



**RECYBETON**

**Projet National de recherche et développement**

## **RAPPORT DE RECHERCHE**

### Thème 2

## Etude de la validité des normes d'essai mécaniques pour les granulats recyclés

**Auteurs :**

**Erwan HAMARD**

**Bogdan CAZACLIU**

**Laboratoire GPEM-IFSTTAR**

R/14/RECY/011  
LC/12/RECY/07  
Septembre 2014

Site internet : [www.pnrecybeton.fr](http://www.pnrecybeton.fr)

Président : Jacques ROUDIER

Directeur : Horacio COLINA

Directeur Scientifique : François DE LARRARD

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



Projet National de recherche et développement

## FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : Etude de la validité des normes d'essai mécaniques pour les granulats recyclés

RAPPORT N° : R/14/RECY/011

DATE D'ETABLISSEMENT : Septembre 2014

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

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

THEME DE RATTACHEMENT : 2

LETTRE DE COMMANDE : LC/12/RECY/07

Site internet : [www.pnrecybeton.fr](http://www.pnrecybeton.fr)

Président : Jacques ROUDIER

Directeur : Horacio COLINA

Directeur Scientifique : François DE LARRARD

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

# Sommaire

Sommaire .....	1
1 Résumé .....	3
2 Introduction .....	4
3 Bibliographie .....	5
4 Description de la campagne expérimentale .....	9
4.1 Matériaux source .....	9
4.2 Méthodologie d'essais d'attrition/abrasion .....	9
4.2.1 Essai Los Angeles .....	9
4.2.2 Essai Micro-Deval .....	9
4.2.3 Essai de malaxage à sec .....	9
4.2.4 Essai de brassage humide .....	10
4.3 Méthodologie d'essais de caractérisation des granulats .....	10
4.3.1 Granulométrie par voie sèche .....	10
4.3.2 Essai d'absorption d'eau .....	11
4.3.3 Mesure d'angularité .....	11
4.4 Plan expérimental .....	11
4.4.1 Essais Los Angeles .....	11
4.4.2 Essais Micro-Deval .....	12
4.4.3 Essais de malaxage à sec .....	12
4.4.4 Essais de brassage humide .....	13
5 Résultats .....	14
5.1 Essais de résistance à la fragmentation .....	14
5.1.1 Phase 1 : Essai Los Angeles avec suivi d'échantillon .....	14
5.2 Phase 2 : Etude des fractions granulaires produites lors des essais de résistance à la fragmentation .....	15
5.3 Essais de résistance à l'usure .....	19
5.3.1 Essai Micro-Deval Sec (MDS) .....	19
5.3.2 Essai Micro-Deval (MDE) .....	20
5.4 Evolution au cours du malaxage à sec .....	25
5.5 Evolution au cours du brassage humide .....	30

5.6	Etude complémentaire : résultats des essais de Los Angeles, Micro-Deval et d'absorption de l'étude du concassage des granulats de béton recyclé .....	34
6	Discussion .....	36
6.1	Teneur en mortier adhérent .....	36
6.2	Essai Los Angeles .....	36
6.3	Essai Micro-Deval.....	40
6.4	Essais de malaxage et de brassage.....	41
7	Conclusion.....	44
	Liste bibliographique.....	45
	Annexe : Bilan des essais .....	46

# 1 Résumé

Cette étude permet d'analyser l'évolution des caractéristiques des granulats de béton recyclé lors des essais de Los Angeles et Micro-Deval, en faisant varier le nombre de rotations de tambours et la taille des granulats, en conditions sèche et humide. Les résultats de ces expérimentations apportent des connaissances sur la validité des procédures d'essais normalisés actuelles, Los Angeles et Micro-Deval, appliquées aux granulats recyclés. Les résultats principaux sont listés ci-dessous :

- le passant à 1,6 mm semble pertinent pour décrire la création d'éléments fins lors des essais Los Angeles et Micro-Deval,
- pour un même béton de démolition, la résistance à la fragmentation du granulat est d'autant plus importante que celui-ci est pauvre en mortier adhérent,
- au cours de l'essai Los Angeles, le granulat de béton recyclé la création d'éléments inférieurs à 1,6 mm est d'abord dépendante du mortier adhérent puis dépendante du granulat naturel d'origine. Deux nouveaux paramètres présentés dans cette étude permettent de décrire ce comportement bi-modal, le « LAm ad » et le « LAg nat » ,
- on peut distinguer deux phases au cours de l'usure des granulats de béton recyclé pendant l'essai Micro-Deval : lors de la première phase, comme pour les granulats naturels, les éléments s'émoussent et prennent une forme plus arrondie ; lors de la seconde phase, l'usure du mortier adhérent libère une partie du granulat naturel d'origine jusque-là protégé par le mortier. Le granulat naturel étant plus résistant à l'usure que le mortier, l'usure concerne principalement le mortier adhérent, ce qui a pour effet de libérer le granulat naturel d'origine et modifie la forme des grains, qui, bien qu'émoussés, deviennent plus anguleux,
- on observe un effet de seuil à 6 mm lors de l'essai de Micro-Deval. Les fractions supérieures à 6 mm semblent s'user dans des proportions identiques, alors que les fractions inférieures à 6 mm sont plus sensibles à l'usure,
- l'essai de LA semble représentatif de la création d'éléments inférieurs à 1,6 mm générés par le malaxage à sec pour des sollicitations allant de 0 à 100 cycles de LA, ce qui correspond approximativement à une durée de malaxage allant de 0 à 5 min.
- l'essai Micro-Deval semble représentatif du taux d'éléments inférieurs à 1,6 mm généré lors du brassage humide pour des sollicitations allant de 0 à 12 000 cycles de MDS, ce qui correspond approximativement à des durées de brassage humide allant de 0 à 1 h 30.

## 2 Introduction

Ce rapport présente les résultats et les conclusions de l'étude intitulée « Étude de la validité des normes d'essais mécaniques pour les granulats recyclés » 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 2 du Projet National Recybéton. Un bilan des essais réalisés est disponible en annexe.

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 la construction, font de l'économie des matériaux 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.

Cette étude a pour but d'analyser l'évolution des granulats de béton recyclé lors des essais de Los Angeles et Micro-Deval, en faisant varier le nombre de rotations de tambours et la taille des granulats. De plus, l'étude se propose de commencer à analyser l'évolution des granulats lors de leurs mélanges à sec et humide visant à fournir une comparaison avec le comportement dans les équipements normalisés. Les résultats de ces expérimentations visent à participer à la réflexion sur l'adaptation des procédures d'essais normalisés actuels, Los Angeles et Micro-Deval, aux granulats recyclés.

### 3 Bibliographie

Un granulats de béton recyclé est composé de granulats naturels du béton d'origine (granulat naturel d'origine), sur lequel une quantité plus ou moins importante de mortier de ciment d'origine est attaché (mortier adhérent) [1] [2]. Les bétons incorporant des granulats de bétons recyclés sont appelés béton 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 recyclés une résistance mécanique moindre ainsi qu'une capacité d'absorption d'eau plus élevée que celle des granulats naturels habituellement employés pour la fabrication des bétons [2] [3] [4] [5] [6]. Ulsen *et. al.* [7] 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 recyclés. 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. Il est donc souvent nécessaire d'ajouter du ciment, ce qui entraîne un surcoût non négligeable.

Schreier *et. al.* [8] 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.* [9] proposent une classification des granulats de béton recyclés 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.

Nagataki *et. al.* [1] ont étudié l'évolution de la densité de fissures dans des granulats de béton recyclés expérimentaux au cours d'une série de concassage. Avant concassage, le granulats 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 granulats 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 granulats naturel d'origine, mais ce n'est pas toujours le cas.

