



RECYBETON

Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE

Thème : 1

Influence du type de concassage sur les
différentes fractions granulaires

Auteurs :

Erwan HAMARD

Bogdan CAZACLIU

Laboratoire GPEM-IFSTTAR

R/14/RECY/008
LC/12/RECY/05
Septembre 2014

Site internet : www.pnrecybeton.fr

Président : Jacques ROUDIER

Directeur : Horacio COLINA

Directeur Scientifique : François DE LARRARD

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr,
tél. : 01 44 13 32 79



Projet National de recherche et développement

FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : Effet du concassage

RAPPORT N° : R/14/RECY/008

DATE D'ÉTABLISSEMENT : Septembre 2014

AUTEUR(S) : E. HAMARD, B. CAZACLIU

ORGANISME(S) CHARGE(S) DE L'ACTION : IFSTTAR

THEME DE RATTACHEMENT : 1

LETTRE DE COMMANDE : LC/12/RECY/05

Site internet : www.pnrecybeton.fr

Président : Jacques ROUDIER

Directeur : Horacio COLINA

Directeur Scientifique : François DE LARRARD

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr, tél. : 01 44 13 32 79

Table des matières

Table des matières.....	1
1 Introduction.....	2
2 Bibliographie.....	3
3 Description de la campagne expérimentale	5
3.1 Matériaux d'entrée.....	5
3.2 Concasseurs	5
3.3 Essais	6
3.3.1 Granulométrie	6
3.3.2 Aplatissement.....	6
3.3.3 Granulométrie des éléments inférieurs à 63 µm	6
3.3.4 Cinétique d'absorption d'eau	6
3.3.5 Résistance à la fragmentation et à l'usure	6
3.4 Campagne expérimentale.....	7
3.5 Identification des matériaux	7
4 Résultats.....	10
4.1 Granulométrie.....	10
4.1.1 Granulométrie par tamisage.....	10
4.2 Granulométrie laser.....	18
4.3 Aplatissement.....	19
4.4 Essais de résistance à la fragmentation et à l'usure	20
4.5 Cinétique d'absorption d'eau.....	22
5 Discussion.....	24
6 Conclusion	27
Liste bibliographique.....	28
Annexe 1 : Granulométrie des matériaux recyclés.....	30
Annexe 2 : Granulométrie des matériaux naturels	31
Annexe 3 : Granulométrie laser sur les fractions inférieures à 63 µm	32

1 Introduction

Ce rapport présente les résultats et les conclusions de l'étude intitulée « Influence du type de concassage sur les différentes fractions granulaires » réalisée par le Laboratoire Granulats et Procédés d'Élaboration des Matériaux (GPEM/MAST) de l'IFSTTAR dans le cadre de la tranche 1 du thème 1 du Projet National Recybéton.

La raréfaction des sources de granulats pour béton, l'augmentation du coût des énergies fossiles ainsi que les volontés politiques et sociétales de réduire l'impact écologique de notre société, font de l'économie des matériaux de construction un enjeu majeur de recherche. Dans ce contexte, la question de la valorisation des bétons de déconstruction prend tout son sens, et plus particulièrement le recyclage du béton dans le béton. La présente étude s'intéresse à la première étape du procédé de valorisation des bétons de déconstruction : le concassage des bétons de déconstruction pour produire des granulats de béton recyclé. Cette étape conditionne la qualité du granulat de béton recyclé (teneur en mortier adhérent, porosité, forme, résistance à la fragmentation) et donc du béton de granulats recyclés. L'objectif de cette étude est de comparer l'effet de 3 modes de concassage, à percussion, à mâchoires et giratoire, sur les granulats recyclés, notamment sur la création de fines.

2 Bibliographie

Le concassage des bétons issus de déconstruction, dans le but de produire des granulats de béton recyclé, est, avec le tri, un des procédés de transformation qui va déterminer la qualité des granulats produits. Cette qualité dépend de la forme des granulats, de leur résistance mécanique, de leur densité et de leur porosité [1] [2] [3].

Un granulats de béton recyclé est composé de granulats naturels du béton d'origine (granulats naturels d'origine), sur lequel une quantité plus ou moins importante de mortier de ciment d'origine est attachée (mortier adhérent) [4] [5]. Les bétons incorporant des granulats de bétons recyclés sont appelés bétons de granulats recyclés.

Un problème majeur des granulats de béton recyclé est la présence de mortier adhérent poreux. Cette porosité importante confère aux granulats de béton recyclé une capacité d'absorption d'eau plus élevée que celle des granulats naturels habituellement employés pour la fabrication des bétons [6] [7] [5] [2]. De plus, l'absorption des granulats de béton recyclé est hétérogène.

Tam *et al.* [2] relie la densité, la capacité d'absorption d'eau et la porosité des granulats de béton recyclé à la teneur en mortier adhérent. En effet, la densité des granulats de bétons recyclés étudiés est comprise entre 1,0 et 1,6 Mg.m⁻³ alors que la densité d'un granulats naturel est de l'ordre de 2,6 Mg.m⁻³. Plus le granulats de béton recyclé est riche en mortier adhérent, plus la densité est faible, plus la capacité d'absorption d'eau est élevée et plus la porosité est importante. Les auteurs constatent également que plus la taille des granulats du béton d'origine est faible, et plus le granulats produit à partir de ces bétons de démolition est riche en mortier de ciment.

Afin de réduire cette porosité, deux stratégies sont envisageables. Soit le concassage, ou le broyage, sont réalisés avec une énergie faible de manière à réduire la taille des éléments en limitant l'endommagement du granulats [8]. Soit le concassage est réalisé avec une énergie importante de manière à réduire au maximum la pâte cimentaire et libérer le granulats naturel d'origine. Tomas *et al.* [9] définissent trois classes de degré de libération pour les bétons de démolition :

- Sans libération : le gravier et le sable naturel d'origine sont distribués et liés dans la matrice cimentaire dans des éléments volumineux de bétons issus du processus de déconstruction,
- Libération partielle, une teneur en matrice cimentaire, de 0 à 50 %, est tolérée,
- Libération totale, le matériau ne contient pas de matrice cimentaire.

Les auteurs proposent 3 méthodes de détermination du taux de libération : évaluation de la teneur en matrice cimentaire du granulats produit par reconnaissance visuelle, séparation par gravité dans un milieu dense et dissolution dans l'acide chlorhydrique. Les auteurs préconisent la méthode par dissolution dans l'acide chlorhydrique. Angulo *et al.* [3] proposent une classification des granulats de béton recyclé basée sur la densité sèche des granulats. Les auteurs montrent que la densité, liée à la porosité, est la caractéristique la plus importante des granulats de béton recyclé influençant la résistance à la compression et le module d'Young des bétons de granulats recyclés.

Ulsen *et al.* [10] proposent de recycler les fines riches en ciment issues du recyclage des bétons de démolition. La séparation des fines riches en ciment n'est possible que si un taux de libération élevé est atteint. Ce niveau est atteint par une série de 3 concassage faisant intervenir en premier un concasseur à impact, puis un concasseur à mâchoires et enfin un concasseur à impact à arbre vertical. Dans un second article, Ulsen *et al.* [11] proposent de valoriser les sables issus

du traitement des bétons de démolition. Les auteurs pointent la teneur en mortier adhérent comme le facteur impactant la qualité des granulats de béton recyclé. Le mortier adhérent poreux possède un taux d'absorption d'eau plus élevé et une résistance mécanique plus faible que les granulats naturels. Ces propriétés du mortier adhérent rendent difficile l'utilisation des granulats de béton recyclé. Ils nécessitent en effet des temps de malaxage plus importants et ont une demande en eau plus élevée que les granulats naturels. Le rapport eau/ciment s'en trouve plus difficile à contrôler et aboutit à des bétons de granulats recyclés ayant des résistances mécaniques moindres que les bétons de granulats naturels. Les essais sont conduits sur des matériaux qui ont subi un traitement primaire au concasseur à mâchoire, puis un traitement secondaire au concasseur à impact à arbre vertical selon trois vitesses de rotation. Les distributions granulométriques ainsi que la forme des particules des sables produits par ces trois modalités sont semblables. En revanche, la teneur en mortier adhérent est dépendante de la vitesse de rotation du concasseur. Les auteurs soulignent que les particules produites sont de forme cubique et que la pâte de ciment est concentrée dans la fraction inférieure à 0,15 mm, ce qui milite en faveur de l'utilisation du compacteur à axe vertical pour le concassage des bétons de démolition.

Nagataki *et. al.* [4] ont étudié l'évolution de la densité de fissures dans des granulats de béton recyclé expérimentaux au cours d'une série de concassage. Avant concassage, le granulat naturel d'origine utilisé dans cette étude présentait une densité de fissure plus importante que celle de la pâte cimentaire. Dans ce cas, les ruptures interviennent donc préférentiellement dans le granulat naturel d'origine, plutôt que dans la matrice cimentaire. C'est donc la densité de microfissures qui gouverne l'occurrence des ruptures au moment du concassage. Cette densité de microfissures est généralement plus élevée dans le mortier adhérent que dans le granulat naturel d'origine, mais ce n'est pas toujours le cas.

La difficulté de séparer le granulat naturel d'origine du mortier adhérent est soulignée par plusieurs auteurs [12] [13] [14], et des solutions sont proposées. Etxeberria *et. al.* [5], affirment que le concasseur à impact permet d'obtenir une quantité importante de granulat recyclé sans mortier adhérent. Tsujino *et. al.* [12] ainsi que Akbarnezhad *et. al.* [15] proposent un traitement thermique par micro-ondes à réaliser avant le concassage, Shima *et. al.* [13] ainsi que Mulder *et. al.* [16] préconisent un traitement thermique affaiblissant la pâte cimentaire avant broyage. Ces méthodes visent à affaiblir la matrice cimentaire pour permettre la libération du granulat naturel d'origine. Kim *et. al.* [8] proposent une méthode, inspirée des procédés miniers, dont le but est de favoriser les ruptures à l'interface des grains de granulats d'origine et du mortier adhérent. L'objectif est de se débarrasser du mortier adhérent et de valoriser le granulat d'origine. Après une réduction primaire par un concasseur à mâchoire, les granulats de béton recyclés sont broyés selon différentes modalités, faisant intervenir, ou non, un pré-traitement thermique de 400°C pendant 2 h, un broyeur de laboratoire, un broyeur d'échelle 1 et des temps de broyages de 10, 20, 30 et 40 minutes. Partant du constat que le mortier adhérent est responsable du taux d'absorption d'eau plus élevé des granulats recyclés (10 % en moyenne pour les granulats de béton recyclé, contre 3 % en moyenne pour les granulats naturels), les auteurs estiment le degré de libération en fonction du taux d'absorption des granulats produits. Le broyage de faible intensité des bétons de démolition permet d'enlever, délicatement, le mortier adhérent du granulat d'origine, et ainsi obtenir un degré de libération important. Le pré-traitement thermique n'est efficace que pour le broyeur d'échelle 1.

3 Description de la campagne expérimentale

3.1 Matériaux d'entrée

Le matériau de déconstruction source fourni par le PN Recybéton est un béton de démolition 20/60. La dimension maximale d'entrée du concasseur giratoire étant de 20 mm, le matériau source a été concassé, au concasseur à mâchoires, pour produire un granulat de béton recyclé 0/20. Ce 0/20 a ensuite été criblé pour produire les différentes fractions granulaires des matériaux d'entrée des différents concasseurs (10/20, 10/14, 6/10) (Figure 1).

Un matériau naturel a également été employé comme référence. Il s'agit d'un gneiss 20/60 provenant de la carrière de Bréfauchet (44). La préparation des matériaux naturels d'entrée est identique à celle du béton de démolition (Figure 1).

L'échantillonnage des sous-échantillons des fractions d'entrée est réalisé par pelletage alterné du matériau disposé en tas puis par quartage au diviseur à couloirs.

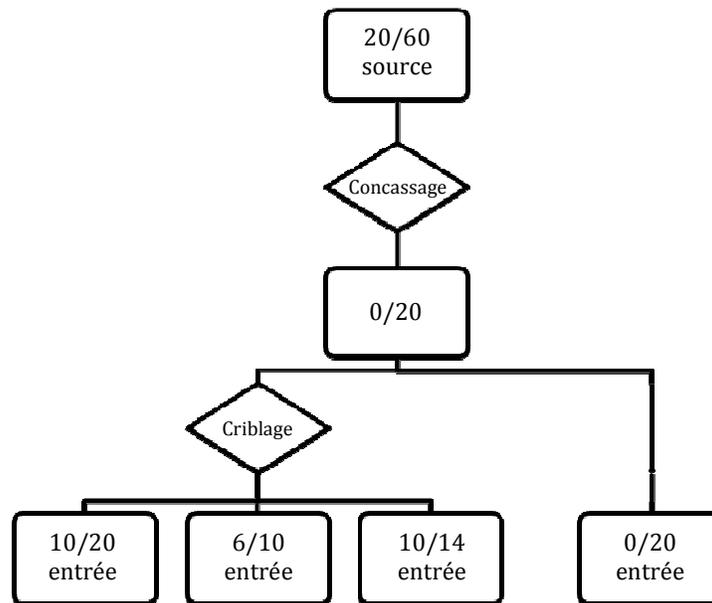


Figure 1 : Production des fractions granulaires naturel et recyclés d'entrée 0/20, 10/20, 6/10 et 10/14

3.2 Concasseurs

Trois types de concasseurs de laboratoire ont été utilisés pour cette étude :

- Un concasseur à mâchoires Retsch BB 200 de 2010, avec écartement des mâchoires réglable, $D_{\max \text{ entrée}} = 80 \text{ mm}$,
- Un concasseur giratoire Babbitless de 1965, avec écartement de la noix réglable, $D_{\max \text{ entrée}} = 20 \text{ mm}$
- Un concasseur à percussion Clero type 000 T/B de 1983, avec des plaques de fond de chambre de concassage perforées à différents diamètres, $D_{\max \text{ entrée}} = 80 \text{ mm}$.

