacharyya, S.K. and Barai, S.V.; (2011). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Mater. Struct.*; 44[1]: 205-220.
 - 106. Ahmed Zakarya, Bendimerad; (2016). Comportements au jeune âge et différé des bétons recyclés: Influence de la saturation initiale en eau et du taux de substitution. Thèse de doctorat en génie civil: Ecole Centrale de Nantes, France.
 - 107. Yang, K.; Chung, H. et Ashour, A.F.; (2008). Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Materials Journal*; 105[3]: 289-296.
 - 108. Butler, L.; West, J.S. and 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.
 - 109. Etxeberria, M.; Marí, A. R. and Vázquez, E.; (2007). Recycled aggregate concrete as structural material. *Mater. Struct.*; 40[5]: 529-541.
 - 110. González-Fonteboa, B.; Martínez-Abella, F.; Carro López, D. and Seara-Paz, S.; (2011). Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate. *Constr. Build. Mater.*; 25[5]: 2335-2342.
 - 111. de Brito, J. and Robles, R.; (2010). Recycled aggregate concrete (RAC) methodology for estimating its long-term properties. *Indian J. Eng. Mater. Sci.*; 17[6]: 449-462.
 - 112. Behnood, A.; Olek, J. and Glinicki, M.A.; (2015). Predicting modulus elasticity of recycled aggregate concrete using M5' model tree algorithm. *Constr. Build. Mater.*; 94: 137-147.
 - 113. Silva, R.V.; de Brito, J. and Dhir, R.K.; (2015). Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*; 83: 108-118.
 - 114. Silva, R. V.; de Brito, J. and 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.
 - 115. Rahal, K.; (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Build. Environ.*; 42[1]: 407-415.

Références bibliographiques

116. López-Gayarre, F.; Serna, P.; Domingo-Cabo, A.; Serrano- López, M.A. and López-Colina, C.; (2009). Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste Manage.*; 29[12]: 3022-3028.
117. Martinez-Lage, I.; Martinez-Abella, F.; Vazquez-Herrero, C. and Perez-Ordóñez, J. L.; (2012). Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate. *Constr. Build. Mater.*; 37: 171-176.
118. Baofan, C.; (2013). Basic mechanical properties and microstructural analysis of recycled concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*; 28[1]: 104-109.
119. Wardeh, G., Ghorbel, E. and Gomart, H.; (2015). Mix Design and Properties of Recycled Aggregate Concretes: Applicability of Eurocode 2. *Int. J. Concr. Struct. Mater.*; 9: 1.
120. Wirquin, E.; Zaharieva, R.H. and Buyle-Bodin, F.; (2000). Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité-Application aux bétons de granulats recyclés. *Mater. Struct.*; 30[22]: 403-408.
121. Olorunsogo, F.T. and Padayachee, N.; (2002). Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. *Cem. Concr. Res.*; 32[2]: 179-185.
122. Padmini, A.K.; Ramamurthy, K. and Mathews, M.S.; (2002). Relative moisture movement through recycled aggregate concrete. *Mag. Conc. Res.*; 54[5]: 377-384.
123. Poon, C.S. and Chan, D.; (2007). Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates. *Constr. Construire. Mater.*; 21[1]: 164-175.
124. González, B. and Martínez, F., (2004). Shear strength of concrete with recycled aggregates. in: eds. Vázquez E, Hendriks C & Janssen GMT (Ed.), Int. RILEM Conf. Use Recycl. Mater. Build. Struct., Barcelona, Spain 619-628.
125. Amorim, P.; de Brito, J. and Evangelista, L.; (2012). Concrete made with coarse concrete aggregate: Influence of curing on durability. *ACI Mater. J.*; 109[2]: 195-204.
126. Pedro, D.; de Brito, J. and Evangelista, L.; (2017). Evaluation of high-performance concrete with recycled aggregates: Use of densified silica fume as cement replacement. *Constr. Build. Mater.*; 147: 803-814.
127. Nagataki, S.; Gokce, A.; Saeki, T.; Hisada, M.; (2004). Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cem. Concr. Res.* 34[6]: 965-971.
128. Matias, D.; de Brito, J.; Rosa, A. and Pedro, D.; (2013). Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates - Influence of the use of superplasticizers. *Constr. Build. Mater.*; 44: 101-109.
129. Matias, D.; de Brito, J.; Rosa, A. and Pedro, D.; (2014). Durability of Concrete with Recycled Coarse Aggregates: Influence of Superplasticizers. *J. Mater. Civ. Eng.*; 26[7], 6014011.
130. Tam, V.W.Y.; Gao, X.F. and Tam, C.M.; (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cem. Concr. Res.*; 35[6]: 1195-1203.
131. Domingo-Cabo, A.; Lázaro, C.; López-Gayarre, F.; Serrano- López, M.A.; Serna, P.; Castaño-Tabares, J.O.; (2009). Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*; 23[7], 2545-2553.
132. Kou, S.C.; Poon, C.S. and Wan, H.W.; (2012). Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates. *Constr. Build. Mater.*; 36: 881-889.
133. Seara-Paz, S.; Corinaldesi, V.; González-Fonteboa, B. and Martínez-Abella, F.; (2016). Influence of recycled coarse aggregates characteristics on mechanical properties of structural concrete. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*; 20 [1]: s123-s139.
134. Tam, V.W.Y.; Kotrayothar, D. and Xiao, J.; (2015). Long-term deformation behaviour of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*; 100: 262-272.