Tam et. al. [5] étudient le lien entre la qualité du béton de déconstruction, du granulat de béton recyclé et du béton de granulat recyclé. Dix matériaux prélevés dans différents sites de déconstructions sont réduits par un concasseur à mâchoires en deux fractions 0/10 et 0/20. Ces matériaux sont caractérisés notamment par l'*Aggregate Impact Value* (AIV, % de passant au tamis de 2,36 mm après 15 impacts, BS 812 : part 112). Une partie des résultats est présentée dans le Tableau 1.

Échantillon	Densité (Mg/m <sup>3</sup> )		Absorption (%)		AIV (%)
	0/10	0/20	0/10	0/20	
1	2,16	2,20	5,83	6,89	33
2	2,22	2,14	6,36	6,40	36
3	2,20	2,18	7,50	6,35	31
4	2,20	2,20	6,93	7,25	23
5	2,15	2,19	7,31	6,82	32
6	2,25	2,27	5,20	5,77	25
7	2,11	2,13	8,74	7,30	30
8	2,10	2,12	8,58	7,99	34
9	2,21	2,24	6,94	6,11	36
10	2,20	2,23	6,85	5,95	28

**Tableau 1 : Caractéristiques de 10 granulats de béton recyclé d'après Tam, 2008**

Les auteurs relient 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<sup>-3</sup> alors que la densité d'un granulat naturel est de l'ordre de 2,6 Mg.m<sup>-3</sup>. Plus le granulat de béton recyclé est riche en mortier adhérent, plus la densité est faible, plus la résistance mécanique est faible et plus la capacité d'absorption d'eau est élevée. Les auteurs constatent également que plus la taille des granulats du béton d'origine est faible, plus le granulat produit à partir de ces bétons de démolition est riche en mortier de ciment.

Beredjem et Arabi [10] étudient l'emploi de béton recyclé dans le béton. Ils mesurent les caractéristiques des granulats naturels et recyclés utilisés dans cette étude (Tableau 2).

Fraction	MDE		LA	
	Naturel	Recyclé	Naturel	Recyclé
4/6,3	18,40	36,50	-	-
6,3/10	24,04	38,60	31,40	38,88
10/14	-	-	30,58	36,52

**Tableau 2 : Caractéristiques des granulats employés dans l'étude de Berredjem et Arabi (2009)**

De Juan et Gutiérrez [6] ont réalisé le suivi de la production d'une plateforme de retraitement de béton recyclé pendant une année et collecté 15 échantillons. Pour chacune des fractions granulaires produites ont été mesurés le taux de mortier adhérent (par répétition de phases de chauffage du matériau humide), la masse volumique apparente (EN 1097-6), la masse volumique réelle saturée surface sèche (EN 1097-6), le coefficient d'absorption d'eau (EN 1097-6) et le coefficient de Los Angeles (EN 1097-2) (Tableau 3).

Échantillon	Teneur en mortier adhérent (%)		Masse volumique apparente (kg/dm <sup>3</sup> )		Masse volumique réelle saturée surface sèche (kg/dm <sup>3</sup> )		Coefficient d'absorption d'eau (%)		Los Angeles	
	"4/8"	"8/16"	"4/8"	"8/16"	"4/8"	"8/16"	"4/8"	"8/16"	"4/8"	"8/16"
1	46	36	-	-	2,37	2,43	7,0	4,6	37	-
2	45	39	2,24	2,33	2,40	2,45	7,5	5,1	38	-
3	43	42	2,30	2,29	2,42	2,41	5,1	5,2	40	-
4	33	25	2,21	2,37	2,37	2,47	7,1	4,2	35	-
5	45	31	2,14	2,27	2,32	2,40	8,4	5,8	39	-
6	44	32	2,18	2,29	2,34	2,42	7,5	5,3	37	-
7	44	26	2,16	2,34	2,33	2,45	8,3	4,9	39	-
8	44	23	2,04	2,28	2,26	2,41	11,0	5,8	40	-
9	46	44	2,05	2,22	2,24	2,36	9,9	6,3	42	-
10	55	40	2,01	2,14	2,25	2,33	11,5	8,8	41	-
11	54	40	2,03	2,22	2,33	2,37	10,8	6,9	41	-
12	39	31	2,16	2,29	2,32	2,41	7,9	5,3	38	-
13	36	26	2,14	2,27	2,31	2,40	8,3	5,9	38	-
14	37	39	2,14	2,26	2,30	2,39	8,7	5,3	36	-
15	-	-	2,09	2,18	-	2,35	9,7	7,5	42	-

**Tableau 3 : Caractéristiques des granulats de béton recyclés de l'étude de de Juan et Gutiérrez (2009)**

Selon les auteurs, lors de l'essai Los Angeles, l'intégralité du mortier adhérent est réduite en poudre. La teneur en mortier adhérent influence donc le résultat de l'essai Los Angeles. La Figure 1 présente les résultats repris par les auteurs dans la littérature avec ceux obtenus lors de leur étude. Il existe une tendance générale indiquant que plus la teneur en mortier adhérent est importante et plus les valeurs de Los Angeles sont élevées.

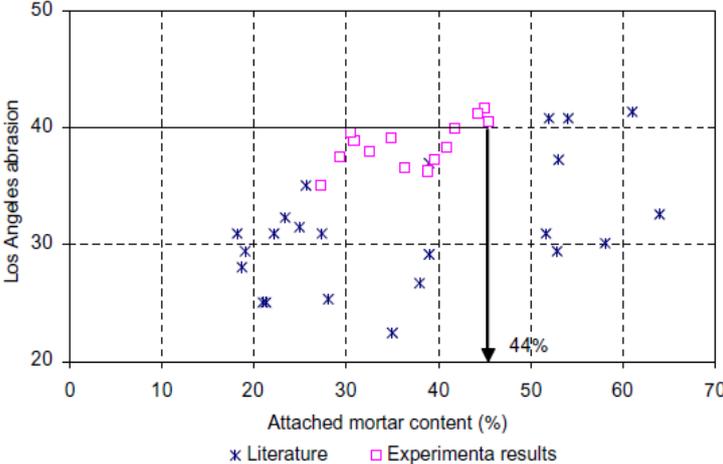


Figure 1 : Relation entre le taux de mortier adhérent et les valeurs de LA des granulats de béton recyclé, d'après de Juan et Gutiérrez (2009)

## 4 Description de la campagne expérimentale

### 4.1 Matériaux source

Les matériaux utilisés dans cette étude sont les granulats de béton recyclés 4/10 et 10/20 fournis par le PN Recybéton. Ces matériaux ont été criblés pour obtenir les fractions granulaires de l'étude : 4/6,3 ; 6,3/10 ; 10/14 ; 14/20. Un matériau naturel, un gneiss, 10/14 est également testé pour servir de référence.

### 4.2 Méthodologie d'essais d'attrition/abrasion

#### 4.2.1 Essai Los Angeles

Les échantillons de 5000 g sont reconstitués selon les modalités décrites dans le Tableau 4, conformément à la norme NF EN 1097-2. Onze boulets conformes à la norme NF EN 1097-2, sont placés dans le tambour avec l'échantillon. L'échantillon est extrait du tambour après avoir subi un certain nombre de cycles, puis tamisé par voie sèche au tamis de 1,6 mm. Pour certains essais, le passant et le refus sont réintroduits dans le tambour pour subir une nouvelle série de cycles. Ces essais sont appelés « Los Angeles avec réutilisation de l'échantillon ».

#### 4.2.2 Essai Micro-Deval

Deux sous-échantillons de 500 g reconstitués selon les fractions décrites dans le Tableau 4, conformément à la norme NF EN 1097-1, sont introduits dans des jarres avec 2,5 L d'eau et 5000 g de billes d'acier, conformément à la norme NF EN 1097-1.