Pour les concasseurs à mâchoires et à percussion on utilise et compare trois réglages d'intensité du concassage. Pour le concasseur giratoire le réglage de la distance entre la noix de concassage et la cuve étant long et peu reproductible, un seul réglage est utilisé. Les 7 configurations de concassage sont les suivantes :

- Concasseur à mâchoires : 3 écartements entre mâchoires visant à produire un matériau de sortie de granulométrie 0/5 mm (modalité forte), 0/10 mm (modalité moyenne) et 0/15 mm (modalité faible),
- Concasseur à percussion : 3 ouvertures de grilles perforées du fond de la chambre de concassage : 6 mm (modalité forte), 20 mm (modalité moyenne) et 40 mm (modalité faible),
- Concasseur giratoire : 1 unique réglage visant une granulométrie de sortie 0/10 mm.

3.3 Essais

La présence de mortier adhérent dans le granulat de béton recyclé peut nécessiter l'adaptation des essais. Les normes d'essais et leurs éventuelles adaptations sont expliquées ci-après.

3.3.1 Granulométrie

La granulométrie des granulats de béton recyclé est réalisée conformément à la norme NF EN 933-1, sur la partie supérieure à 63 μm . Pour les granulats recyclés la température de séchage des granulats est fixée à 75°C pour éviter d'altérer le mortier adhérent avant tamisage.

3.3.2 Aplatissement

Le coefficient d'aplatissement des granulats recyclés est déterminé selon la norme NF EN 933-3.

3.3.3 Granulométrie des éléments inférieurs à 63 μm

Les éléments de taille inférieure à 63 μm récupérés au moment du tamisage sont analysés par granulométrie laser par voie humide à l'aide d'un Mastersizer 2000 de la marque Malvern. Trois sous échantillons sont analysés avec trois répétitions chacun. Le résultat est la moyenne de ces 9 mesures.

Le modèle de particule retenu est le Fraunhofer, la durée de mesure de bruit de fond est de 12 s, la durée de la mesure est de 12 s, le délai entre deux mesures est de 10 s, le débit de la pompe est de 1250 tr.min⁻¹, la vitesse d'agitation est de 1000 tr.min⁻¹, sans ultrasons.

3.3.4 Cinétique d'absorption d'eau

L'absorption est mesurée au pycnomètre conformément à la norme NF EN 1097-6. Néanmoins différents temps de trempage dans l'eau ont été utilisés (de 2 min à 24 h, suivant les essais). Les temps de trempage dans chaque cas sont indiqués dans le plan expérimental. Cette adaptation de la norme permet de comparer de manière relative l'absorption des fractions granulaires, suivant le cas, soit en gagnant du temps soit en focalisant sur la vitesse d'absorption et non sur l'absorption à 24 h. Pour les essais Los Angeles les masses d'échantillons testées sont dépendantes des quantités produites lors de l'essai. Il n'a pas toujours été possible d'obtenir des masses suffisantes pour satisfaire aux exigences de la norme.

3.3.5 Résistance à la fragmentation et à l'usure

L'essai de résistance à la fragmentation des granulats recyclés est réalisé conformément à la norme NF EN 1097-1, sur la fraction reconstituée 4/6,3 mm. Cependant, pour éviter de modifier le matériau recyclé, celui-ci est testé à teneur en eau naturelle.

L'essai de résistance à la fragmentation est adapté de l'essai normalisé NF EN 1097-2. La nature composite des granulats de béton recyclés, composé à la fois de mortier adhérent de faible résistance et de granulat naturel d'origine plus résistant mécaniquement, conduit à une évolution non linéaire du passant à 1,6 mm en fonction du nombre de cycles subis. Pour un

même échantillon, le passant à 1,6 mm est donc mesuré à 50, 200, 500, 700 et 1000 tours afin de décrire cette évolution. Pour des raisons de disponibilité des fractions granulaires après concassage, c'est la fraction 4/6,3 mm qui est retenue comme référence pour l'essai de résistance à la fragmentation dans cette étude.

3.4 Campagne expérimentale

Pour les sept configurations de concassage nous avons concassé les fractions 10/20 mm des granulats recyclé et naturel.

En complément, les fractions 0/20 mm des granulats recyclé et naturel sont également utilisées comme matériaux d'entrées, mais uniquement avec la modalité moyenne de concasseurs mâchoires et à percussion ainsi qu'avec le concasseur giratoire.

Pour le concasseur giratoire nous avons également utilisé comme matériaux d'entrés les fractions 10/14 mm et 6/10 mm, recyclés et naturels.

Chaque matériau résultant d'un concassage est caractérisé par des essais décrits au paragraphe 3.3. L'ensemble des modalités de concassage, des criblages et des essais réalisés est présenté dans la Figure 2 pour le granulat recyclé et dans la Figure 3 pour le granulat naturel.

3.5 Identification des matériaux

Afin de faciliter la désignation des matériaux d'entrée et de sortie de cette campagne, des identifiants leur ont été attribués de la manière suivante :

Pour les matériaux d'entrée :

[Origine du matériau, naturel N ou recyclé R]
éventuellement **[1^{er} type de concassage, mâchoire M]**
[Fraction granulaire, d/D]

Ainsi le matériau source naturel 20/60 sera noté N20/60, le matériau recyclé d'entrée 6/10 sera noté RM6/10

Pour les matériaux de sortie :

[Origine du matériau, naturel N ou recyclé R]
[1^{er} type de concassage, mâchoire M]
[2^{ème} type de concassage, mâchoire M, percussion P, giratoire G]
[Fraction granulaire d'entrée, 0/20 mm 1, 10/20 mm 2, 6/10 mm 3, 10/14 mm 4]
éventuellement **[Modalité, faible a, moyenne b, forte c]**

Les modalités forte, moyenne, faible sont définies en 3.2 pour les concasseurs à mâchoires et à percussion.

Ainsi le matériau de sortie produit par le concassage du 0/20 recyclé par le concasseur giratoire sera noté RMG1, le matériau de sortie produit par le concassage du 10/20 naturel par la modalité forte du concasseur à percussion sera noté NMP2c.

4 Résultats

4.1 Granulométrie

4.1.1 Granulométrie par tamisage

Les résultats bruts des granulométries par tamisage sont présentés dans l'Annexe 1 pour les matériaux recyclés et dans l'Annexe 2 pour les matériaux naturels. Les résultats bruts des granulométries laser réalisées sur les passants à 63 μm des tamisages sont présentés en Annexe 3.

Dans cette étude, à diamètre maximum après concassage égal (ou très proche), le concasseur à percussion de laboratoire produit un granulats plus fin que les concasseurs giratoire et à mâchoires de laboratoire, quelle que soit la fraction granulaire d'entrée (0/20 ou 10/20) et quelle que soit la nature du granulats (recyclé ou naturel) (Figure 4, Figure 5, Figure 6 et Figure 7). Le concasseur à mâchoires produit des courbes granulométriques intermédiaires aux deux autres, plus proches néanmoins des résultats obtenus par le concasseur giratoire (Figure 4, Figure 5, Figure 6 et Figure 7).

Les modalités testées pour le concasseur giratoire (Figure 8 et Figure 9) donnent, à l'exception de RMG1 plus riche en éléments fins provenant du matériau d'entrée, des distributions granulométriques relativement proches. Une tendance à confirmer est l'obtention d'une granularité plus fine lorsque le diamètre maximum d'entrée est plus grand. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les plus gros grains ont plus de probabilité d'être fractionnés, en produisant des particules fines. Cette tendance est surtout observée sur les granulats recyclés.

Afin de mieux visualiser les résultats, les granulométries sont également présentées sous la forme de courbes de fréquence. Le passage de la représentation classique, du passant cumulé exprimé en fonction de l'ouverture du tamis, à la représentation en fréquence se fait en divisant l'accroissement du passant par l'étendue de la classe granulaire concernée. La valeur de fréquence massique est associée au diamètre moyen de l'étendue de la classe granulaire concernée. Cette représentation à l'avantage de faire ressortir les pics des classes granulaires prépondérantes dans un matériau et de suivre l'évolution de ces classes granulaires après concassage.

Dans la représentation en fréquence (Figure 10), le matériau d'entrée se caractérise par un pic centré sur le diamètre 13 mm. Un pic caractéristique est également présent pour les matériaux produits par concassage. Ce pic est centré sur le diamètre 7 mm pour le concasseur à mâchoires, 5,5 mm pour le giratoire et quasiment absent pour le percuteur. Ceci confirme que l'effet de réduction du concasseur à percussion est bien plus important que celui des concasseurs giratoire et à mâchoires. La réduction au concasseur giratoire est plus importante que celle du concasseur à mâchoires. La production d'éléments inférieurs à 1 mm est plus importante pour le concasseur à percussion et plus faible pour le concasseur giratoire (Figure 10).

Le concasseur à percussion de laboratoire utilisé dans cette étude est le plus efficace pour la réduction des granulats de béton recyclé. Le concasseur à mâchoires de laboratoire utilisé dans cette étude est celui qui réduit le moins les granulats de bétons recyclés tout en produisant plus de fines que le giratoire. Le concasseur giratoire de laboratoire utilisé dans cette étude permet une réduction plus importante de la taille des éléments grossiers (> 4 mm) que le mâchoires tout en produisant moins d'éléments fins (< 1 mm) que ce dernier. Ces différences sont probablement liées aux différents modes de sollicitations mécaniques subits par les granulats dans les trois concasseurs. La proportion de chacune des fractions granulaires produites (Tableau 1) vient confirmer ces observations.

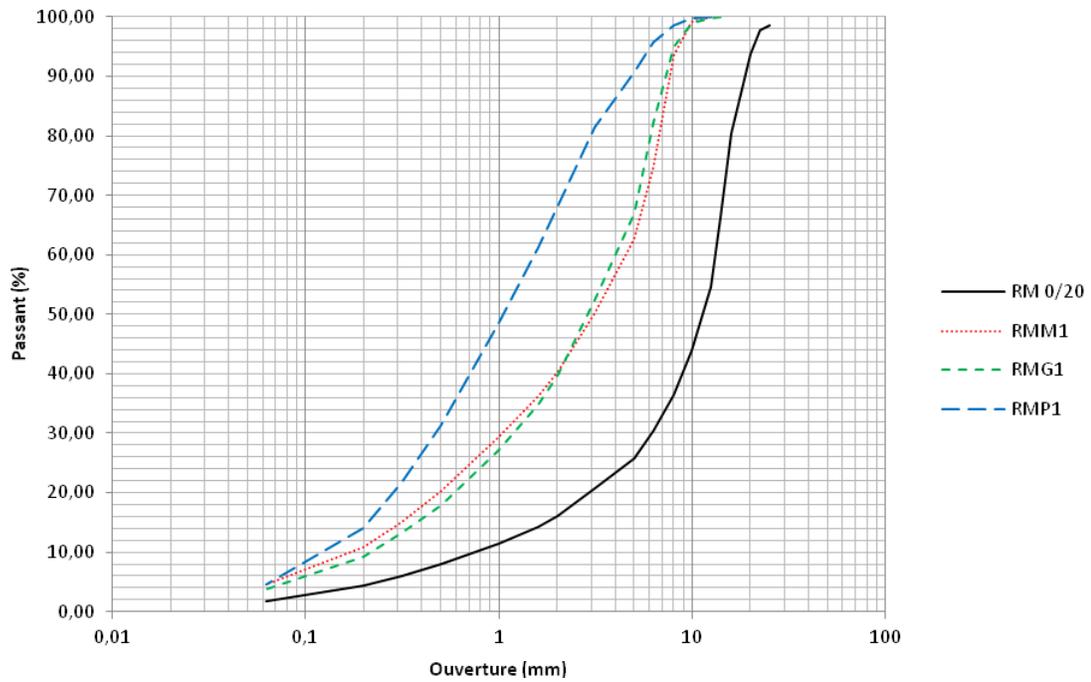


Figure 4 : Distributions granulométriques du matériau recyclé d'entrée 0/20 (RM 0/20) et des produits de concassage (RMM1 mâchoire, RMG1 giratoire, RMP1 percussion)