135. Fathifazl, G.; Ghani Razaqpur, A.; Burkan Isgor, O.; Abbas, A.; Fournier, B. and Foo, S.; (2011). Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate. *Cem. Concr. Compos.*; 33[10]: 1026-1037.
136. Djerbi Tegguer, A.; (2012). Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach. *Constr. Build. Mater.*; 27[1]: 112-116.
137. Silva, R.V.; de Brito, J. and Dhir, R.K.; (2015). Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: A review. *Constr. Build. Mater.*; 77: 327-339.
138. Shicong, K. and Poon, C.S.; (2006). Compressive strength, pore size distribution and chloride-ion penetration of recycled aggregate concrete incorporating class-F fly ash. *J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed.*; 21: 130-136.
139. Tam, V.W.Y. and Tam, C.M.; (2007). Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. *J. Mater. Sci.*; 42[10]: 3592-3602.
140. Silva, R.V.; de Brito, J.; Neves, R.; Dhir, R. and Silva, R.V.; (2015). Prediction of Chloride Ion Penetration of Recycled Aggregate Concrete. *Mater. Res.*; 18 [2]: 427-440.
141. Kou, S.C. and Poon, C.S.; (2010). Properties of concrete prepared with PVA impregnated recycled concrete aggregates. *Cem. Concr. Compos.*; 32[8]: 649-654.
142. Kou, S.C. and Poon, C.S.; (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Cem. Concr. Compos.*; 31[9]: 622-627.
143. Moon, D.; Moon, H.; Nagataki, S.; Hisada, M. and Saeki, T., (2002). Improvement on the qualities of recycled aggregate concrete containing super fine mineral admixtures. in: E. In: Kyokai PK & Kyokai NK (Ed.), Proc. 1st Fib Congr., Osaka, Japan, 113-118.
144. Ann, K.Y.; Moon, H.Y.; Kim, Y.B. and Ryou, J.; (2008). Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials. *Waste Manag.*; 28: 993-999.
145. Kou, S.C.; Poon, C.S.; (2013). Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. *Cem. Concr. Compos.*; 37[1]: 12-19.
146. Kou, S.C.; Poon, C.S. and Chan, D., (2004). Properties of steam cured recycled aggregate fly ash concrete. in: E. In: Vázquez E, Hendriks C & Janssen GMT (Ed.), Int. RILEM Conf. Use Recycl. Mater. Build. Struct., Barcelona, Spain, 590-599.
147. Poon, C.S. and Chan, D.; (2006). Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. *Constr. Build. Mater.*; 20[8]: 569-577.
148. Salem, R.M.; Burdette, E.G. and Jackson, N.M.; (2003). Resistance to freezing and thawing of recycled aggregate concrete. *ACI Mater. J.*; 100[3]: 216-221.
149. Gokce, A.; Nagataki, S.; Saeki, T. and Hisada, M.; (2004). Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete. *Cem. Concr. Res.*; 34[5]: 799-806.
150. Zaharieva, R.; Buyle-Bodin, F. and Wirquin, E.; (2004). Frost resistance of recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Res.*; 34: 1927-1932.
151. de Oliveira, M.B.; Vázquez, E.; (1996). The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. *Waste Manage.*; 16[13]: 113-117.
152. Tovar-Rodríguez, G.; Barra, M.; Pialarissi, S.; Aponte, D.; and Vázquez, E.; (2013). Expansion of mortars with gypsum contaminated fine recycled aggregates. *Constr. Build. Mater.*; 38: 1211-1220.
153. Lee, S.T.; Moon, H.Y.; Swamy, R.N.; Kim, S.S.; Kim, J.P., (2005). Sulfate Attack of Mortars Containing Recycled Fine Aggregates. *ACI Mater. J.*, 102 [4], 224-230.
154. Lee, S.T.; Swamy, R.N.; Kim, S.S. and Park, Y.G.; (2008). Durability of Mortars Made with Recycled Fine Aggregates Exposed to Sulfate Solutions. *J. Mater. Civ. Eng.*; 20 [1]: 63-70.