Fraction reconstituée	Fraction à 35 %	Fraction à 65 %
4/6,3 mm	4/5	5/6,3
6,3/10 mm	6,3/8	8/10
10/14 mm	12,5/14	10/12,5
14/20 mm	14/16	16/20

Tableau 4 : Fractions reconstituées utilisées pour les essais Los Angeles et Micro-Deval

#### 4.2.3 Essai de malaxage à sec

Le malaxage à sec est réalisé dans un malaxeur planétaire de marque Skako (VSM 30L 1A-1) dont la vitesse de rotation est de 34 tr.min<sup>-1</sup> (Figure 2). Un unique échantillon de 12 kg de chaque fraction granulaire est testé à un certain nombre temps de malaxage, tamisé par voie sèche puis réintroduit dans le malaxeur pour subir un temps supplémentaire de malaxage. L'objectif des essais de malaxage est de reproduire les sollicitations subies pas les granulats de béton recyclé lors du malaxage en centrale à béton et de suivre leur évolution.



Figure 2 : malaxeur employé dans la partie d'étude du malaxage

#### 4.2.4 Essai de brassage humide

Le brassage humide est réalisé dans une bétonnière de chantier (Figure 3), dont la vitesse de rotation est de  $25 \text{ tr.min}^{-1}$ , sur des échantillons de 12 kg de granulats (une seule fraction granulaire) et 12 L d'eau. Plusieurs temps de brassage sont fixés, à chaque temps de brassage correspondant un échantillon différent. L'objectif des essais de brassage est de reproduire les sollicitations subies par le granulat recyclé lors du transport en toupies et de suivre son évolution.



Figure 3 : Bétonnière employée pour la partie brassage de l'étude, à l'arrêt (à gauche) et en cours de brassage (à droite)

### 4.3 Méthodologie d'essais de caractérisation des granulats

#### 4.3.1 Granulométrie par voie sèche

La granulométrie par voie sèche est réalisée conformément à la norme NF EN 933-1. Cependant, afin de ne pas altérer le matériau recyclé, l'échantillon n'a pas été lavé. L'essai granulométrique sur MDE et sur brassage humide est réalisé sur l'échantillon après séchage puis refroidissement à l'air libre pendant 3 à 4 h, afin de se placer dans des conditions similaires à celles des pesées réalisées lors de la préparation des échantillons.

### **4.3.2 Essai 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.

### **4.3.3 Mesure d'angularité**

La mesure d'angularité est réalisée au Vidéogranulomètre (VDG 40). Pour des raisons de justesse des résultats, seul les refus à 8 mm ont été gardés pour l'essai.

## **4.4 Plan expérimental**

### **4.4.1 Essais Los Angeles**

Une première phase a consisté à réaliser le suivi de l'évolution des passants à 1,6 mm des granulats en fonction du nombre de cycles en réalisant des essais avec réutilisation des échantillons. Les fractions testées sont les 4/6,3, 6,3/10, 10/14 et 14/20, ainsi qu'un échantillon de granulats naturels 10/14. Le nombre des cycles est de 25, 50, 100, 150, 200, 300, **500**, 750, 1000, 1500, 2000 et 3000 tours. Un essai supplémentaire à 5000 tours est réalisé pour les fractions 10/14, 14/20 de recyclé. Nous rappelons que le nombre de cycles normatifs pour l'essai Los Angeles est de 500.

Suite à cette première phase nous avons identifié les nombres de cycles ainsi que les fractions granulaires jugées pertinentes pour clarifier les phénomènes en jeu au cours de l'essai. Nous avons réalisé des nouveaux essais sans réutilisation d'échantillons pour :

- les classes granulaires 4/6,3 et 10/14 mm.
- le nombre de cycles 100, 300, 500 1000 et 2000.

Chaque échantillon est testé de manière plus approfondie, en réalisant une granulométrie par voie sèche. Les échantillons produits à partir de la fraction 10/14 de la deuxième phase sont séparés en fractions granulaires élémentaires 4/6,3, 6,3/10 et 10/14 mm. Les absorptions à 2 heures de trempage dans l'eau de chaque fraction élémentaire sont mesurées. Le détail des essais est présenté dans la Figure 4.

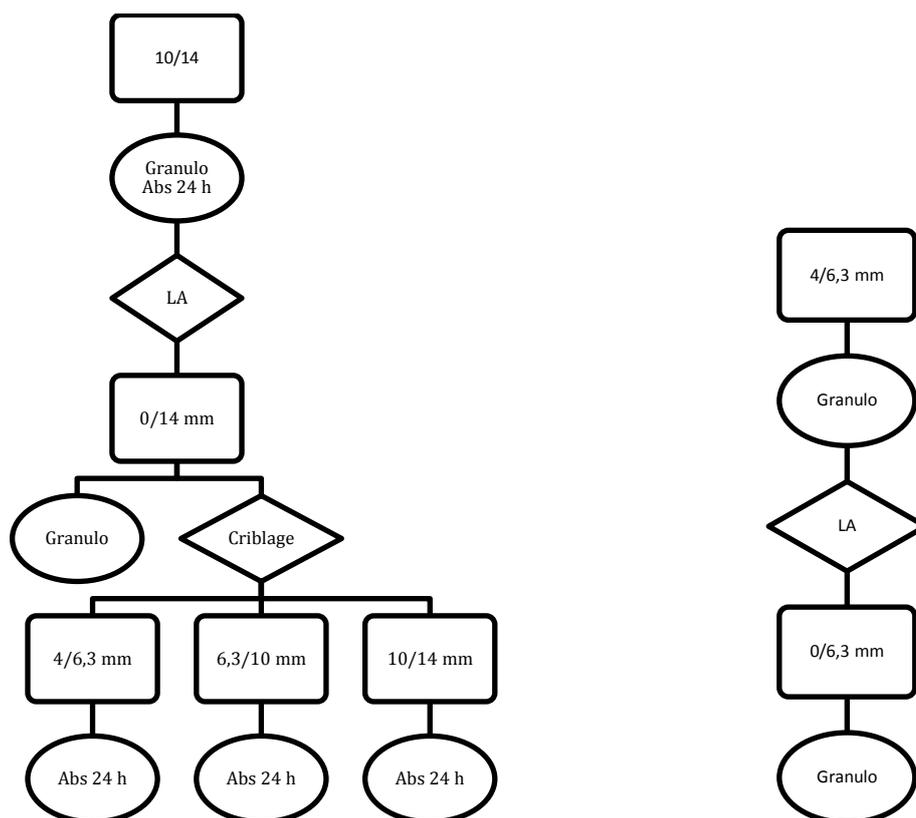


Figure 4 : Détail des essais réalisés lors de la deuxième phase de l'étude de l'essai Los Angeles pour la fraction 10/14 à gauche et la fraction 4/6,3 mm à droite

#### 4.4.2 Essais Micro-Deval

Les fractions du granulat de béton recyclé testées sont 4/6,3, 6,3/10, 10/14 et 14/20 mm, ainsi que l'échantillon de granulats naturels 10/14. Les matériaux sont testés à 500, 1000, 2000, 3000, 5000, 7500, 10000, 12000, 15000, **20000** et 40000 tours. Nous rappelons que le nombre de cycles normatifs pour l'essai Micro-Deval est 20000.

Nous avons analysé de manière plus approfondie les échantillons des essais des classes granulaires 4/6,3 et 10/14 mm à 1000, 3000, 5000, 7500, 12000 et 20000 cycles. Un essai supplémentaire à 100000 cycles est réalisé sur la fraction 10/14. Cette analyse plus approfondie consiste en une granulométrie par voie sèche et une mesure d'angularité sur la fraction 8/14 mm des échantillons produits après essai MDE de la fraction 10/14.

#### 4.4.3 Essais de malaxage à sec

Ces essais sont réalisés sur les fractions 10/14 et 14/20 mm à 10, 40, 60, 120, 300, 600, 900 et 1800 s. La granularité de chaque échantillon est mesurée après essai. L'absorption à 24 h au pycnomètre est mesurée pour les produits du malaxage de la fraction 10/14 sur les fractions élémentaires 4/6,3 mm, 6,3/10 mm et 10/14 mm à 120, 300 et 1800 s.