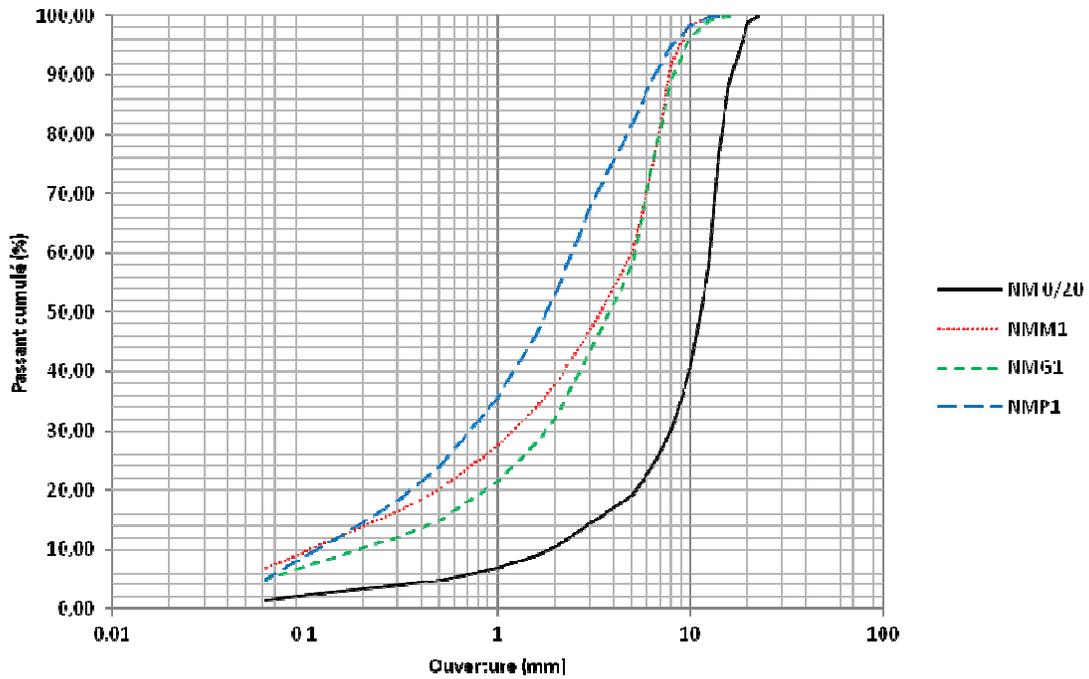


Figure 5 : Distributions granulométriques du matériau naturel d'entrée 0/20 (NM 0/20) et des produits de concassage (NMM1 mâchoire, NMG1 giratoire, NMP1 percussion)

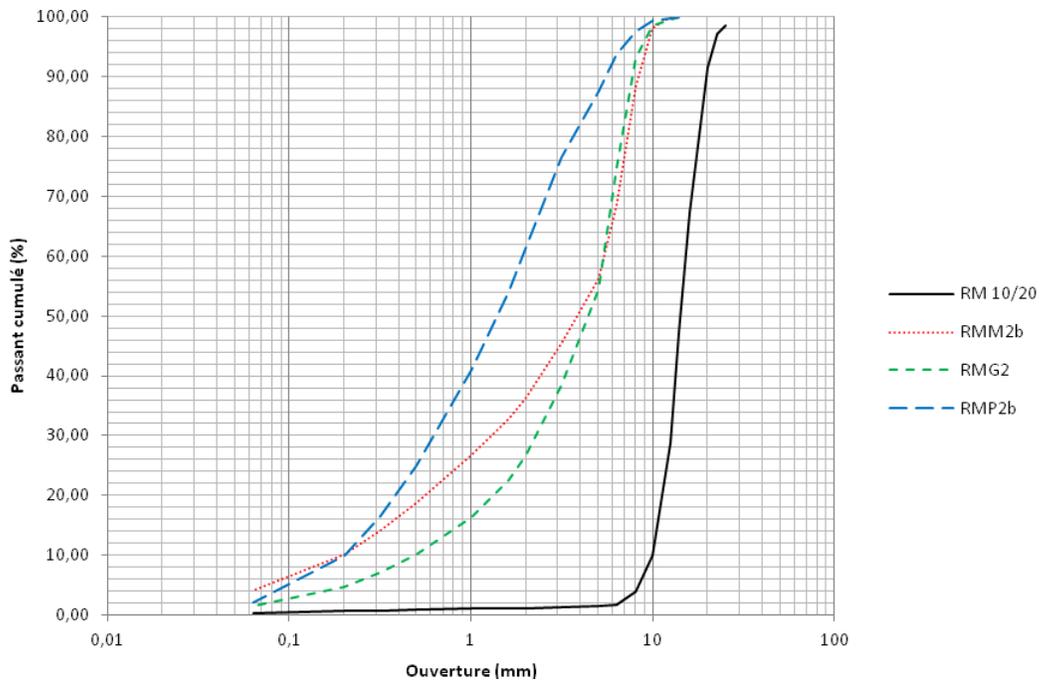


Figure 6 : Distributions granulométriques du matériau recyclé d'entrée 10/20 (RM 10/20) et des produits de concassage (RMM2b mâchoire, RMG2 giratoire, RMP2b percussion)

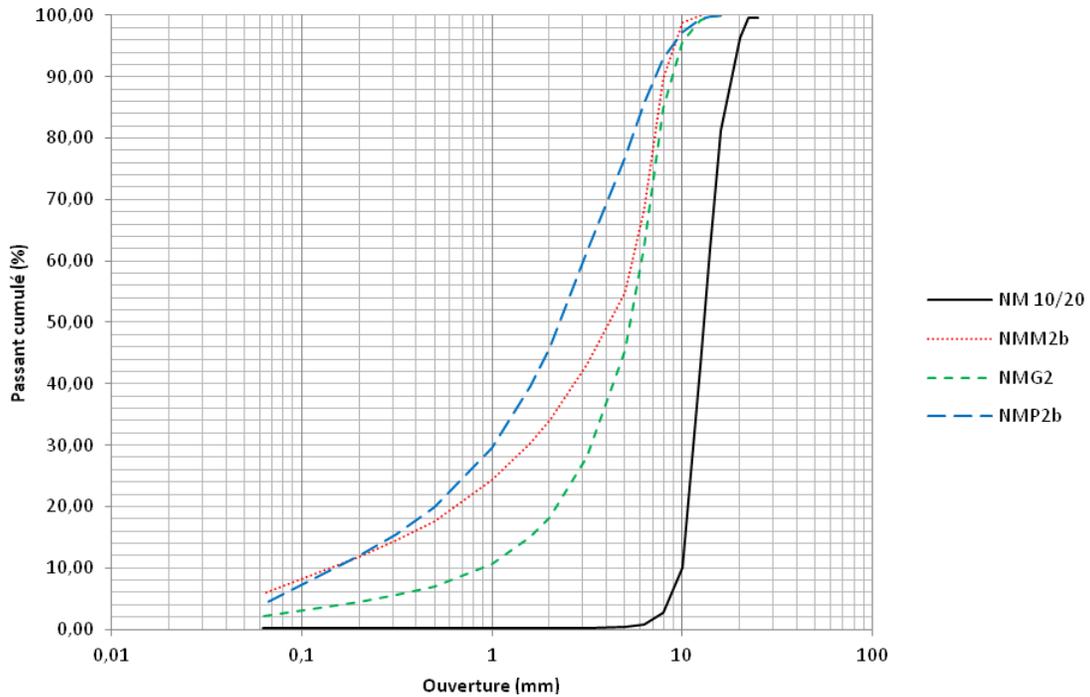


Figure 7 : Distributions granulométriques du matériau naturel d'entrée 10/20 (NM 10/20) et des produits de concassage (NMM2b mâchoire, NMG2 giratoire, NMP2b percussion)

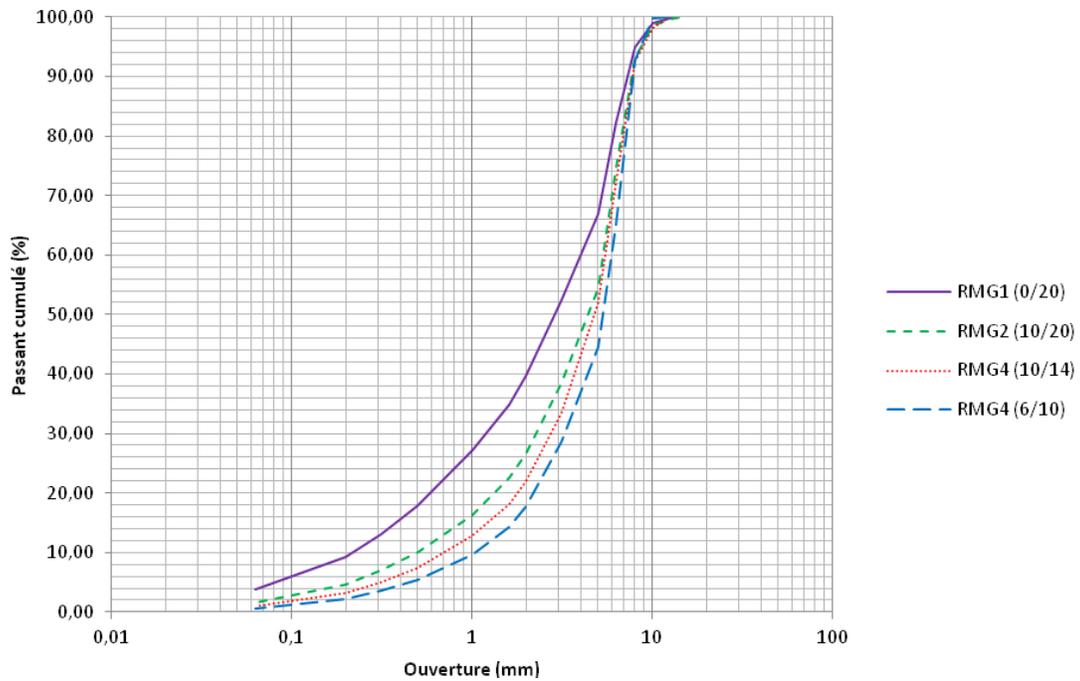


Figure 8 : Distribution granulométrique des produits du concassage du granulat recyclé au concasseur giratoire. Le réglage du concasseur est identique mais la classe granulaire de matériau d'entrée est différente pour chaque modalité et est indiqué entre parenthèse

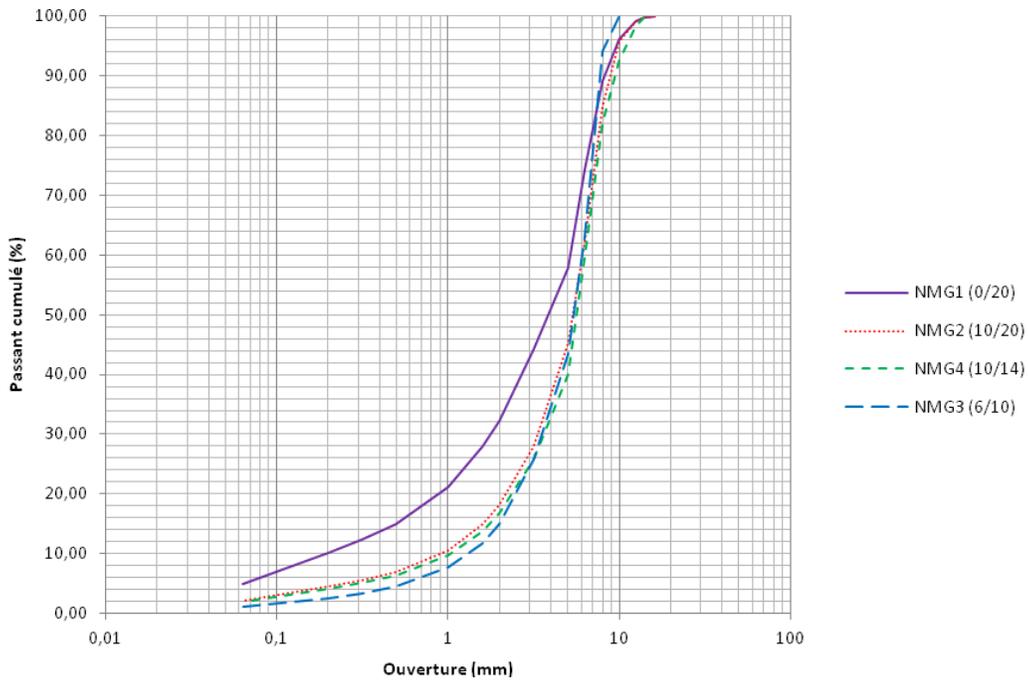


Figure 9 : Distribution granulométrique des produits du concassage du granulat naturel au concasseur giratoire. Le réglage du concasseur est identique mais la classe granulaire de matériau d'entrée est différente pour chaque modalité et est indiqué entre parenthèse