Références bibliographiques

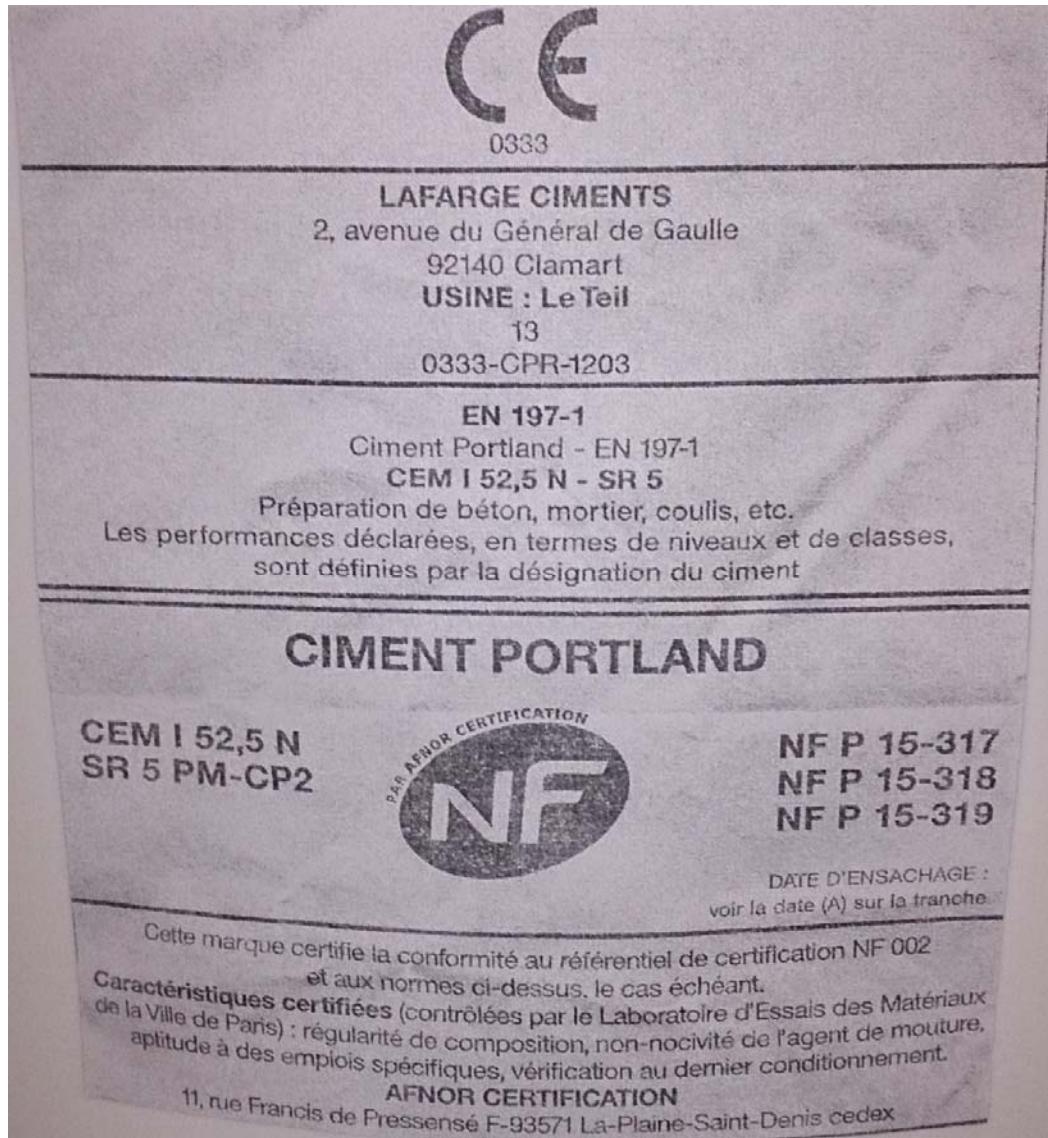
155. Mohamed Rissel, KHELIFA; (2009). Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants. Thèse de doctorat en cotutelle internationale de génie civil: Université d'Orléans - France et Université de Constantine - Algérie.
156. Thang le; Sébastien R.; Gwenn Le S.; Eric G.-D.; (2016). Fresh behavior of mortar based on recycled sand - Influence of moisture condition. *Constr. Build. Mater.*; 106: 35-42.
157. Martín-Morales, M.; Zamorano, M.; Ruiz-Moyano, A. and 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[2]: 742-748.
158. RILEM; (1994). TC 121-DRG Spécifications pour le béton avec des granulats recyclés. *Matériaux et structures*; 27[173]: 557-559.
159. Haitao, Y. and Shizhu, T.; (2015). Preparation and properties of high-strength recycled concrete in cold areas. *Mater. Construcc.*; 65 [318]: e050.
160. Sánchez-Roldán, Z. ; Martín-Morales, M. ; Valverde-Palacios, I. ; Valverde-Espinosa, I. . and Zamorano, M.; (2016). Study of potential advantages of pre-soaking on the properties of pre-cast concrete made with recycled coarse aggregate. *Mater. Construcc. ,*; 66[321]: e076.
161. Verian, K.P.; Ashraf, W. and Cao, Y.; (2018). Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. *Resour. Conserv. Recycl.*; 133: 30-49.
162. Quebaud, M.; (1996). Caractérisation des granulats recyclés: Étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats. Thèse de doctorat: Université d'Artois, France.
163. Arliguie, G. et Hornain, H.; (2007). *GranDuBé : Grandeurs associées à la Durabilité des Bétons*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris,