#### **4.4.4 Essais de brassage humide**

Ces essais sont réalisés sur les fractions 10/14 et 14/20 mm à 5, 10, 20, 30, 45, 60 et 90 min. La granularité de chaque échantillon est mesurée après essai. L'absorption à 24 h au pycnomètre est mesurée pour les produits du malaxage de la fraction 10/14 sur les fractions élémentaires 6,3/10 et 10/14 mm à 5 min, 45 min et 90 min. Une granulométrie laser sur le passant à 0,5 mm est réalisée pour le 10/14 brassé pendant 45 min afin d'estimer la granulométrie des fines produites lors du brassage.

## 5 Résultats

### 5.1 Essais de résistance à la fragmentation

#### 5.1.1 Phase 1 : Essai Los Angeles avec suivi d'échantillon

L'évolution des passants à 1,6 mm des différentes fractions subissant un nombre croissant de cycles de Los Angeles sont représentées dans la Figure 5. L'évolution du passant à 1,6 mm de la fraction 10/14 du matériau naturel est linéaire jusqu'à 60 % de passant à 1,6 mm. Au-delà, le passant à 1,6 mm croît de manière « concave » pour tendre vers 100 %. Il semble qu'au-delà de 60 % de passant à 1,6 mm la proportion importante d'éléments fins ait pour effet de protéger les éléments supérieurs à 1,6 mm. Cet artéfact vient biaiser le résultat de l'essai Los Angeles qui ne peut donc être analysé de manière homogène au-delà de cette limite. On retient alors ce seuil de 60 % dans cette étude comme limite de représentativité de l'essai Los Angeles.

La Figure 6 détaille la partie inférieure à 60 % de passant à 1,6 mm de la Figure 5. Des fractions granulaires de granulat de béton recyclé, c'est la fraction 4/6,3 mm qui produit le plus de passant à 1,6 mm (Figure 6). Les fractions 6,3/10 et 10/14 ont des productions d'éléments inférieurs à 1,6 mm relativement proches. Et c'est la fraction 14/20 qui produit le moins de passant à 1,6 mm. Quant au matériau naturel, il produit de l'ordre de 2 fois moins de passant à 1,6 mm que le granulat de béton recyclé (Figure 6).

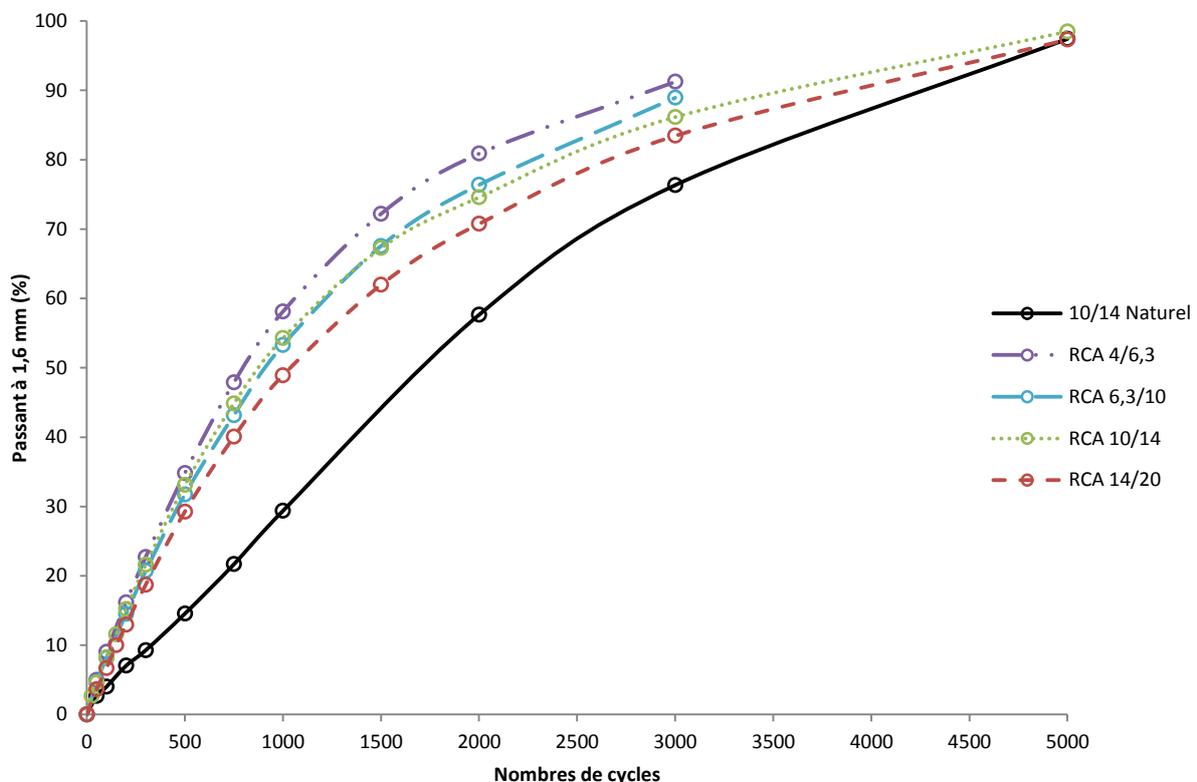


Figure 5 : Evolution du passant à 1,6 mm en fonction du nombre de cycles subis lors de l'essai Los Angeles pour les différentes fractions granulométriques du granulat recyclé (RCA 4/6,3 ; RCA 6,3/10 ; RCA 10/14 ; RCA 14/20) et naturel (10/14 naturel)

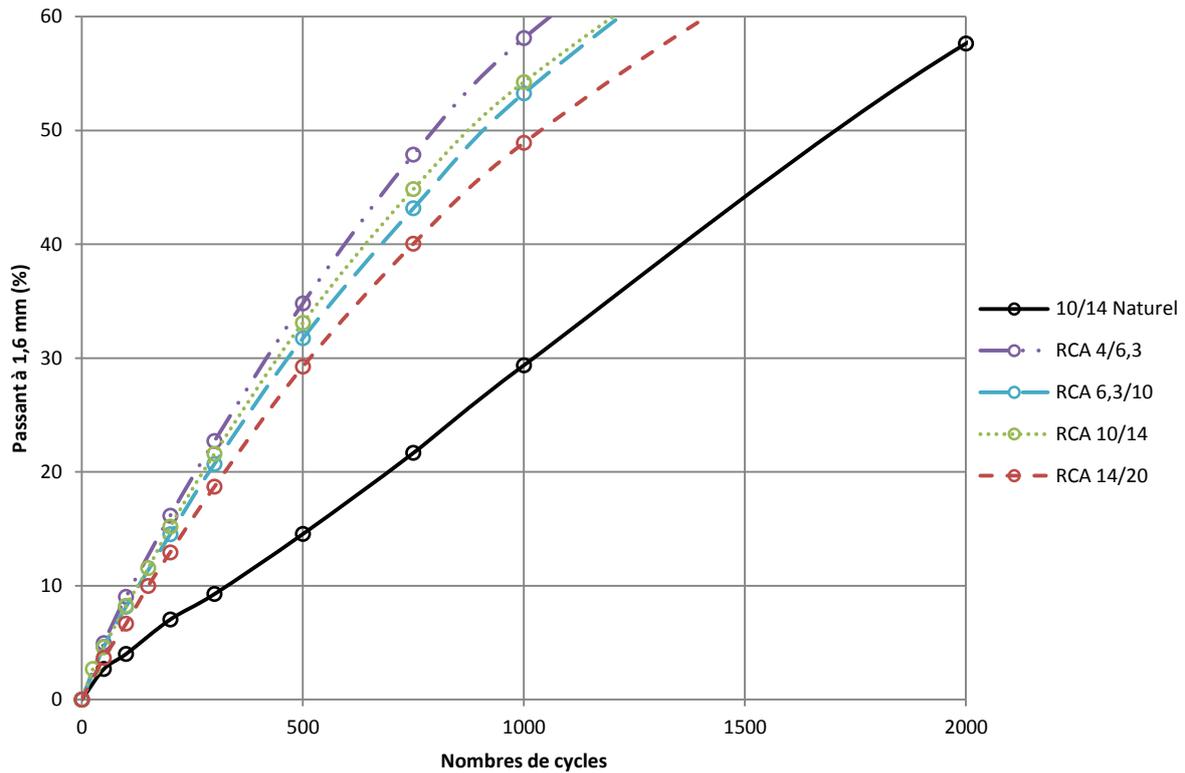


Figure 6 : Evolution du passant à 1,6 mm en fonction du nombre de cycles subis lors de l'essai Los Angeles pour les différentes fractions granulométriques centrée sur le domaine de linéarité du matériau naturel