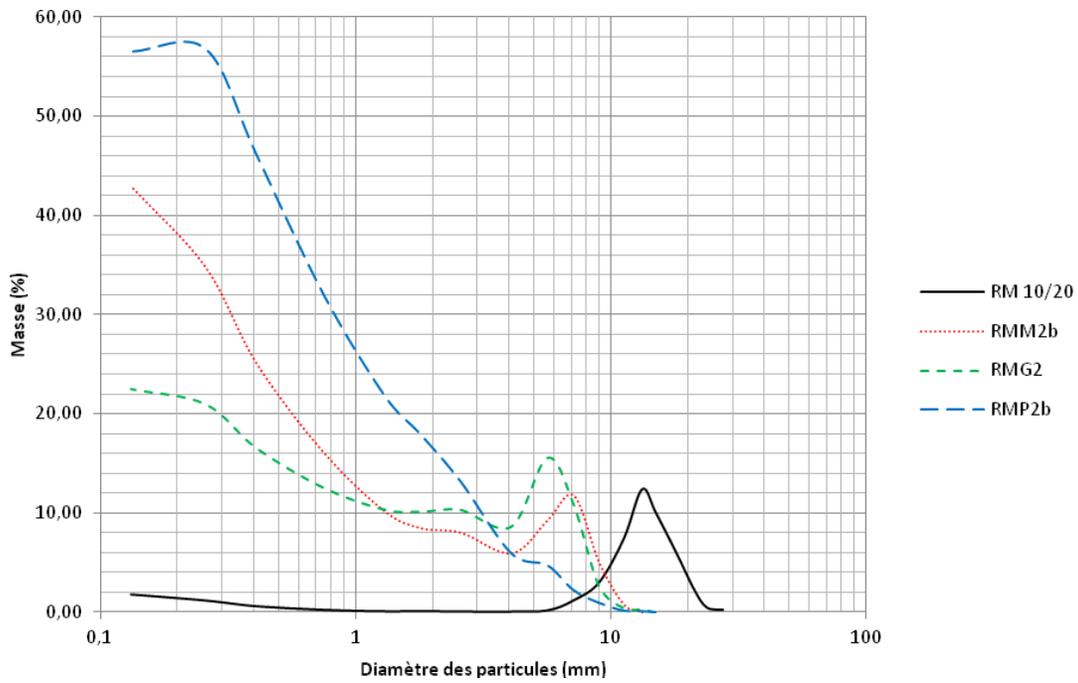


Figure 10 : Distributions granulométriques en fréquence du matériau recyclé d'entrée 10/20 (RM 10/20) et des produits de concassage (RMM2b mâchoire, RMG2 giratoire, RMP2b percussion)

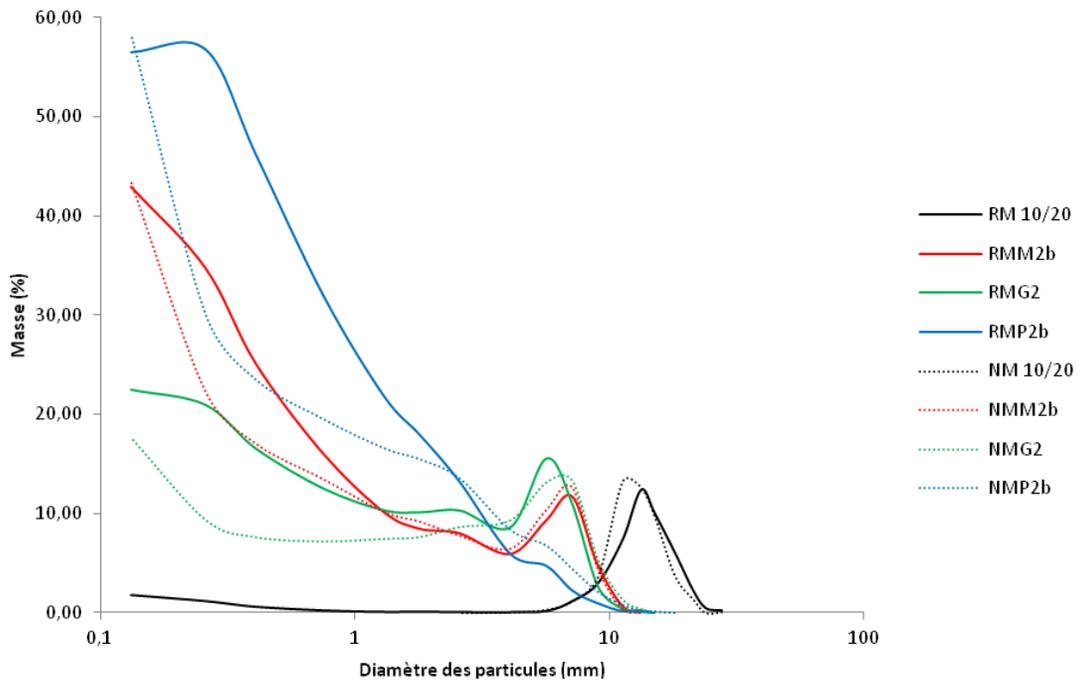


Figure 11 : Comparaison entre granulats naturels (pointillés) et granulats recyclés (traits plein) pour les trois types de concasseurs

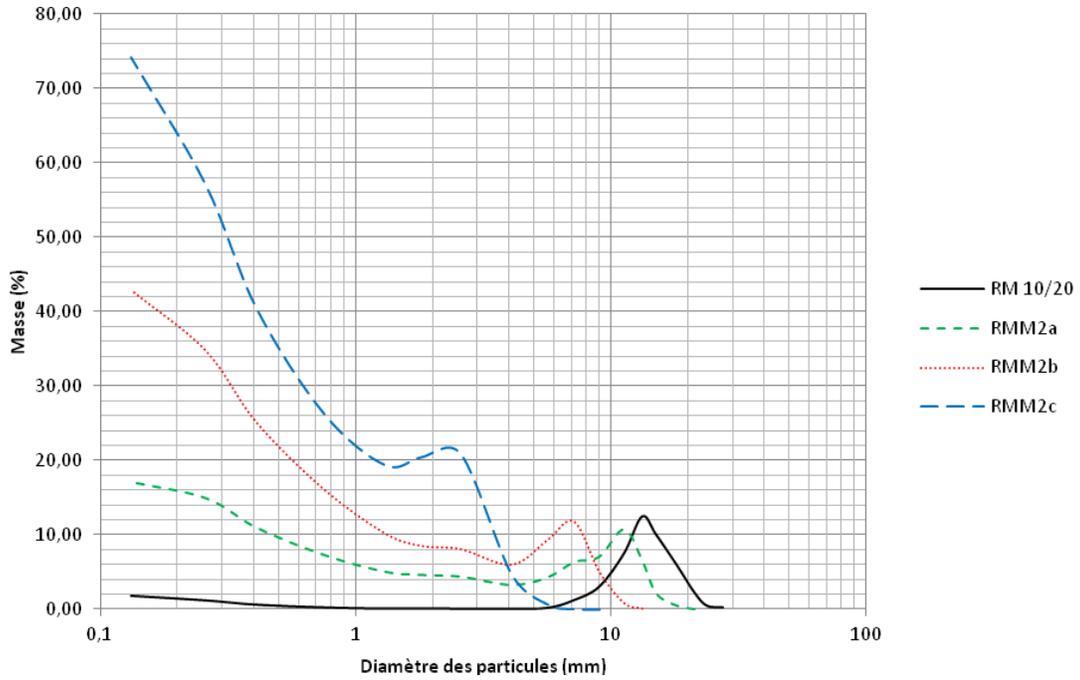


Figure 12 : Comparaison des modalités faible (a), moyenne (b) et forte (c) du concasseur à mâchoires pour un même granulat recyclé d'entrée (RM 10/20)

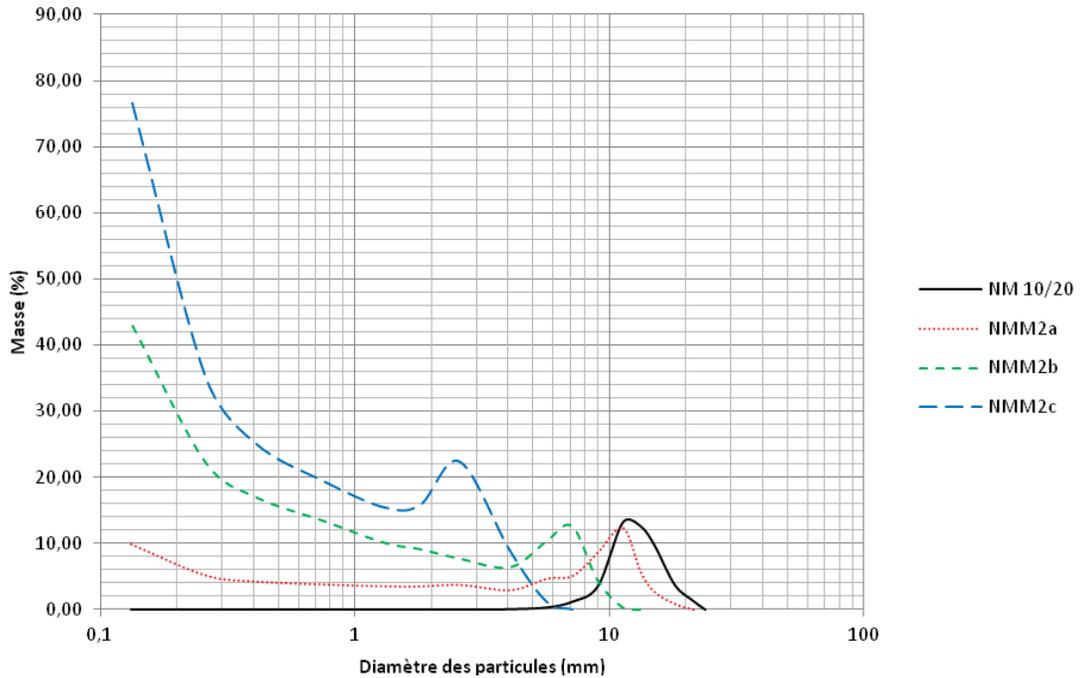


Figure 13 : Comparaison des modalités faible (a), moyenne (b) et forte (c) du concasseur à mâchoires pour un même granulat naturel d'entrée (RM 10/20)

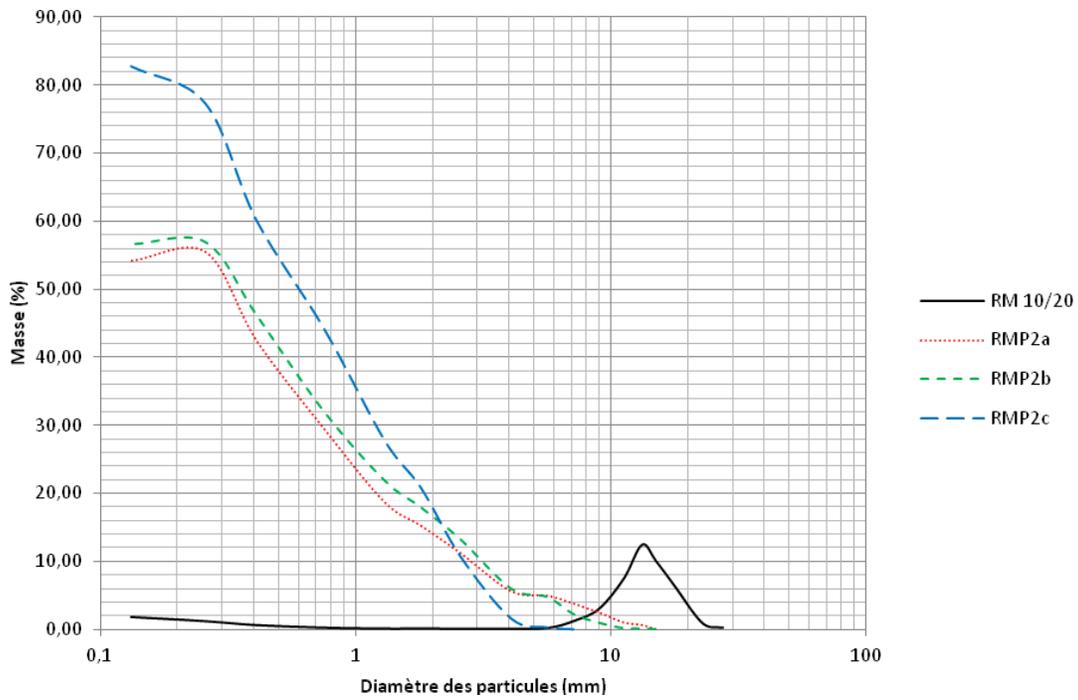


Figure 14 : Comparaison des modalités faible (a), moyenne (b) et forte (c) du concasseur à percussion pour un même granulat recyclé d'entrée (RM 10/20)

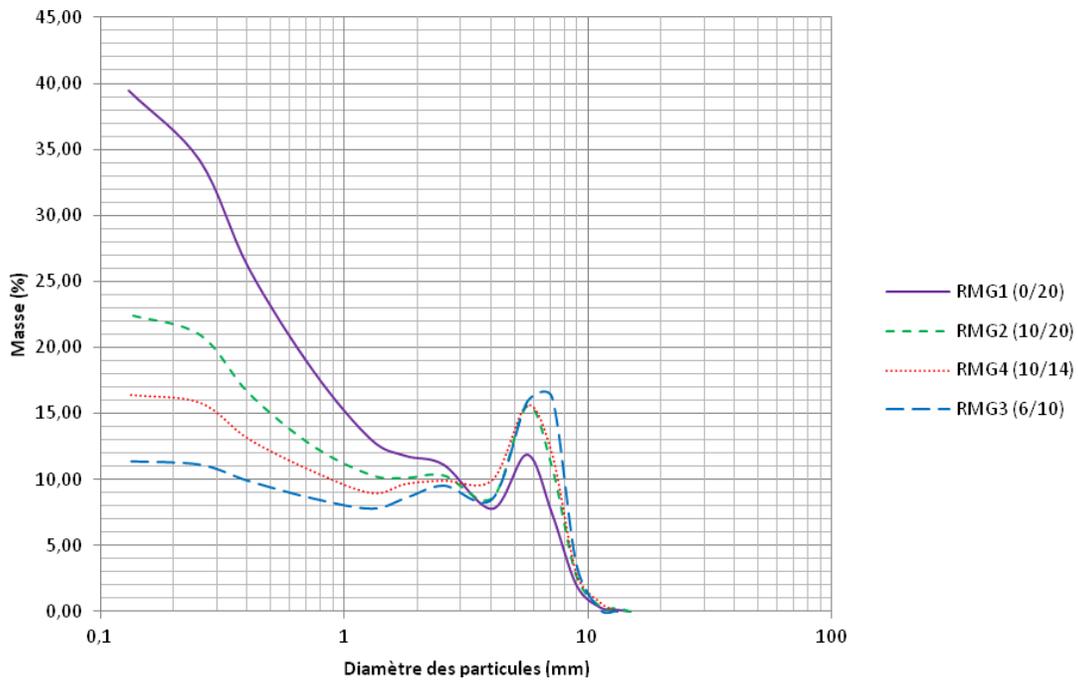


Figure 15 : Fréquence massique des produits du concassage du granulat recyclé au concasseur giratoire. Le réglage du concasseur est identique mais la classe granulaire de matériau d'entrée est différente pour chaque modalité et est indiquée entre parenthèse

Classe granulaire (mm)	Masse (%)			
	RM 10/20	RMM2b	RMG2	RMP2b
> 20	8,40	0,00	0,00	0,00
14/20	44,33	0,00	0,00	0,00
10/14	37,25	1,81	1,43	0,58
6,3/10	8,23	29,79	23,94	5,72
2/6,3	0,62	32,21	47,98	32,40
0,063/2	0,79	32,00	25,06	59,13
< 0,063	0,38	4,19	1,59	2,17

Tableau 1 : Classes granulaires des granulats recyclés source (RM 10/20) et produits par concassage au mâchoires (RMM2b), giratoire (RMG2) et percuteur (RMP2b)

Pour des raisons de sécurité des agents chargés des essais, des aspirateurs mobiles ont été employés afin de limiter au maximum la production de poussières dans le laboratoire lors des différents concassages. Une partie non négligeable des éléments fins volatiles a donc été perdue lors de ces opérations. Le passant à 63 μm (Tableau 1) est donc sous-estimé et doit être considéré comme une valeur minimale.