164. Wang, W.; Kou, S. and Xing, F.; (2013). Deformation properties and direct shear of medium strength concrete prepared with 100% recycled coarse aggregates. *Constr. Build. Mater.*; 48, 187-193.
165. Kinda, Hannawi; (2011). Conception, caractérisation physico-mécanique et durabilité de nouveaux matériaux de construction à caractère environnemental. Thèse de doctorat en génie civil: INSA de Rennes, France.
166. Véronique, Baroghel-Bouny; (2012). Nouvelle approche de la durabilité du béton. Indicateurs et méthodes, Éditions Techniques de l'Ingénieur; c2245.
167. AFPC-AFREM; (1997). Détermination de la Masse Volumique Apparente et de la Porosité Accessible à l'Eau. Méthodes Recommandées pour la Mesure des Grandes Associées à la durabilité. Compte-rendu des Journées Techniques, Toulouse: 121-124.
168. Levy, S.M. and Helene, P.; (2004). Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. *Cem. Concr. Res.*; 34[18]: 1975-1980.
169. Dang, Tuan Anh; (2011). Valorisation des sédiments marins bretons comme matériaux de construction. Thèse de doctorat en génie civil: INSA de Rennes, France.
170. Fedaoui-Akmoussi, O.; Kaci, S.; Jauberthie, R. and Molez, L.; (2013). Effect of biochemical environment on fiber concrete containing silica fume, *Chemistry and Materials Research*; 5: 48-52.
171. Baroghel-Bouny, V.; Belin,P.; Maultzsch, M.; Henry, D.; (2007). AgNO₃ spray tests: advantages, weaknesses, and various applications to quantify chloride ingress into concrete. Part 1: Non-steady-state diffusion tests and exposure to natural conditions. *Mater. Struct.*; 40: 759-781.
172. Méthodes d'essai des LPC N°62; (2005). Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie, techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées.