## 5.2 Phase 2 : Etude des fractions granulaires produites lors des essais de résistance à la fragmentation

Le tamisage ainsi que les mesures d'absorption d'eau à 2 h interdisent le réemploi des échantillons après essais. Pour la phase 2, chaque cycle d'essai Los Angeles correspond donc à un échantillon différent. La Figure 7 compare les passants obtenus lors de la phase 1 (5.1.1) et ceux de la phase 2. Les moyennes des écarts des passants à 1,6 mm sont inférieurs à 6 % pour le 10/14 et inférieurs à 3 % pour le 4/6,3.

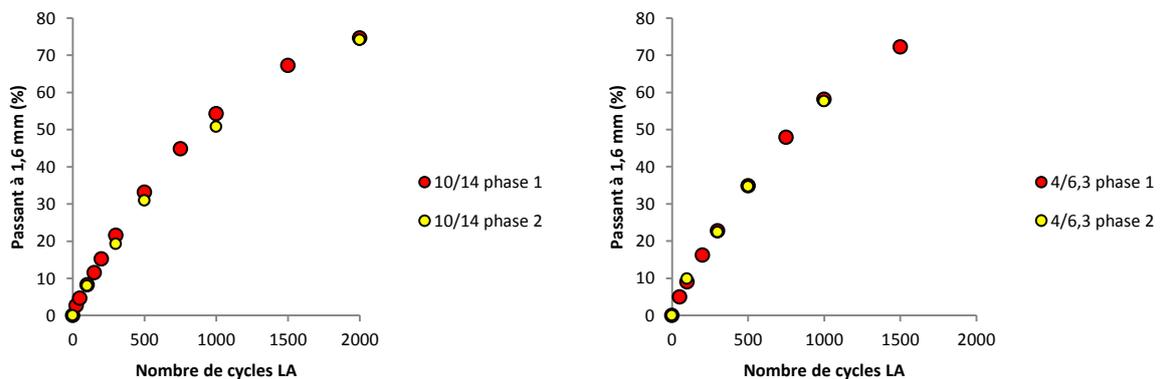
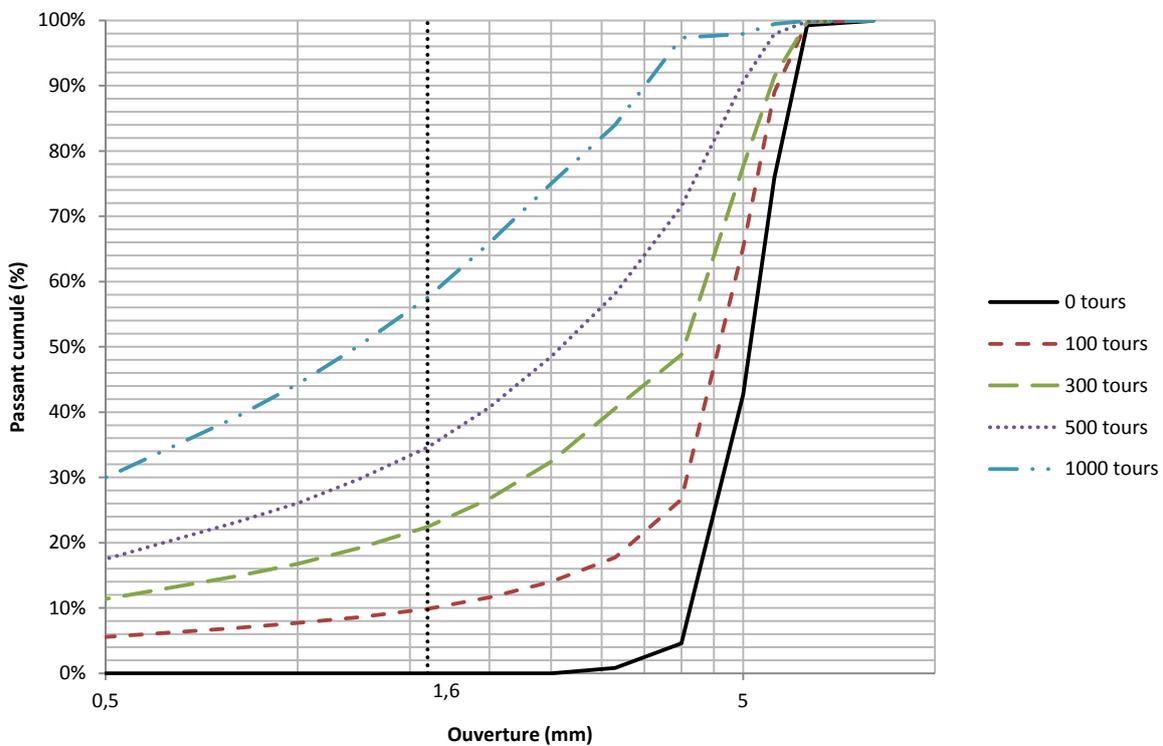


Figure 7 : Comparaison de l'évolution des passants à 1,6 mm lors des essais de Los Angeles pour les phases 1 (avec suivi du même échantillon) et 2 (avec nouvel échantillon à chaque cycle)

L'évolution des granulométries des échantillons d'essai Los Angeles lorsqu'ils subissent différents nombre de cycles, que ce soit pour la fraction 4/6,3 mm (Figure 8) ou pour la fraction 10/14 mm (Figure 10), confirme l'enrichissement régulier des fractions les plus fines.

Afin de mieux visualiser les résultats, les granulométries sont également présentées sous la forme de courbes de fréquence (Figure 9 respectivement Figure 11). 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.



**Figure 8 : Granulométrie du granulat 4/6,3 mm de béton recyclé de départ (0 tour) et des fractions produites après essai Los Angeles à 100, 300, 500 et 1000 cycles.**