La comparaison entre les produits de concassage du granulat recyclé et du naturel (Figure 11) fait apparaître, quels que soient les concasseurs, une production plus importante d'éléments supérieurs à 4 mm et une production moins importante d'éléments inférieurs à 4 mm pour le granulat naturel.

La comparaison des produits de concassage du granulat recyclé selon les trois modalités du concasseur à mâchoires (Figure 12) fait apparaître une réduction d'autant plus importante que le réglage de l'écartement entre les mâchoires est faible. Pour les éléments supérieurs à 1 mm le produit du concassage selon la modalité faible (RMM2a) montre une distribution granulométrique selon 3 modes. Le mode principal, centré sur le diamètre 12 mm, est très proche de celui du matériau d'entrée, centré sur le diamètre 13 mm (Figure 12). Deux autres modes, plus discrets, sont centrés sur les diamètres 7 et 2,5 mm. La modalité moyenne (RMM2b) produit un matériau à 2 modes, un principal centré sur le diamètre 7 mm et un secondaire centré sur le diamètre 2,5 mm. Enfin, la modalité forte (RMM2c), toujours pour les éléments supérieurs à 1 mm, produit un matériau à un seul mode, centré sur le diamètre 2,5 mm. La teneur en éléments inférieurs à 1 mm est d'autant plus importante que la modalité de concassage est forte.

Le réglage de l'ouverture du concasseur à mâchoires pour la modalité faible (RMM2a, Figure 12) est identique au réglage utilisé pour la réduction du matériau source R 20/60 et la production du matériau d'entrée employé RM 10/20. C'est ce qui explique la faible évolution observée lors de la réduction selon la modalité faible (Figure 12). Il semble se dégager des modes préférentiels, quels que soient les réglages, pour les diamètres 13 mm, 7 mm et 2,5 mm. On retrouve ces mêmes modes principaux pour le granulat naturel (Figure 13). Ces modes semblent donc plutôt liés au fonctionnement du concasseur qu'à la nature du granulat recyclé.

La comparaison des produits de concassage du granulat recyclé selon les trois modalités du concasseur à percussion (Figure 14) fait apparaître une grande proximité entre les modalités faibles (RMP2a) et moyennes (RMP2b), même si le produit de la modalité faible est plus riche en

éléments supérieurs à 4 mm et plus pauvre en éléments inférieurs à 4 mm que le produit de la modalité moyenne. Par contre la modalité forte (RMP2c) se détache nettement des deux autres avec la quasi-disparition des éléments de diamètre supérieur à 4 mm.

Les modalités du concasseur à percussion sont obtenues en changeant les plaques perforées qui ferment le fond de la chambre de concassage. Pour la modalité faible, les perforations sont de 40 mm de diamètre, pour la moyenne, elles sont de 20 mm et pour la modalité forte, elles sont de 6 mm. Les éléments d'entrée sont suffisamment petits pour pouvoir passer directement au travers des plaques de perforation 20 et 40 mm. La différence observée entre les modalités faibles et moyennes vient probablement du fait que la plaque perforée par des trous de 40 mm offre une surface libre plus importante que celles perforées par des trous de 20 mm. Le temps de séjour dans la chambre de concassage est alors réduit, ce qui diminue également la réduction du matériau. Les plaques perforées de trous de 6 mm de diamètre utilisées pour la modalité forte ne permettent pas le passage direct des particules du matériau d'entrée, ce qui augmente de manière importante le temps de séjour dans la chambre de concassage et donc la réduction du matériau.

Les 4 modalités du concasseur giratoire (Figure 15) ont été réalisées avec un même réglage mais en utilisant différentes fractions granulaires comme matériau d'entrée. Ces différentes fractions granulaires (RM 0/20, RM 10/20, RM 10/14 et RM 6/10) ont été obtenues par criblage du produit de la réduction primaire du matériau source. Il s'agit donc de différentes fractions granulaires d'un même matériau. Les résultats de ces 4 modalités (Figure 15) permettent d'identifier un mode principal centré sur le diamètre 5,5 mm, sauf dans le cas du matériau d'entrée RM 6/10 (RMG3) pour lequel la modalité est centrée sur le diamètre 6,5 mm. Les résultats permettent également d'identifier une modalité secondaire centrée sur le diamètre 2,5 mm. Le produit du concassage du matériau d'entrée RM 0/20 (RMG1) est celui qui présente la plus forte teneur en éléments inférieurs à 1 mm (Figure 15). Contrairement aux autres matériaux d'entrée, le RM 0/20, contient des éléments fins, ce qui explique la forte proportion de ces éléments ainsi que la faible proportion d'éléments grossiers dans le produit (RMG1). Le matériau RMG3, produit du concassage du RM 6/10, se détache des autres produits par son mode principal (6,5 mm) plus élevé que celui des autres (5,5 mm) (Figure 15). La fraction d'entrée du RMG3 est la plus petite testée. L'écartement entre la noix et la cuve du concasseur, trop important, ne permet que le concassage d'une partie du matériau d'entrée. Mis à part le cas particulier de RMG1, enrichie par les fines du matériau d'entrée, plus de D_{max} du matériau d'entrée est important, plus la réduction est forte et plus la part d'éléments inférieurs à 1 mm dans le matériau produit est élevée (Figure 15).

4.2 Granulométrie laser

Les granulométries laser ont été réalisées sur les passants à 63 μm des tamisages. Pour des raisons de sécurité des agents chargés des essais, des aspirateurs mobiles ont été employés afin de limiter au maximum la production de poussières dans le laboratoire lors des différents concassages. Une partie non négligeable des éléments fins volatiles a donc été perdue lors de ces opérations. Le passant à 63 μm est donc sous-estimé et doit être considéré comme une valeur minimale. Il est probable également que les éléments les plus fins soient absents des échantillons analysés.

Les distributions granulométriques des produits de concassage des matériaux recyclés (Figure 16) ne présentent pas de différence notable. Il en est de même pour la comparaison des distributions granulométriques des matériaux recyclés et naturels produits dans les mêmes conditions (Figure 17).

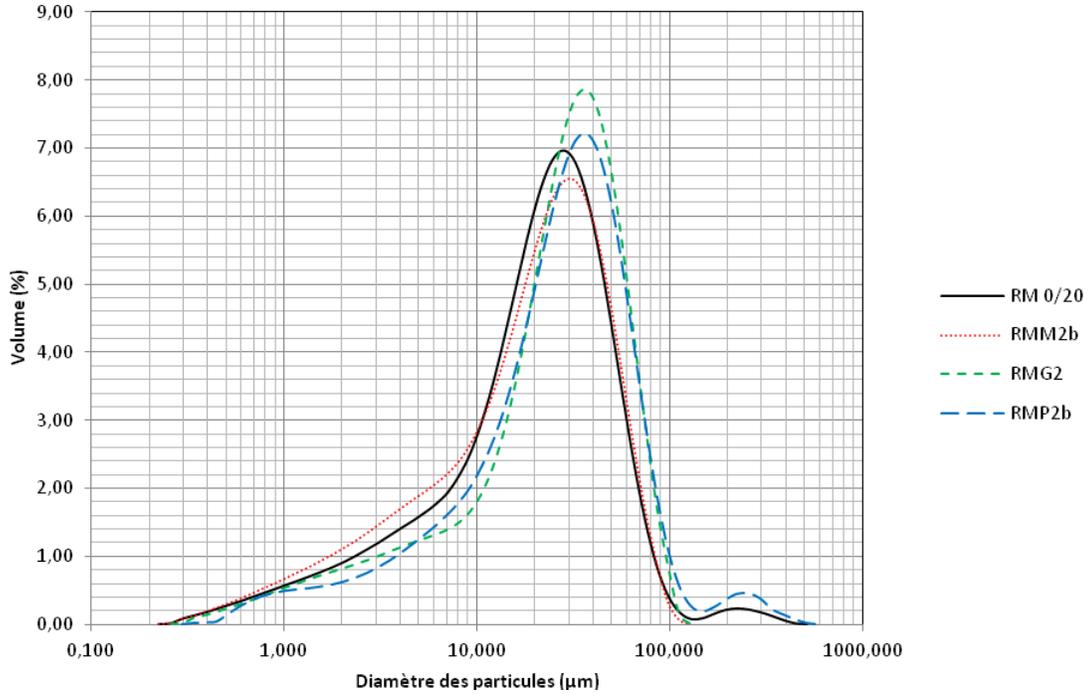


Figure 16 : Comparaison des distributions granulométriques obtenues par granulométrie laser sur le passant à 63 µm du concassage primaire au mâchoires (RM 0/20) et des secondaires au mâchoires (RMM2b), giratoire (RMG2) et percuteur (RMP2b)

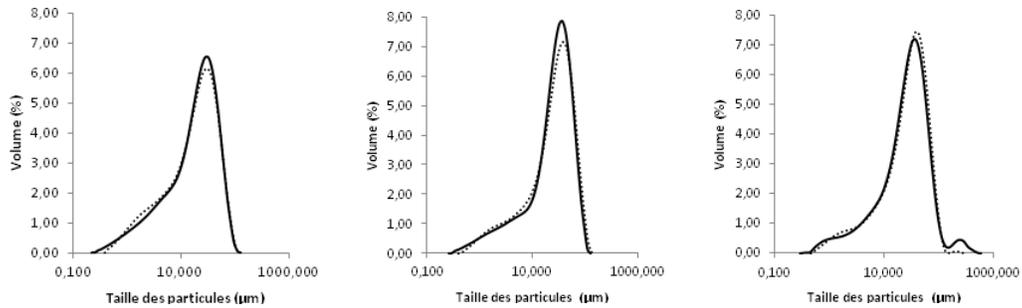


Figure 17 : Comparaison des distributions granulométriques entre les matériaux recyclés (trait plein) et naturel (pointillés) obtenues par granulométrie laser sur le passant à 63 µm pour le concasseur à mâchoires (gauche), giratoire (centre) et à percussion (droite)

4.3 Aplatissement

Les résultats des premiers essais d'aplatissement donnant des résultats très hétérogènes, il a été décidé de les doubler. Cependant tous les essais n'ont pas pu être doublés du fait du manque d'échantillons. Seul le résultat de l'essai jugé le plus représentatif (masse testée) est reporté dans le Tableau 2. Il faut noter que pour certains essais, les valeurs d'aplatissement pour le même échantillon varient du simple au double. Ces résultats sont donc à prendre avec précaution.

Avec les concasseurs de laboratoire utilisés dans cette étude, il semble que la proportion d'éléments plats produits lors du traitement des granulats de béton recyclés ne soit pas

négligeable. Il semble également que le perceur utilisé dans cette étude produise moins d'éléments plats que les concasseurs à mâchoires et giratoires.

Granulat élémentaire (mm)	RM 10/20	RMM2b	RMG2	RMP2b
20/25	100%			
16/20	16%			
12,5/16	8%		100%	
10/12,5	9%	25%	61%	0%
8/10	15%	13%	30%	15%
6,3/8	18%	15%	14%	7%
5/6,3		17%	14%	10%
4/5		26%	23%	15%
Aplatissement global (%)	13%	17%	19%	11%

Tableau 2 : Aplatissement par granulat élémentaire et aplatissement global des matériaux recyclés d'entrée (RM 10/20) et produits (RMM2b, RMG2 et RMP2b) lors du concassage

4.4 Essais de résistance à la fragmentation et à l'usure

Comme précisé dans le paragraphe 3.3.5, l'essai Los Angeles a été adapté pour étudier l'évolution du passant à 1,6 mm des granulats recyclés. Ces résultats sont présentés dans la Figure 18 et la Figure 19.