173. Mouli, M; Senhadji, Y; Benosman, A.S. and Khelafi, H.; (2010). Acid resistance and penetration of chloride ions in mortars with pozzolana and fine limestone. *Science & Technology Communication*; 08: 57-63.
174. Torres-Gómez, A.I.; F. Ledesma, E.; Otero, R.; Fernández, J.M.; Jiménez, J.R. and de Brito, J.; (2016). Combined Effects of Non-Conforming Fly Ash and Recycled Masonry Aggregates on Mortar Properties. *Materials*; 9[9]: 729.
175. Ledesma, E.F.; Jiménez, J.R.; Fernández, J.M.; Galvín, A.P.; Agrela, F. and Barbudo, A.; (2014). Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.*; 71: 289-298.
176. Neno, C., de Brito, J. and Veiga, R.; (2014). Using fine recycled concrete aggregate for mortar production. *Mater. Res.*; 17[1]: 168-177.
177. Sajedi, F. and Razak, H.A.; (2011). Effects of curing regimes and cement fineness on the compressive strength of ordinary Portland cement mortars. *Constr. Build. Mater.*; 25[4]: 2036-2045.
178. Martínez, I.; Etxeberria, M.; Pavón, E. and Díaz, N.; (2013). A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars. *Constr. Build. Mater.*; 49: 384-392.
179. Rodríguez, C.; Parrac, C.; Casadob, G.; Minanoa, I.; Albaladejoa, F.; Benitoa, F. and Sanchez, I.; (2016). The incorporation of construction and demolition wastes as recycled mixed aggregates in non-structural concrete precast pieces. *J. Clean. Prod.*; 127: 152-161.
180. Djelal, H. et Nouvel, V.; (2008). Gestion des déchets de démolition et environnement. XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Nancy, France.

Annexes

Annexe 1-1:

Fiche d'identification du ciment Portland artificiel CEM I 52,5 N



Annexe 1-2 :

Fiche technique du ciment Portland artificiel CEM I 52,5 N

CEM I 52,5 N CE CP2 NF

Ce ciment est produit dans nos usines de Héming (57), Dannes (62), Altkirch (68), Lumbres (62), Grand Couronne (76) et Obourg (Belgique).

Définition

Le ciment CEM I 52,5 N CE CP2 NF est composé de :

- 95 % à 100 % de clinker
- 0 % à 5 % de constituants secondaires

La présence d'une faible quantité de sulfate de calcium assure la régularité de la prise.

Domaines d'utilisation

Le ciment CEM I 52,5 N CE CP2 NF est destiné aux bétons de bâtiment et de génie civil ou d'ouvrages d'art. Il est adapté aux opérations de décoffrage rapide, notamment par temps froid.

Ce ciment est adapté aux :

- Béton de classes de résistance > 35/40 MPa
- Béton précontraint par pré et post-tension
- Béton armé pour des éléments de structure

Caractéristiques physiques et mécaniques garanties

- Début de prise à 20 °C mesuré sur pâte pure ≥ 40 min
- Stabilité mesurée sur pâte pure ≤ 10 mm selon la norme NF EN 196-3
- Résistances mécaniques à la compression déterminées sur mortier normalisé, conformément à la norme NF EN 196-1.

Résistance à la compression sur mortier en MPa (valeurs limites inférieures)

Résistance à court terme	Résistance courante
2 J	28 J
18,0	50,0

Caractéristiques chimiques garanties

- Teneur en SO₃ ≤ 4,5 %
- Teneur en Cl⁻ ≤ 0,10 %

Emplois particuliers

Caractéristiques complémentaires nécessaires

Bétons précontraints par pré ou post-tension	CP (norme NF P 15-318) marque NF
--	----------------------------------

CP2 : Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint S⁺ < 0,2 %

Précautions d'emploi

Ce ciment ne convient pas pour :

- Les travaux routiers
- Les enduits
- Les travaux en milieux agressifs
- Les bétons de grande masse

Recommandations spécifiques et générales

- Utiliser des granulats propres, exempts de matières organiques
- Respecter les dosages et les règles de l'art pour la mise en œuvre
- Viser un rapport Eau / Ciment de préférence le plus faible possible, compatible avec une bonne rhéologie du béton frais
- Utiliser des adjuvants normalisés et vérifier leur compatibilité avec ce ciment
- Eviter une dessication précoce par temps chaud ou venteux en réalisant une cure du béton (eau pulvérisée, bâche humide, produits de cure...)
- Adapter la vibration du béton à sa consistance pour obtenir une compacité optimale sans ségrégation
- Eviter tout contact avec la peau et les yeux.
- Utiliser des équipements adaptés : gants, chaussures imperméables, lunettes...