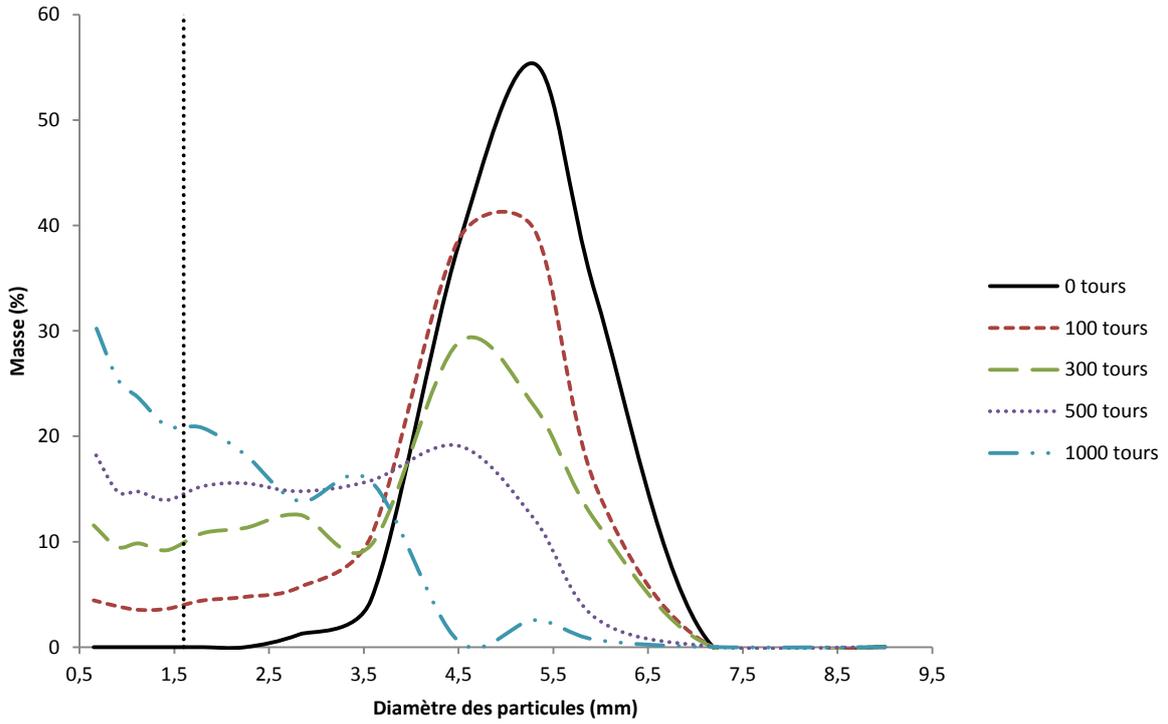


Figure 9 : Fréquence en masse du granulat 4/6,3 mm de béton recyclé de départ (0 tour) et des fractions produites après essai Los Angeles à 100, 300, 500 et 1000 cycles.

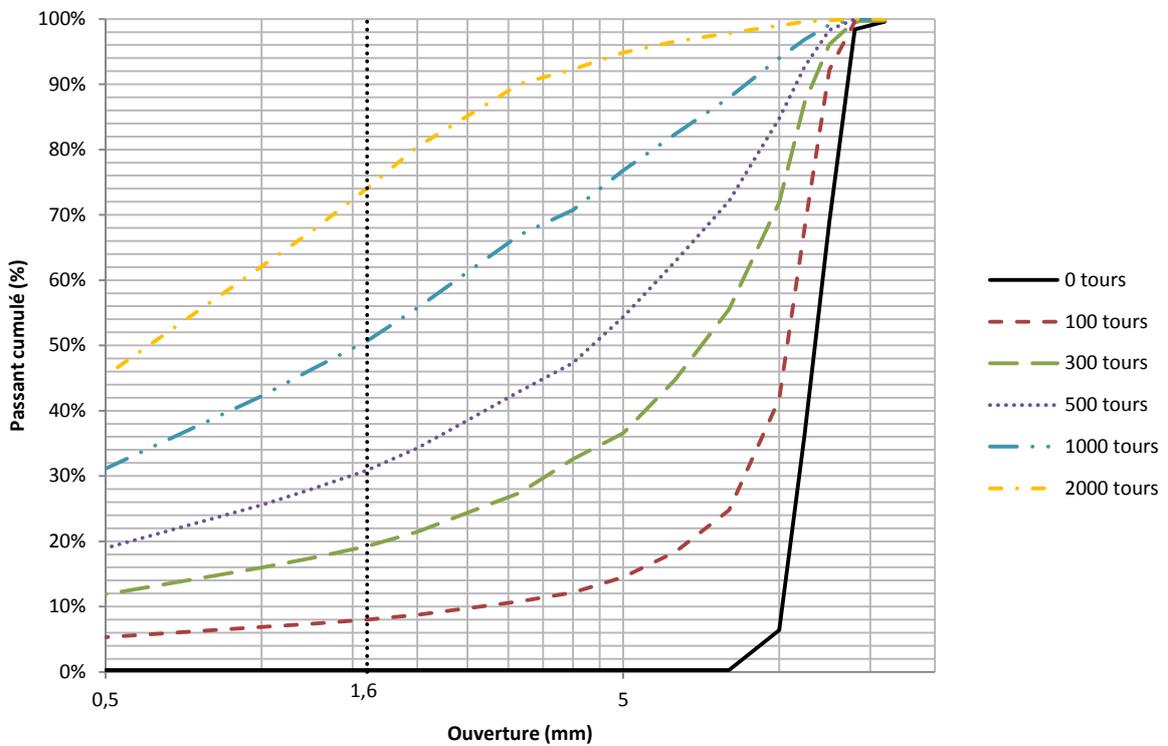


Figure 10 : Granulométrie du granulat 10/14 mm de béton recyclé de départ (0 tour) et des fractions produites après essai Los Angeles à 100, 300, 500, 1000 et 2000 cycles.

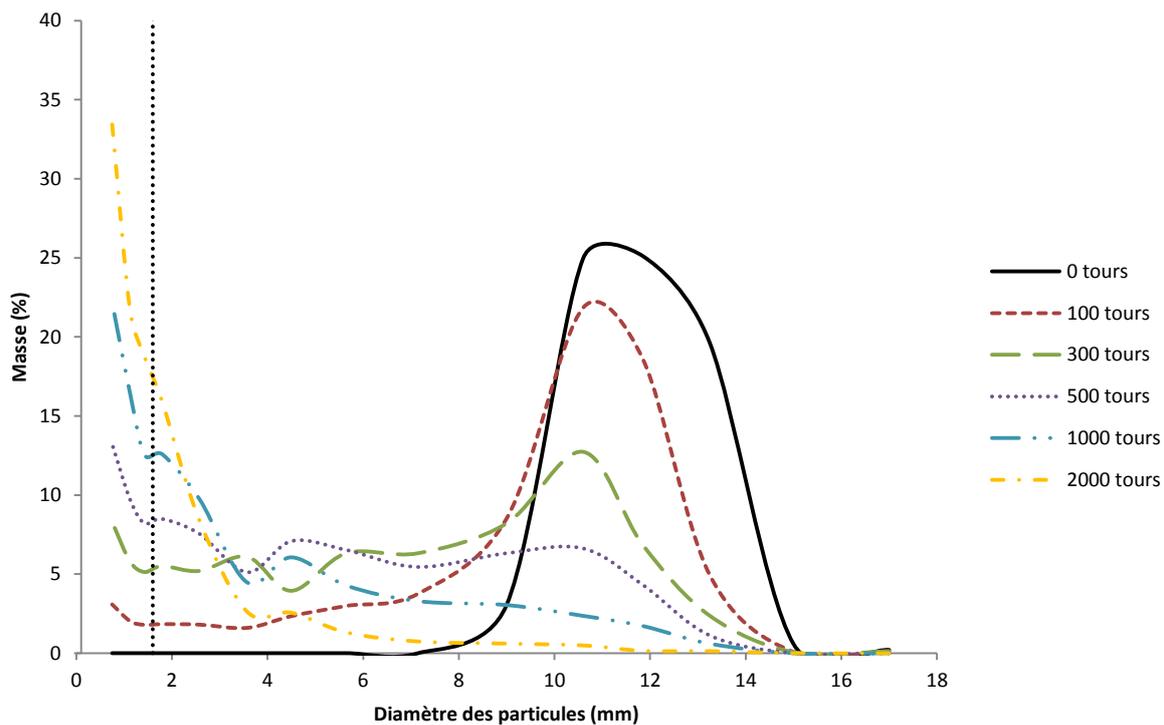


Figure 11 : Fréquence en masse du granulat 10/14 mm de béton recyclé de départ (0 tour) et des fractions produites après essai Los Angeles à 100, 300, 500, 1000 et 2000 cycles.