La fraction 4/6,3 mm du matériau d'entrée (RM 0/20) présente une résistance à l'abrasion (Figure 18) et à l'usure (Figure 20) plus faible que celles des produits du concassage. Des matériaux produits par concassage, pour les fractions 4/6,3 mm, c'est le produit du concasseur à percussion (RMP2b) qui présente la plus importante résistance à la fragmentation (Figure 18) et à l'usure (Figure 20), vient ensuite le produit du concasseur à mâchoires (RMM2b) et c'est le produit du concasseur giratoire (RMG2) qui présente la plus faible résistance pour les produits de concassage. D'autre part, la fraction 10/14 du matériau d'entrée (RM 0/20 f 10/14) présente une résistance à la fragmentation (Figure 19) et à l'usure (Figure 20) plus élevée que celle de la fraction 4/6,3 du même matériau (RM 0/20 f 4/6,3).

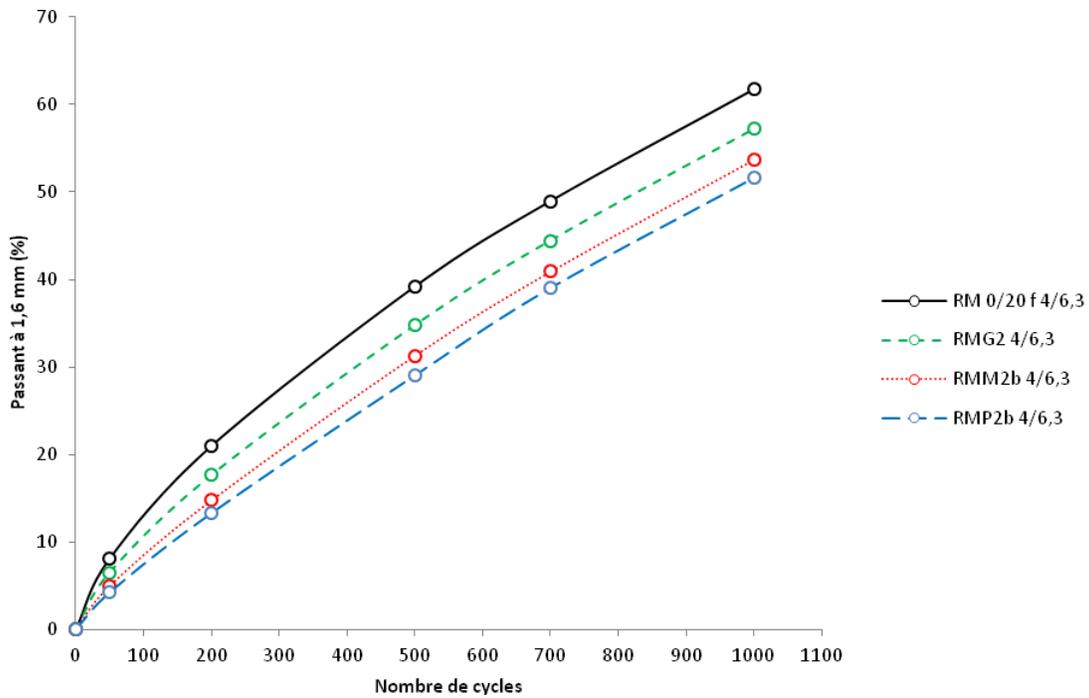


Figure 18 : Evolution des passants à 1,6 mm lors des essais de Los Angeles pour les fractions 4/6,3 mm du matériau source (RM 0/20) et des produits des concasseurs giratoires (RMG2), à mâchoires (RMM2b) et à percussion (RMP2b)

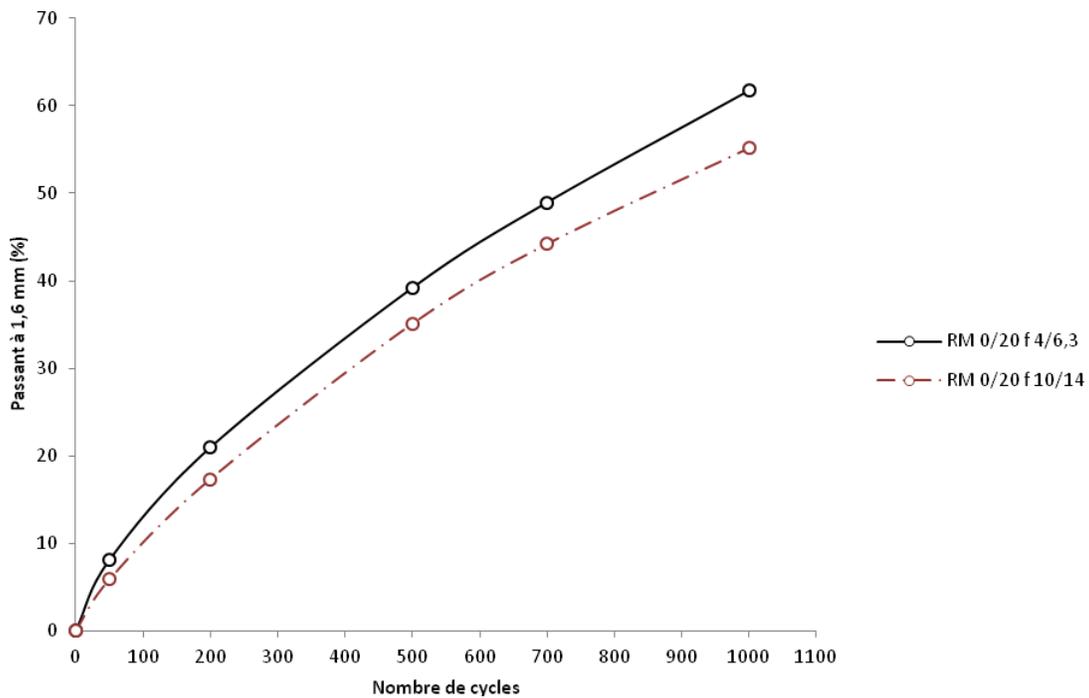


Figure 19 : Evolution des passants à 1,6 mm lors des essais Los Angeles du matériau d'entrée des concasseurs RM 0/20 pour les fractions 4/6,3 et 10/14

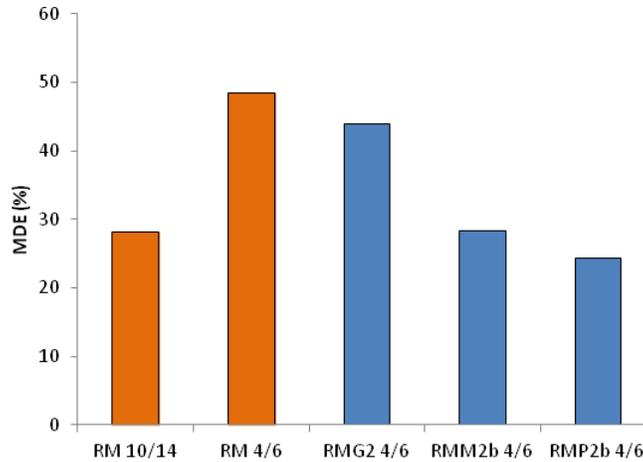


Figure 20 : Résultats des essais de l'essai Micro-Deval pour les fractions 10/14 et 4/6,3 mm du matériau d'entrée du concasseur (RM 10/14 et RM 4/6,3) et les produits du concassage au giratoire (RMG2), mâchoire (RMM2b) et percuteur (RMP2b)

4.5 Cinétique d'absorption d'eau

Par rapport au matériau d'entrée, la cinétique d'absorption d'eau des matériaux produits est inférieure (Figure 21). Parmi les matériaux produits, celui obtenu par concassage au giratoire présente une absorption supérieure à ceux obtenus par les concasseurs à mâchoires et à percussion. La fraction 10/14 du matériau d'entrée (RM 10/14) a une absorption inférieure à celle de la fraction 4/6 (RM 4/6).

On lie l'absorption à 24 h des granulats de béton recyclé à la teneur en mortier adhérent. Plus cette teneur est importante et plus l'absorption d'eau à 24 h est élevée. La fraction 4/6 est plus riche en mortier adhérent que la fraction 10/14 (Figure 21). La réduction au mâchoires et au percuteur, dans le cadre de cette étude, réduit de manière plus importante la teneur en mortier adhérent que la réduction au giratoire. Dans tous les cas, le concassage secondaire permet de réduire le taux de mortier.

La Figure 22 compare les fractions produites après concassage primaire et secondaire au mâchoires. L'absorption à 24 h, donc la quantité de mortier adhérent, est d'autant plus faible que la fraction granulaire est grossière. Le traitement secondaire au mâchoires permet de réduire la quantité de mortier adhérent quelle que soit la fraction. La réduction de la quantité de mortier adhérent est d'autant plus importante que la fraction granulaire est grossière.

La comparaison des absorptions à 24 h, donc les teneurs en mortier adhérent, pour chacune des modalités des trois concasseurs sont présentés dans la Figure 23. Les résultats de la mesure d'absorption pour la modalité forte du concasseur à percussion ne sont pas présentés car la taille de l'échantillon testé n'est pas suffisante pour qu'il soit représentatif. Pour les concasseurs à mâchoires et à percussion, plus la modalité est forte et plus la teneur en mortier adhérent est réduite. Dans le cas du giratoire, les modalités étant définies par la taille de la fraction d'entrée, la réduction de la teneur en mortier adhérent est relativement semblable quelle que soit la modalité.

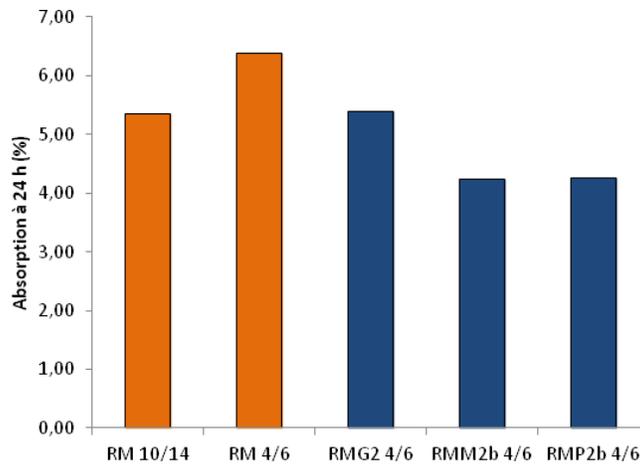


Figure 21 : Absorption à 24 h des fraction 4/6 et 10/14 du matériau d'entrée (RM 4/6 et RM 10/14) ainsi que des produits par concassage au giratoire (RMG2 4/6) au mâchoires (RMM2b 4/6) et au percuteur (RMP2b 4/6)

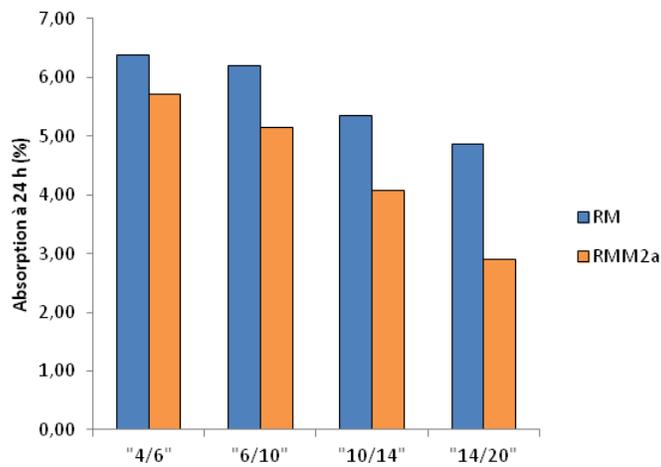


Figure 22 : Comparaison entre le matériau d'entrée (RM) et le produit du concasseur à mâchoires (RMM2a) pour chacun des fractions (4/6, 6/10, 10/14 et 14/20)

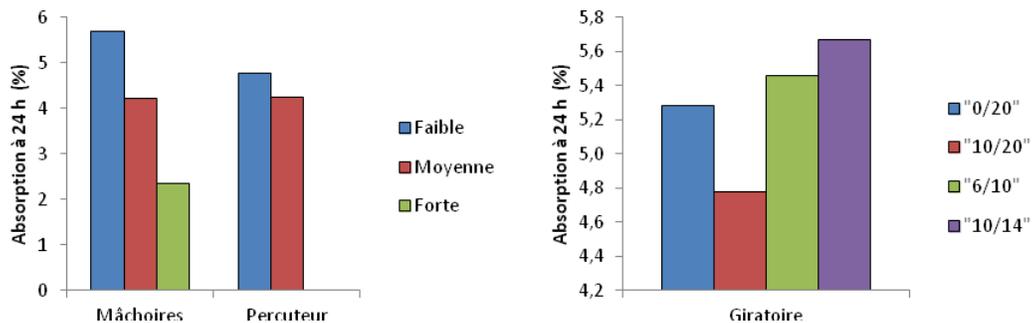


Figure 23 : Comparaison des absorptions des fractions 4/6,3 mm produites lors des différentes modalités pour les concasseurs à mâchoires et à percussion à gauche et pour les différentes fractions granulaires d'entrée du concasseur giratoire à droite

5 Discussion

La comparaison des granulométries du granulat recyclé 10/20 concassé par les trois concasseurs de laboratoire (Figure 10) indique que le concasseur à percussion engendre la plus importante réduction. Afin de confirmer cette observation, un estimateur du module de finesse (module de finesse calculé à l'aide des refus des tamis 0,2 ; 0,315 ; 0,5 ; 1 ; 2 ; 5 ; 10 ; 20 ; 40 ; 80 mm) est calculé pour les différentes modalités et représenté en fonction du diamètre équivalent à 95 % de passant (D_{95}) (Figure 24). Nous rappelons que les valeurs du module de finesse vont de 0 pour un matériau fin à 10 pour un matériau grossier. Pour un D_{95} identique, le matériau produit par le concasseur giratoire a un module de finesse estimé de l'ordre de 12 % supérieur à celui du concasseur à mâchoires et de l'ordre de 22 % supérieur à celui du concasseur à percussion. Ceci confirme les observations faites sur les granulométries.