Holcim (France) S.A.S. ne peut être tenu responsable d'une mauvaise application ou interprétation des informations contenues dans le présent document. En cas de question ne pas hésiter à nous consulter.

Holcim (France) S.A.S.
49 avenue Georges Pompidou
F-92593 Levallois-Perret Cedex
Direction des ventes Nord-Ouest
Téléphone : + 33 1 41 06 11 38
Direction des ventes Atlantique
Téléphone : +33 2 40 90 44 96
Direction des ventes Est
Téléphone : +33 3 90 29 55 40
www.holcim.fr

Annexe 2 :

Fiche technique du superplastifiant/Haut réducteur d'eau utilisé.

Notice technique
Edition octobre 2012
Numéro 226
Version n°2012-247
SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 11

SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 11

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934-2 Tab. 1, 3.1 et 3.2.

CE NF

Présentation	SIKA VISCOCRETE TEMPO 11 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.						
Domaines d'application	<ul style="list-style-type: none"> ■ SIKA VISCOCRETE TEMPO 11 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants sur une large gamme de résistance mécanique (du C20 au C60) et transportés sur de longues distances et pompés. ■ SIKA VISCOCRETE TEMPO 11 rend les formules plus robustes aux variations d'eau et ne présente aucun pétilllement sur béton frais. 						
Caractères généraux	SIKA VISCOCRETE TEMPO 11 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes : <ul style="list-style-type: none"> ■ longue rhéologie (>2h), ■ robustesse aux variations d'eau, ■ qualité de parement. 						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>RHÉOLOGIE</th> <th>RÉSISTANCES INITIALES</th> <th>RÉDUCTION D'EAU</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5</td> <td>3</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table>	RHÉOLOGIE	RÉSISTANCES INITIALES	RÉDUCTION D'EAU	5	3	5
RHÉOLOGIE	RÉSISTANCES INITIALES	RÉDUCTION D'EAU					
5	3	5					
Caractéristiques							
Aspect	Liquide brun clair						
Conditionnement	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fûts de 230 kg ■ CP de 1000 L ■ Vrac 						
Stockage	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. SIKA VISCOCRETE TEMPO 11 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.						
Conservation	12 mois en emballage intact						
Données techniques							
densité	1,06 ± 0,01						

Sika®

Construction

pH	4 à 6
Teneur en Na₂O Eq.	≤ 1 %
Extrait sec	28,5 à 31,5%
Teneur en ions Cl⁻	≤ 0,1 %
Conditions d'application	
Dosage	Plage d'utilisation recommandée : 0,3 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,4 % du poids du ciment ou du liant.
Mise en œuvre	SIKA VISCOCRETE TEMPO 11 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
Précautions d'emploi	En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau. Consulter la fiche de données de sécurité accessible sur Internet www.sika.fr

Mentions légales

Produit réservé à un usage strictement professionnel

Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.

«Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA® a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



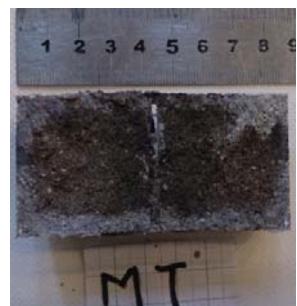
SIKA® France S.A.
84, rue Edouard Vaillant – BP 104
93351 Le Bourget Cedex
France

Tel. : 01 49 92 80 00
Fax : 01 49 92 80 21
www.sika.fr

Organisme de certification :
AFNOR CERTIFICATION
11, avenue Francis de Pressensé
93571 Saint-Denis La Plaine cedex
France