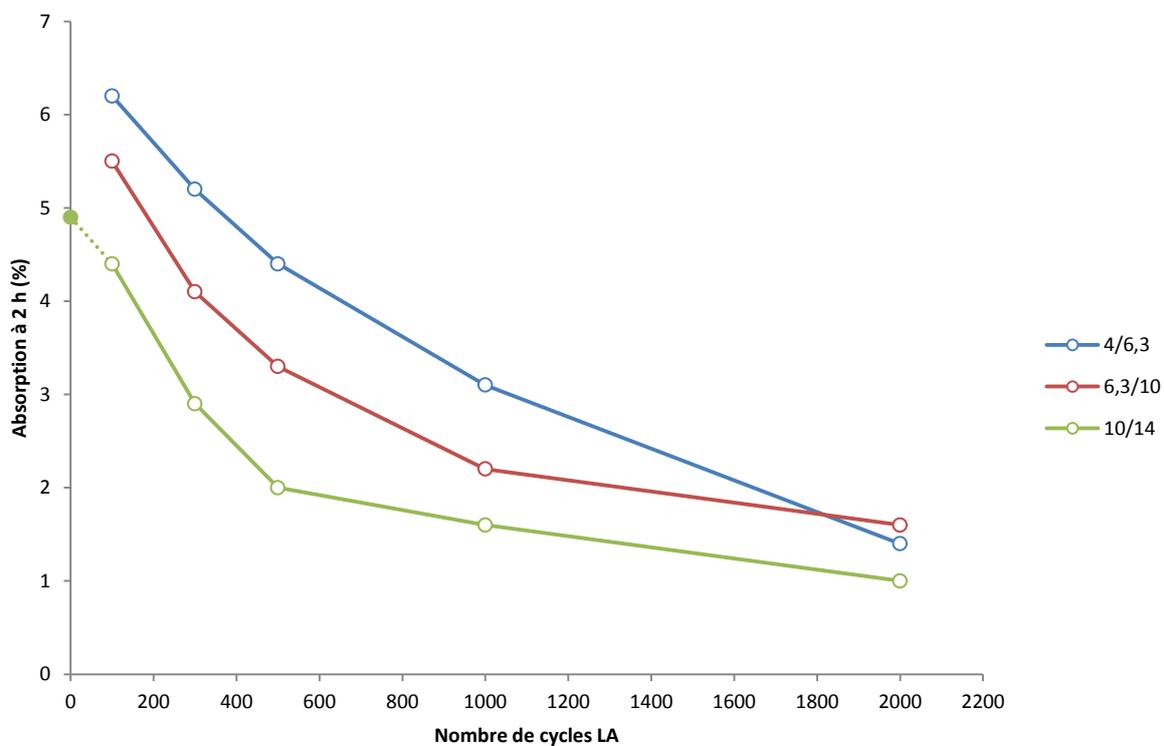


Figure 12 : Absorption à 2 h dans l'eau de la fraction 10/14 mm d'origine (à t = 0) et des 3 fractions produites (4/6,3, 6,3/10 et 10/14) lors des différents cycles (100, 300, 500, 1000 et 2000) de l'essai Los Angeles à partir de la fraction 10/14

Dans la représentation en fréquence (Figure 9), la fraction 4/6,3 mm est caractérisée par un pic unique centré sur le diamètre 5 mm. Au fil des sollicitations, la part d'éléments supérieurs à 4 mm diminue et devient négligeable après 1000 tours. Pour ce qui concerne les éléments compris entre 1,6 et 4 mm, des pics semblent s'esquisser (centré sur 2,7 mm à 300 tours, 3,5 mm à 1000 tours) mais aucun mode ne se dégage clairement (Figure 9). Par contre les passants à 1,6 mm des différents niveaux de sollicitation se détachent nettement les uns des autres. Plus la sollicitation est élevée et plus la fréquence des éléments fins est importante.

Dans la représentation en fréquence (Figure 11), la fraction 10/14 est caractérisée par un pic unique centré sur le diamètre 12 mm. Au fil des sollicitations, la part d'éléments supérieurs à 10 mm diminue et devient négligeable au-delà de 1000 tours. Pour ce qui concerne les éléments compris entre 1,6 et 10 mm, des pics semblent s'esquisser (centré sur 6 et 3,5 mm à 300 tours, 4,5 mm à 500, 1000 et 2000 tours) mais aucun mode ne se dégage clairement (Figure 11). Par contre, comme pour la fraction 4/6,3 mm, on distingue nettement les différents niveaux de sollicitations pour les éléments inférieurs à 1,6 mm. Plus la sollicitation est élevée et plus la fréquence des éléments fins est importante.

L'absorption à 2 h est employée ici comme une estimation de la teneur en mortier adhérent. Plus le granulat est riche en mortier adhérent et plus l'absorption à 2 h est élevée. La Figure 12 présente les résultats de l'absorption à 2 h de la fraction granulaire 10/14 d'origine (à  $t = 0$ ) ainsi que les absorptions du granulat après sollicitations au Los Angeles (100, 300, 500, 1000 et 2000 cycles) coupé en 3 fractions élémentaires (4/6,3, 6,3/10 et 10/14 mm). A 100 cycles, les fractions 4/6,3 et 6,3/10 présentent des absorptions supérieures à celle du 10/14 de départ (à  $t = 0$ ). Seule la fraction 10/14 a une absorption plus faible après 100 cycles. L'absorption de la fraction 4/6,3 est la plus élevée de toutes tandis que la fraction 10/14 a l'absorption la plus faible. Les absorptions des 3 fractions diminuent avec l'intensité des sollicitations de l'essai Los Angeles pour converger vers une absorption de 1 % à 2000 tours (Figure 12).

Les ruptures occasionnées par l'essai Los Angeles sur la fraction 10/14 produisent des éléments plus fins (Figure 11) et d'autant plus riches en mortier adhérent que la fraction est fine (Figure 12).

### **5.3 Essais de résistance à l'usure**

#### **5.3.1 Essai Micro-Deval Sec (MDS)**

L'essai Micro-Deval Sec est réalisé sur 2 sous-échantillons. Le résultat moyen de ces 2 sous-échantillons est présenté pour chaque sollicitation dans la Figure 13. Les passants à 1,6 mm croissent avec le nombre de cycles subis par le granulat et tendent vers un passant à 1,6 mm de l'ordre de 8 %. Cette valeur est notablement basse. L'observation des échantillons en fin de cycle permet de constater qu'au-delà d'un certain seuil de fines produites lors de l'essai, l'action des billes d'aciers sur les granulats devient négligeable. On peut expliquer ce phénomène par une hypothèse : les fines créées ségrègent à l'interface entre les granulats et le tambour assurant un glissement rigide de l'ensemble. A partir d'une certaine teneur en fines il n'y aurait donc plus de cisaillement dans le mélange.

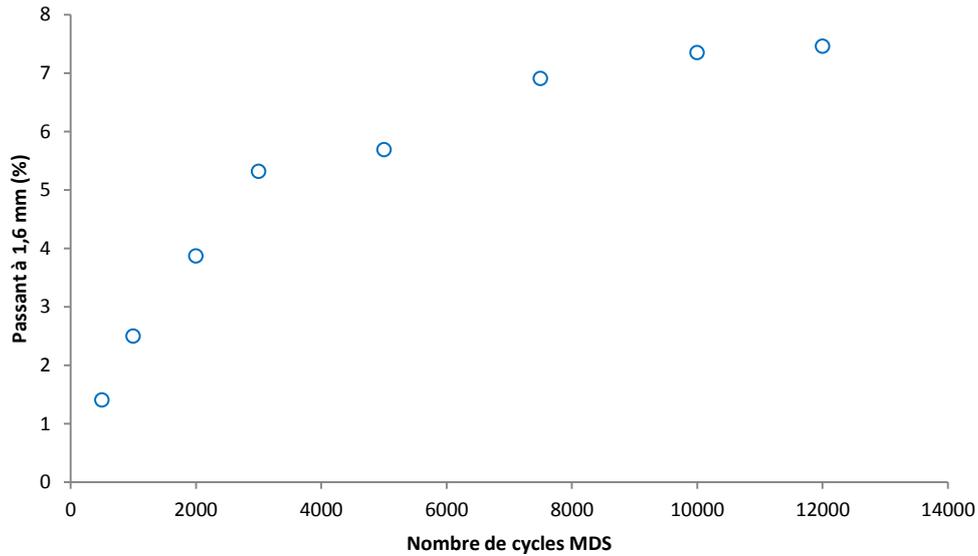


Figure 13 : Evolution du passant à 1,6 mm lors d'un essai de MDS pour un granulat 10/14 de béton recyclé pour 500, 1000, 2000, 3000, 5000, 7500, 10000 et 12000 cycles

### 5.3.2 Essai Micro-Deval (MDE)

Les résultats des essais Micro-Deval réalisés sur différentes fractions du granulat recyclé sont présentés en Figure 14. Chaque résultat est la moyenne des résultats des deux sous-échantillons testés.