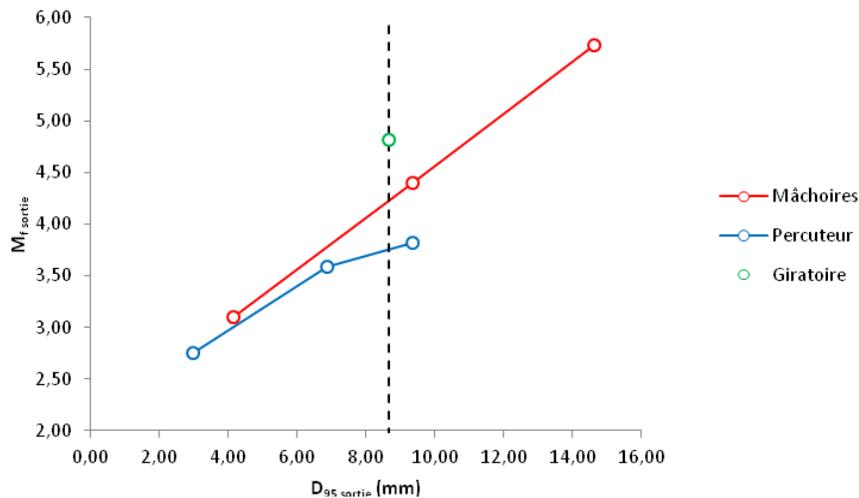


Figure 24 : Estimateur du module de finesse des matériaux de sortie des concasseurs ($M_{f\text{ sortie}}$) représenté en fonction du diamètre équivalent à 95 % de passant du matériau de sortie ($D_{95\text{ sortie}}$) pour les trois concasseurs

Lors du concassage, afin de bien maîtriser la production des fractions choisies, on cherche à obtenir un granulat ayant l'étendue granulaire la plus petite ou, autrement dit, le diamètre moyen le plus élevé pour un diamètre maximum donné. On estime ici ce critère en divisant l'étendue granulaire ($D_{95} - D_5$) par le diamètre médian (D_{50}) du produit du concassage. Plus la valeur de cet estimateur de la qualité de la granulométrie est petit, plus la production d'une taille donnée peut être maîtrisée. Ces valeurs sont représentées en fonction du D_{95} du matériau de sortie (Figure 25). Pour le concasseur à mâchoires la modalité la plus faible (RMM2a) produit le matériau ayant les meilleures caractéristiques granulométriques. Pour le concasseur à percussion, c'est la modalité la plus forte qui produit les meilleures caractéristiques granulométriques. Cependant, la taille des éléments produits est également à prendre en compte. Pour cela on considère le D_{95} du granulat produit (Figure 25). La modalité la plus faible du concasseur à mâchoires produit le matériau dont le D_{95} est le plus élevé (14,6 mm). Ceci confirme la qualité granulométrique de ce matériau. Par contre, pour la modalité forte du concasseur à percussion, le D_{95} du matériau produit est le plus faible (3 mm), ce qui le rend peu compatible avec un emploi en granulat pour béton. Pour un même D_{95} , le concasseur giratoire présente les caractéristiques granulométriques les plus favorables, suivi du mâchoires puis du percuteur (Figure 25).

Le calcul de l'estimateur granulométrique pour les 4 modalités du concasseur giratoire, soit pour 4 matériaux d'entrée différents, est présenté dans la Figure 26. La modalité RMG3 (matériau d'entrée 6/10) dispose des caractéristiques granulométriques les plus avantageuses (étendue

granulaire faible et D_{50} élevé). Par contre, la modalité RMG1 (matériau d'entrée 0/20) est pénalisée par les fines déjà présentes dans le matériau d'entrée.

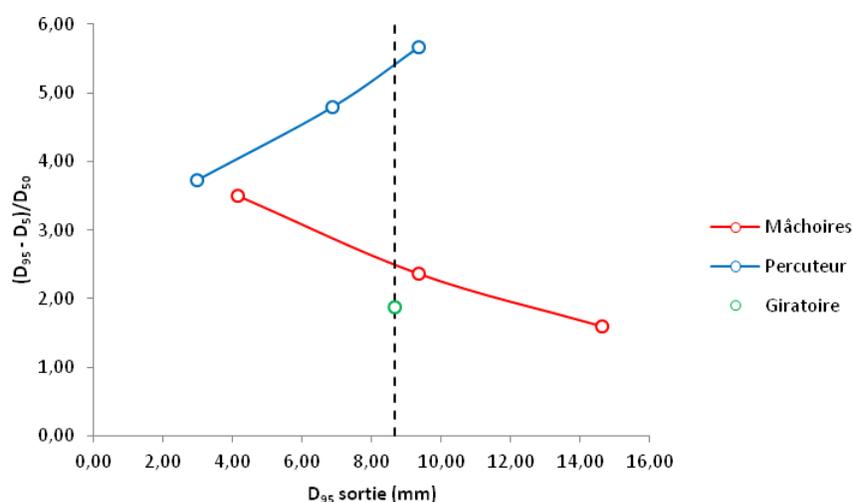


Figure 25 : Représentation de l'étendue granulaire divisée par le D_{50} du matériau de sortie des concasseurs en fonction du D_{95} de sortie, pour un même matériau d'entrée (RM 10/20)

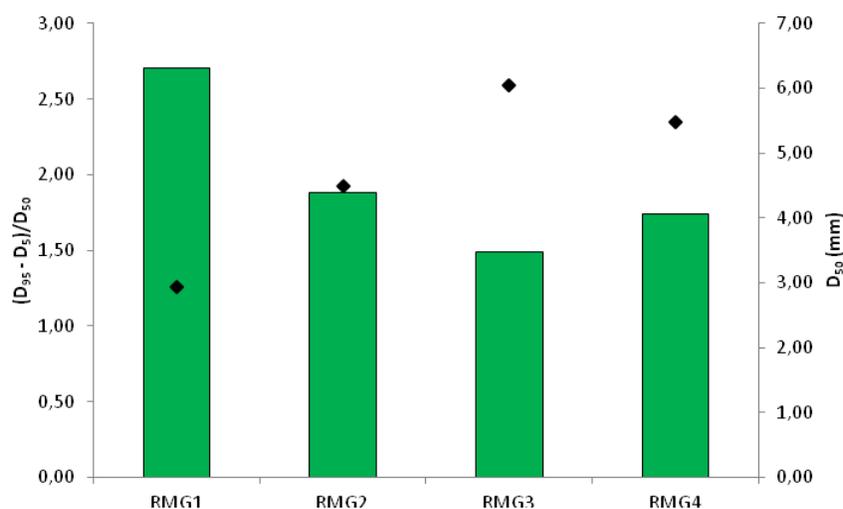


Figure 26 : Histogramme représentant l'étendue de la classe granulaire, divisée par le diamètre équivalent à 50 % de passant (axe vertical de gauche), représenté avec la valeur de l'équivalent à 50 % de passant (axe vertical de droite, points noirs) pour le concasseur giratoire avec 4 matériaux d'entrée (RM 0/20 pour RMG1, RM 10/20 pour RMG2, RM 6/10 pour RMG3 et RM 10/14 pour RMG4)

Le concasseur à percussion de laboratoire utilisé dans cette étude réduit le matériau d'entrée de manière très importante (Figure 10). Après concassage, il ne reste quasiment que du sable. Les concasseurs à mâchoires et giratoires ont une réduction bien plus faible que celle du percuteur. On peut toutefois distinguer le mâchoires du giratoire. Le giratoire réduit un peu plus le granulat d'entrée tout en produisant moins de fines. On pourrait donc en conclure, dans le cadre de cette étude, que le concasseur à percussion, trop violent, n'est pas le bon outil pour traiter les granulats de béton recyclé et qu'entre le mâchoires et le giratoire, c'est le giratoire qui semble le plus adapté, puisqu'il produit peu de fines. Mais confrontons cette observation avec les résultats des essais complémentaires, qui nous renseignent sur la qualité des granulats recyclés produits.

Les résultats des essais Los Angeles (Figure 18) indiquent que quel que soit le concasseur employé, le matériau recyclé de sortie a une meilleure résistance à la fragmentation que le matériau recyclé d'entrée. Cependant, parmi les trois modes de concassage, les granulats recyclés 4/6,3 mm traités au giratoires ont une résistance plus faible que ceux traités au mâchoires qui eux-mêmes ont une résistance moins importante que ceux traités au percuteur (Figure 18). On retrouve cette hiérarchie avec l'essai Micro-Deval, les granulats traités au giratoires ayant la plus faible résistance à l'usure et ceux traités au percuteur la plus élevée (Figure 20). On peut en conclure que, dans le cadre de cette étude, pour la fraction 4/6,3 mm, les granulats produits par le percuteur sont de meilleure qualité que ceux produits par le mâchoires eux-mêmes de meilleure qualité que ceux produits par le giratoire.

On considère les absorptions à 24 h comme un indicateur de la teneur en mortier adhérent. Les résultats de ces absorptions montrent que dans tous les cas le concassage secondaire permet de réduire la teneur en mortier adhérent. Ils montrent également que la teneur en mortier adhérent des granulats recyclés à la sortie du giratoire est plus importante que celle des granulats à la sortie du mâchoires et du percuteur (Figure 21). Le taux de mortier adhérent est un des facteurs majeurs qui contrôle la qualité des granulats. Au regard de ce facteur, les granulats produits par le concasseur giratoire employé dans cette étude sont de moins bonne qualité que les autres.

La comparaison des absorptions à 24 h des granulats recyclés avant et après traitement au concasseur à mâchoires pour les 4 fractions granulaires étudiées (4/6, 6/10, 10/14 et 14/20 mm) (Figure 22) indique que plus la fraction granulaire est grande et plus son taux de mortier adhérent est faible. De plus, lors du concassage, les fractions les plus grossières s'appauvrissent de manière plus importante en mortier adhérent au détriment des fractions les plus fines. Les fines créées lors du concassage sont donc majoritairement issues du mortier adhérent. Plus le granulat est réduit pendant le concassage, moins il contiendra de mortier adhérent et meilleures seront ses performances. Mais plus on réduit un granulat pendant le concassage et moins on obtient de granulat pour béton à la fin du traitement.

6 Conclusion

Dans cette étude, trois concasseurs de laboratoire – à mâchoires, à percussion et giratoire – sont utilisés pour étudier l'influence de la configuration du concassage d'un granulat de béton recyclé sur la qualité du produit après concassage. Les deux premiers concasseurs sont configurés suivant 3 réglages différents. Un granulat 10/20 de béton recyclé et un granulat 10/20 naturel sont concassés suivant ces 7 configurations. Pour chaque concasseur, on compare le résultat du concassage d'un 10/20 et d'un 0/20. Enfin, pour le concasseur giratoire, on les compare également avec le résultat du concassage d'un 10/14 et d'un 6/10. La présente étude propose une approche méthodologique permettant d'identifier les paramètres jugés pertinents pour l'évaluation des stratégies de concassage des granulats de béton recyclé.

Contrairement aux granulats naturels, les granulats issus de bétons de démolition sont constitués de deux phases. L'une est le granulat naturel d'origine, l'autre est le mortier adhérent. Le mortier adhérent, plus poreux et fragile que le granulat d'origine, est déjà identifié comme étant la phase posant problème lors du recyclage dans une nouvelle génération de béton.

Dans cette étude on compare le résultat du concassage suivant les différentes modalités (configuration de concassage, taille granulaire d'entrée, nature du granulat) suivant d'une part, la taille granulaire et l'angularité après concassage, et d'autre part, la proportion de mortier adhérent. La proportion de mortier adhérent peut être déduite en mesurant différentes propriétés des granulats de béton recyclé : absorption en eau, résistance à la fragmentation suivant l'essai Los Angeles (plus précisément l'évolution de la fragmentation avec le nombre de tours du tambour) et résistance à l'abrasion suivant l'essai Micro-Deval.

Des trois concasseurs de laboratoire employés dans cette étude, c'est le concasseur giratoire qui produit les matériaux les plus satisfaisants d'un point de vue granulométrique, c'est-à-dire la plus faible étendue granulaire pour un diamètre maximum donné. Mais c'est le concasseur à percussion qui produit le matériau le plus satisfaisant du point de vue de la qualité des granulats, c'est à dire la proportion en mortier adhérent la plus réduite. Ce matériau présente par conséquent les valeurs de LA (Figure 18), de MDE (Figure 20) et d'absorption (Figure 21) les plus favorables.