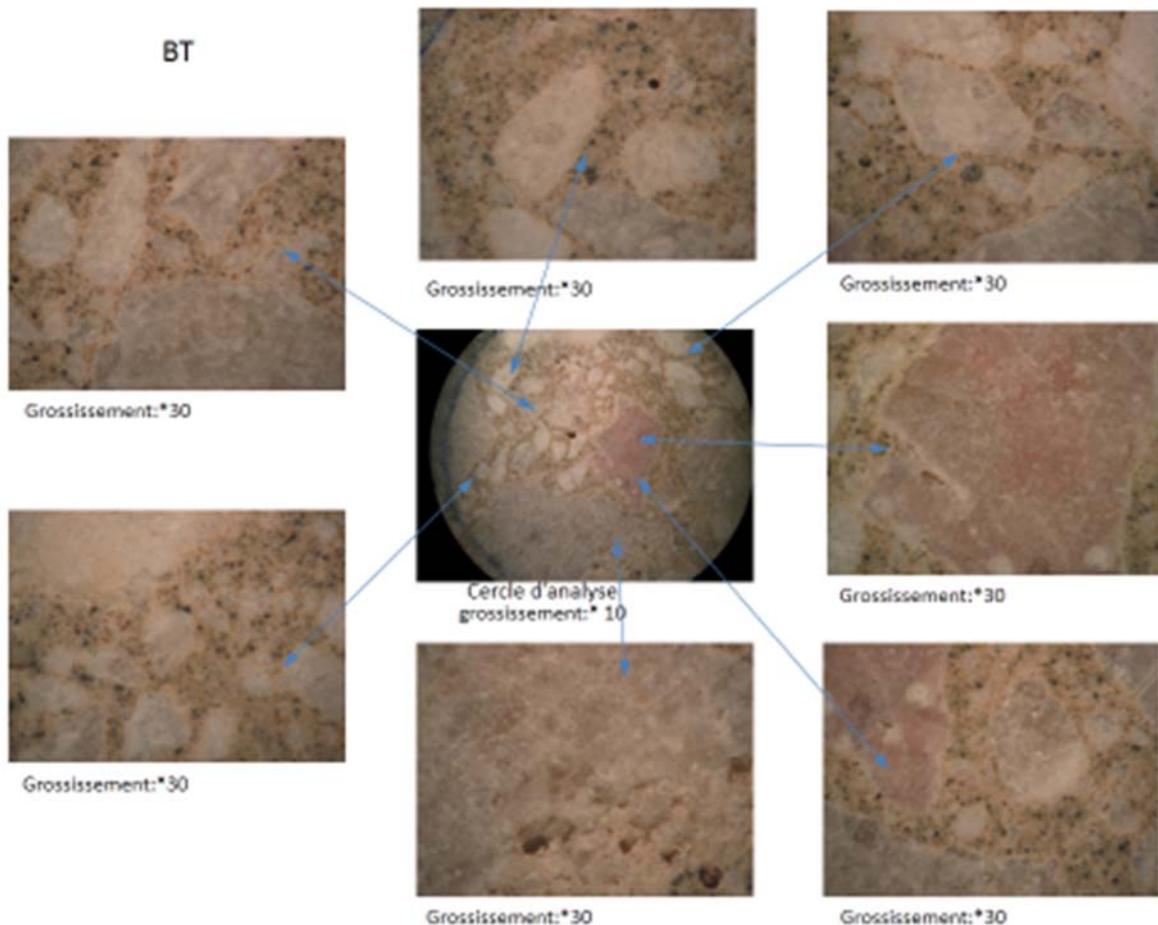
Annexe 3 :

Photos des échantillons de mortiers après l'essai de diffusion de chlorures.

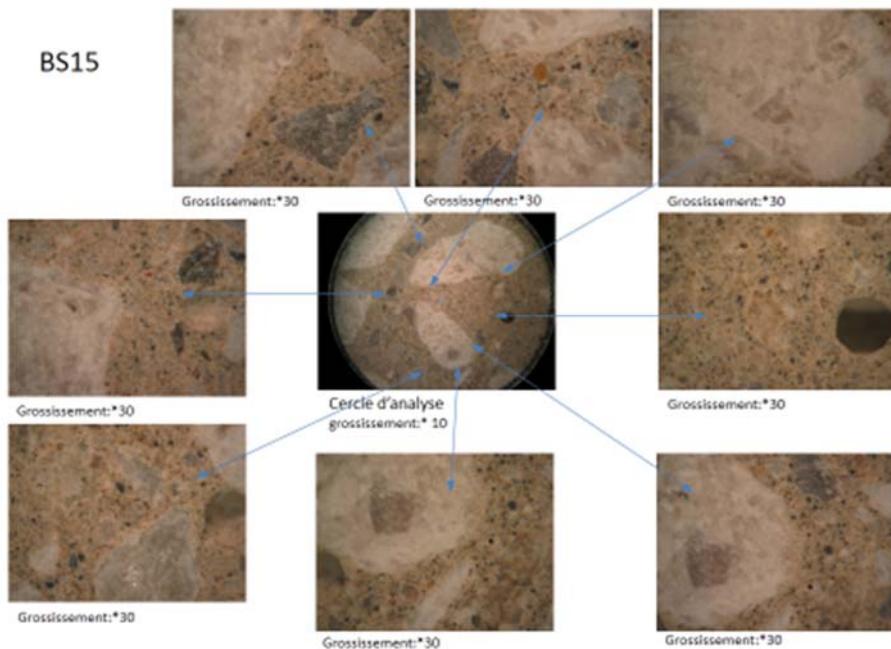


Annexe 4 :

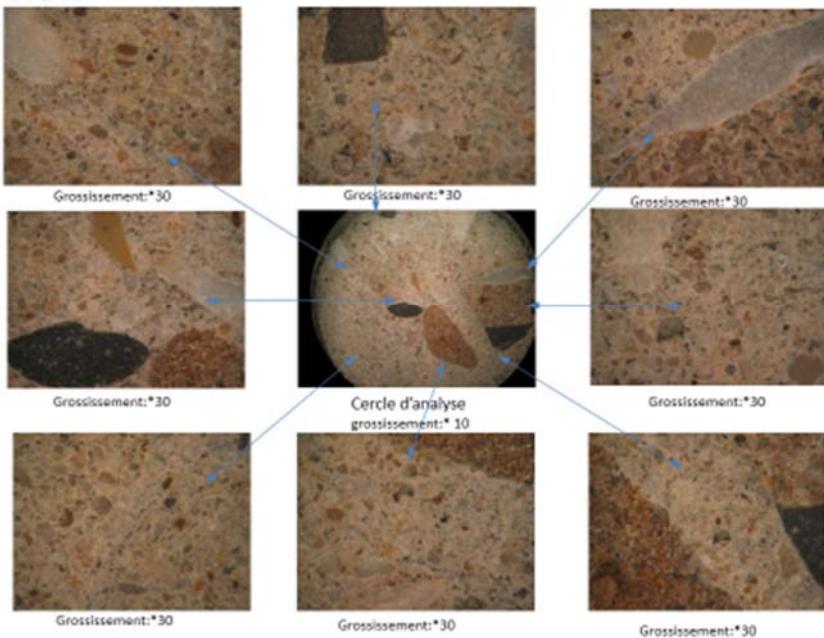
Photos microscopiques des différentes zones d'échantillons de béton.



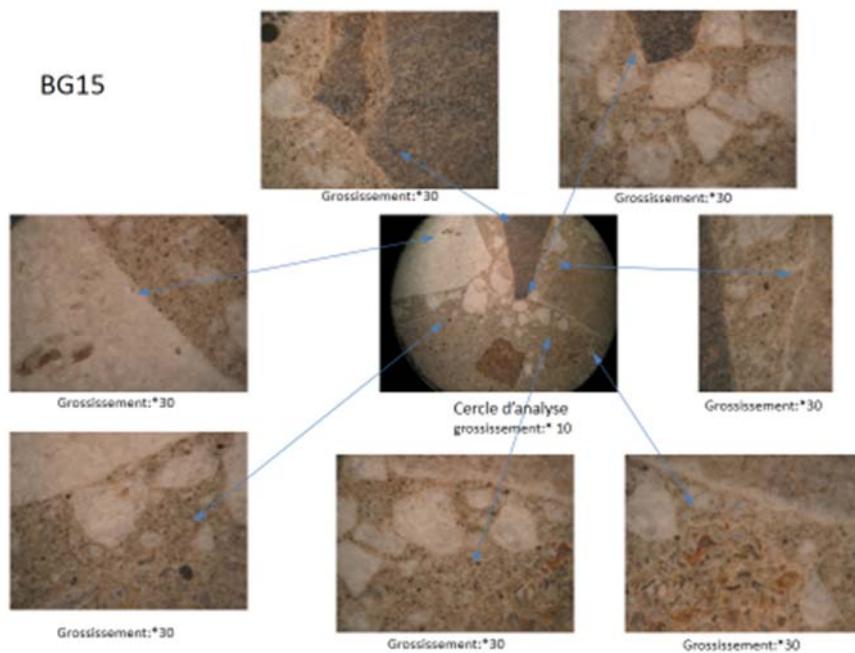
BS15



BS100



BG15



BGS15