Il ne se détache pas de stratégie de concassage qui permette d'obtenir à la fois une fraction granulaire ciblée et de qualité optimale. Il existe différentes stratégies à adapter selon les besoins, qui vont de la recherche de la libération maximale du granulat naturel d'origine, jusqu'à la volonté de réemployer l'intégralité du matériau de démolition. La première stratégie à l'avantage de produire des matériaux aux propriétés quasi-équivalentes à celles d'un granulat naturel, mais l'inconvénient de produire une fraction de petite taille et une quantité très importante de fines. La deuxième stratégie à l'avantage de produire un granulat de taille importante, de produire peu de fines, mais l'inconvénient de produire des granulats ayant des propriétés physiques médiocres.

Liste bibliographique

- [1] Gomez-Soberon JM V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate An experimental study. *Cement and Concrete Research* 2002;32:1301–11.
- [2] Tam VWY, Wang K, Tam CM. Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis. *Journal of Hazardous Materials* 2008;152:703–14.
- [3] Angulo SC, Carrijo PM, Figueiredo a. D, Chaves a. P, John VM. On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete. *Materials and Structures* 2009;43:519–28.
- [4] Nagataki S, Gokce a, Saeki T, Hisada M. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research* 2004;34:965–71.
- [5] Etxeberria M, Vázquez E, Marí a., Barra M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research* 2007;37:735–42.
- [6] De Oliveira MB, Vazquez E. The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. *Waste Management* 1996;16:113–7.
- [7] Etxeberria M, Vasquez E, Mari A. Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research* 2006;58:683–90.
- [8] Kim KH, Cho HC, Ahn JW. Breakage of waste concrete for liberation using autogenous mill. *Minerals Engineering* 2012;35:43–5.
- [9] Schreier M, Groger T. Impact crushing of concrete for liberation and recycling. *Powder Technology* 1999;105:39–51.
- [10] Ulsen C, Kahn H, Hawlitschek G, Masini EA, Angulo SC. Separability studies of construction and demolition waste recycled sand. *Waste Management (New York, NY)* 2012.
- [11] Ulsen C, Kahn H, Hawlitschek G, Masini E a., Angulo SC, John VM. Production of recycled sand from construction and demolition waste. *Construction and Building Materials* 2013;40:1168–73.
- [12] Tsujino M, Kitagaki R, Noguchi T, Nagai H, Kunieda Y. Completely recyclable concrete of aggregate-recovery type by using microwave heating technology. 3rd ACF International Conference ACF/VCA, 2008, p. 522 – 539.
- [13] Shima H, Tateyashiki H, Matsuhashi R, Yoshida Y. An Advanced Concrete Recycling Technology and its Applicability Assessment through Input-Output Analysis. *Journal of Advanced Concrete Technology* 2005;3:53–67.

- [14] Lee H, Kwon JH, Kim KH, Cho HC. Application of DEM model to breakage and liberation behaviour of recycled aggregates from impact-breakage of concrete waste. *Minerals Engineering* 2008;21:761–5.
- [15] Akbarnezhad A, Ong KCG, Zhang MH, Tam CT, Foo TWJ. Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials* 2011;25:3469–79.
- [16] Mulder E, De Jong TPR, Feenstra L. Closed cycle construction: an integrated process for the separation and reuse of C&D waste. *Waste Management (New York, NY)* 2007;27:1408–15.

Annexe 1 : Granulométrie des matériaux recyclés

Ouverture (mm)	Passant cumulé (%)															
	RM 0/20	RMM1	RMP1	RMG1	RM 10/20	RMM2a	RMM2b	RMM2c	RMP2a	RMP2b	RMP2c	RMG2	RM 6/10	RMG3	RM 10/14	RMG4
25	98,59	100,00	100,00	100,00	98,58	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
22,5	97,82	100,00	100,00	100,00	97,27	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
20	93,81	100,00	100,00	100,00	91,60	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
16	80,45	100,00	100,00	100,00	67,31	97,95	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
14	66,37	100,00	100,00	100,00	47,27	93,62	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,34	100,00
12,5	54,54	100,00	100,00	99,79	28,70	83,81	100,00	100,00	99,06	99,84	100,00	99,61	100,00	100,00	52,47	100,00
10	43,90	99,12	99,77	98,97	10,02	57,09	98,19	100,00	96,55	99,42	100,00	98,57	100,00	99,80	2,99	98,26
8	36,49	93,59	98,55	94,96	3,91	43,05	88,34	100,00	91,63	97,51	100,00	93,22	52,89	92,77	0,74	92,54
6,3	30,34	74,86	95,72	82,32	1,79	32,35	68,40	99,90	85,19	93,70	100,00	74,63	4,40	65,15	0,61	72,22
5	25,81	62,58	90,76	66,85	1,49	26,80	56,34	99,03	78,78	87,54	99,63	54,42	1,10	44,47	0,49	51,91
3,15	20,78	50,09	81,46	52,43	1,30	20,78	45,40	90,30	68,47	76,51	96,71	38,50	0,43	28,69	0,10	33,45
2	16,13	40,23	68,07	39,64	1,17	15,76	36,19	66,26	55,59	61,30	84,39	26,65	0,43	17,73	0,10	22,04
1,6	14,29	36,18	61,34	34,92	1,11	13,92	32,81	58,07	49,50	54,13	76,06	22,60	0,43	14,29	0,10	18,17
1	11,39	29,34	48,52	27,11	1,03	10,91	26,73	46,42	38,31	41,02	59,43	16,40	0,43	9,62	0,10	12,78
0,5	7,98	20,34	31,34	17,98	0,89	7,28	18,71	33,26	23,57	25,01	37,33	10,14	0,43	5,34	0,10	7,47
0,315	6,06	15,16	21,75	13,16	0,77	5,26	14,07	25,77	15,72	16,46	26,21	7,08	0,43	3,51	0,10	5,05
0,2	4,38	10,77	14,06	9,23	0,63	3,55	10,07	19,20	9,35	9,92	17,33	4,67	0,43	2,23	0,10	3,23
0,063	1,84	4,68	4,52	3,82	0,38	1,22	4,19	9,03	1,94	2,17	6,00	1,59	0,43	0,67	0,10	0,98

Annexe 2 : Granulométrie des matériaux naturels

Ouverture (mm)	Passant cumulé (%)															
	NM 0/20	NMM1	NMP1	NMG1	NM 10/20	NMM2a	NMM2b	NMM2c	NMP2a	NMP2b	NMP2c	NMG2	NM 6/10	NMG3	NM 10/14	NMG4
25	100,00	100,00	100,00	100,00	99,56	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
22,5	100,00	100,00	100,00	100,00	99,56	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
20	98,94	100,00	100,00	100,00	96,30	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
16	88,60	100,00	100,00	100,00	81,33	96,58	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
14	76,67	100,00	100,00	99,74	61,96	91,29	100,00	100,00	98,97	99,71	100,00	99,79	100,00	100,00	99,63	99,72
12,5	57,59	99,85	99,82	99,26	43,08	82,90	100,00	100,00	97,12	99,43	100,00	99,18	100,00	100,00	63,95	98,38
10	40,02	98,48	98,07	96,24	10,06	51,86	98,90	100,00	90,77	97,37	100,00	95,77	99,03	100,00	5,18	92,65
8	30,29	92,08	94,99	89,22	2,81	34,36	89,79	100,00	82,64	93,13	100,00	85,00	57,06	94,23	0,35	82,15
6,3	23,74	73,59	89,05	74,29	0,76	25,62	68,28	100,00	73,57	85,63	99,71	62,38	7,35	63,14	0,17	59,63
5	19,05	60,10	81,68	57,90	0,34	19,50	54,88	98,44	63,35	76,82	98,82	45,30	0,75	43,36	0,13	40,01
3,15	14,62	47,83	68,69	44,31	0,23	14,03	42,98	82,14	50,10	61,32	93,51	28,04	0,51	25,81	0,13	25,82
2	10,47	37,80	53,18	32,13	0,23	9,71	34,05	56,40	37,34	45,72	80,39	18,10	0,45	15,01	0,13	16,69
1,6	9,03	33,96	46,35	27,90	0,23	8,30	30,38	50,08	32,34	39,53	72,67	15,04	0,43	11,80	0,13	13,74
1	6,83	27,37	35,52	21,24	0,23	6,17	24,28	40,81	24,44	29,57	58,42	10,57	0,41	7,64	0,13	9,71
0,5	4,86	20,18	23,99	14,97	0,23	4,26	17,55	31,10	16,20	19,80	41,01	6,97	0,37	4,47	0,13	6,41
0,315	4,03	16,74	18,78	12,33	0,23	3,47	14,40	26,46	12,48	15,45	32,78	5,56	0,36	3,39	0,13	5,10
0,2	3,36	13,86	14,43	10,22	0,23	2,87	11,83	22,40	9,40	11,98	25,78	4,48	0,34	2,61	0,13	4,09
0,063	1,66	6,85	5,00	4,94	0,23	1,51	5,89	11,81	2,73	3,99	9,55	2,06	0,31	1,12	0,13	1,95

Annexe 3 : Granulométrie laser sur les fractions inférieures à 63 µm

Ouverture (µm)	Passant (%)						
	RM 0/20	RMM2b	RMP2b	RMG2	NMM2b	NMP2b	NMG2
549,541	99,98	100,00	100,00	100,00	100,04	100,00	99,67
478,630	99,98	100,00	99,98	100,00	100,04	100,00	99,67
416,869	99,97	100,00	99,91	100,00	100,04	100,00	99,67
363,078	99,91	100,00	99,76	100,00	100,04	100,00	99,67
316,228	99,80	100,00	99,54	100,00	100,04	100,00	99,67
275,423	99,62	100,00	99,16	100,00	100,04	100,00	99,67
239,883	99,41	100,00	98,71	100,00	100,04	99,97	99,67
208,930	99,18	100,00	98,26	100,00	100,04	99,90	99,67
181,970	98,97	100,00	97,90	100,00	100,04	99,84	99,67
158,489	98,82	100,00	97,65	100,00	100,04	99,80	99,67
138,038	98,73	100,00	97,46	100,00	100,04	99,79	99,67
120,226	98,66	100,00	97,19	100,00	100,04	99,68	99,59
104,713	98,49	99,94	96,63	99,86	99,98	99,10	99,14
91,201	98,07	99,62	95,50	98,99	99,59	97,75	97,84
79,433	97,21	98,68	93,53	97,22	98,58	95,34	95,58
69,183	95,68	96,97	90,49	94,22	96,79	91,68	92,13
60,256	93,27	94,28	86,28	89,89	94,06	86,74	87,49
52,481	89,83	90,54	80,92	84,23	90,35	80,65	81,76
45,709	85,33	85,77	74,61	77,47	85,72	73,72	75,53
39,811	79,85	80,15	67,67	69,94	80,35	66,32	68,47
34,674	73,57	73,92	60,46	62,08	74,46	58,89	61,29
30,200	66,78	67,40	53,36	54,35	68,32	51,79	54,35
26,303	59,80	60,89	46,69	47,12	62,20	45,29	47,91
22,909	52,97	54,64	40,66	40,68	56,28	39,54	42,15
19,953	46,55	48,87	35,36	35,17	50,79	34,58	37,13
17,378	40,75	43,68	30,83	30,61	45,78	30,35	32,85
15,136	35,68	39,10	26,99	26,93	41,30	26,78	29,22
13,183	31,35	35,13	23,77	23,98	37,32	23,74	26,15
11,482	27,72	31,68	21,04	21,61	33,82	21,13	23,54

10,000	24,69	28,67	18,70	19,65	30,72	18,86	21,28
8,710	22,14	26,01	16,67	17,98	27,94	16,86	19,28
7,586	19,93	23,60	14,87	16,48	25,42	15,07	17,48
6,607	17,99	21,38	13,25	15,08	23,10	13,48	15,83
5,754	16,21	19,31	11,79	13,76	20,93	12,05	14,32
5,012	14,57	17,36	10,48	12,50	18,90	10,77	12,91
4,365	13,04	15,53	9,29	11,30	16,99	9,62	11,60
3,802	11,62	13,82	8,24	10,17	15,18	8,58	10,38
3,311	10,31	12,23	7,30	9,10	13,47	7,63	9,24
2,884	9,11	10,77	6,46	8,10	11,86	6,75	8,15
2,512	8,01	9,43	5,70	7,16	10,32	5,92	7,12
2,188	7,01	8,21	5,02	6,28	8,87	5,12	6,13
1,905	6,09	7,09	4,39	5,46	7,51	4,35	5,19
1,660	5,26	6,07	3,81	4,69	6,23	3,61	4,30
1,445	4,49	5,14	3,26	3,97	5,07	2,91	3,47
1,259	3,79	4,30	2,73	3,31	4,01	2,27	2,72
1,096	3,15	3,54	2,21	2,71	3,08	1,69	2,05
0,955	2,58	2,86	1,72	2,17	2,28	1,20	1,47
0,832	2,06	2,27	1,26	1,70	1,61	0,78	1,00
0,724	1,61	1,74	0,84	1,29	1,07	0,46	0,62
0,631	1,22	1,30	0,50	0,94	0,65	0,22	0,34
0,550	0,88	0,93	0,24	0,65	0,34	0,07	0,15
0,479	0,60	0,62	0,09	0,41	0,13	0,00	0,04
0,417	0,38	0,38	0,05	0,23	0,00	0,00	0,00
0,363	0,21	0,20	0,02	0,10	0,00	0,00	0,00
0,316	0,09	0,08	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
0,275	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,240	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00