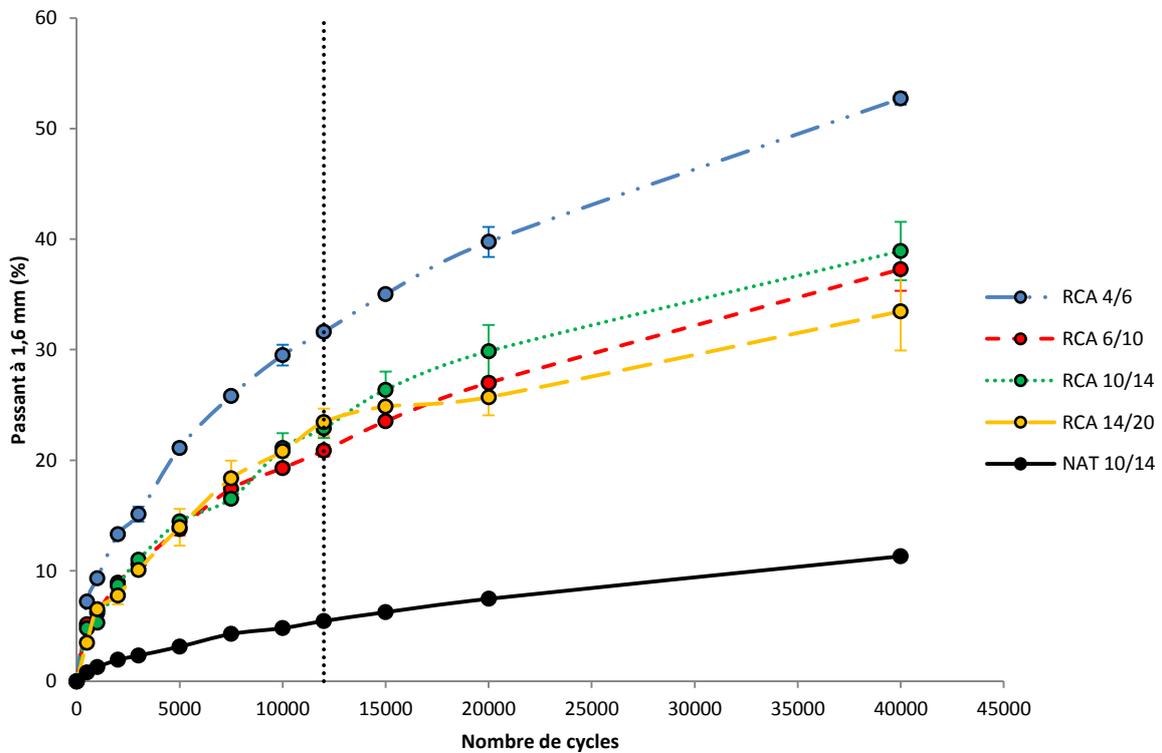
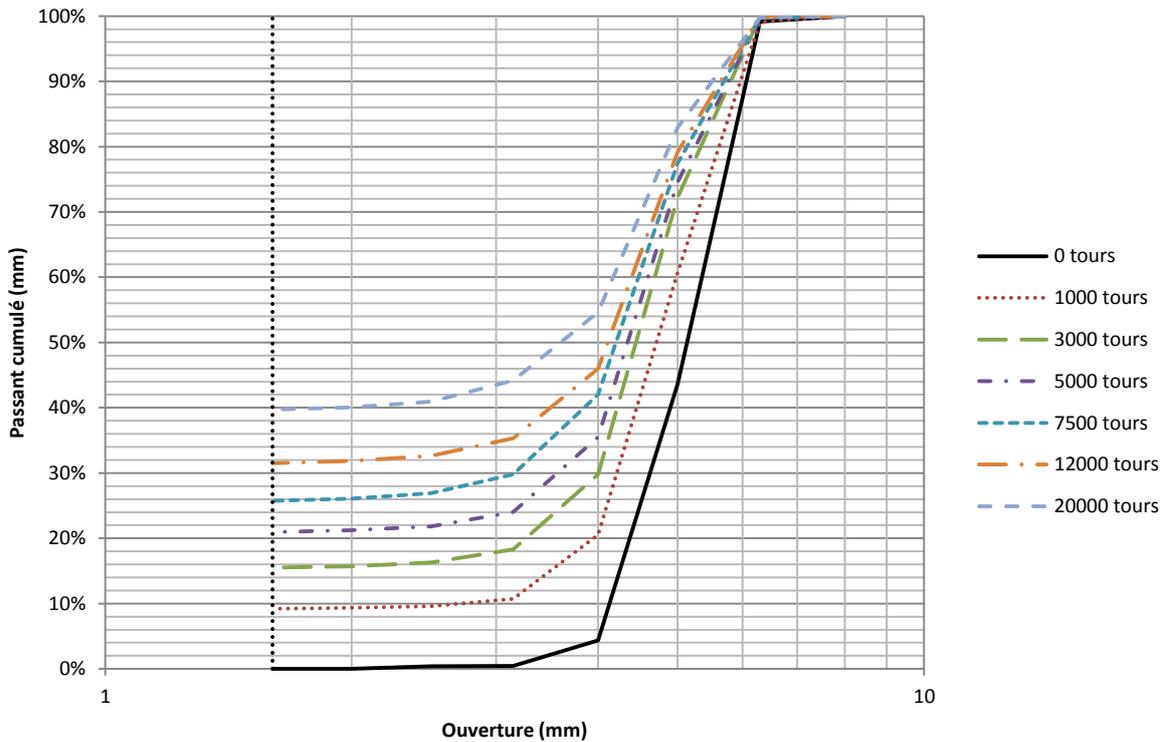


Figure 14 : Comparaison de l'évolution des passants à 1,6 mm lors de l'essai Micro-Deval pour un granulat naturel (NAT 10/14) et pour les fractions du granulat de béton recyclé (RCA 4/6, 6/10, 10/14 et 14/20) à différents intervalles de temps (500, 1000, 2000, 3000, 5000, 7500, 10000, 12000, 15000, 20000, 40000)

L'évolution des passants à 1,6 mm n'est linéaire ni pour les fractions de granulat recyclé ni pour le granulat naturel. Cependant les fractions de granulats recyclés présentent des passants à 1,6 mm environ 5 fois plus élevés que le granulat naturel. La fraction 4/6,3 mm du granulat recyclé se détache nettement des autres fractions de recyclé avec des passants à 1,6 mm plus importants. Par contre, pour les fractions 6/10, 10/14 et 14/20, il n'est pas possible de statuer clairement sur une résistance à l'usure plus importante pour une fraction particulière parmi les trois.



**Figure 15 : Evolution de la granulométrie de la fraction 4/6,3 mm de recyclé en fonction des sollicitations de l'essai Micro-Deval (1000, 3000, 5000, 7500, 12000 et 20000 tours) pour la fraction supérieure à 1,6 mm**

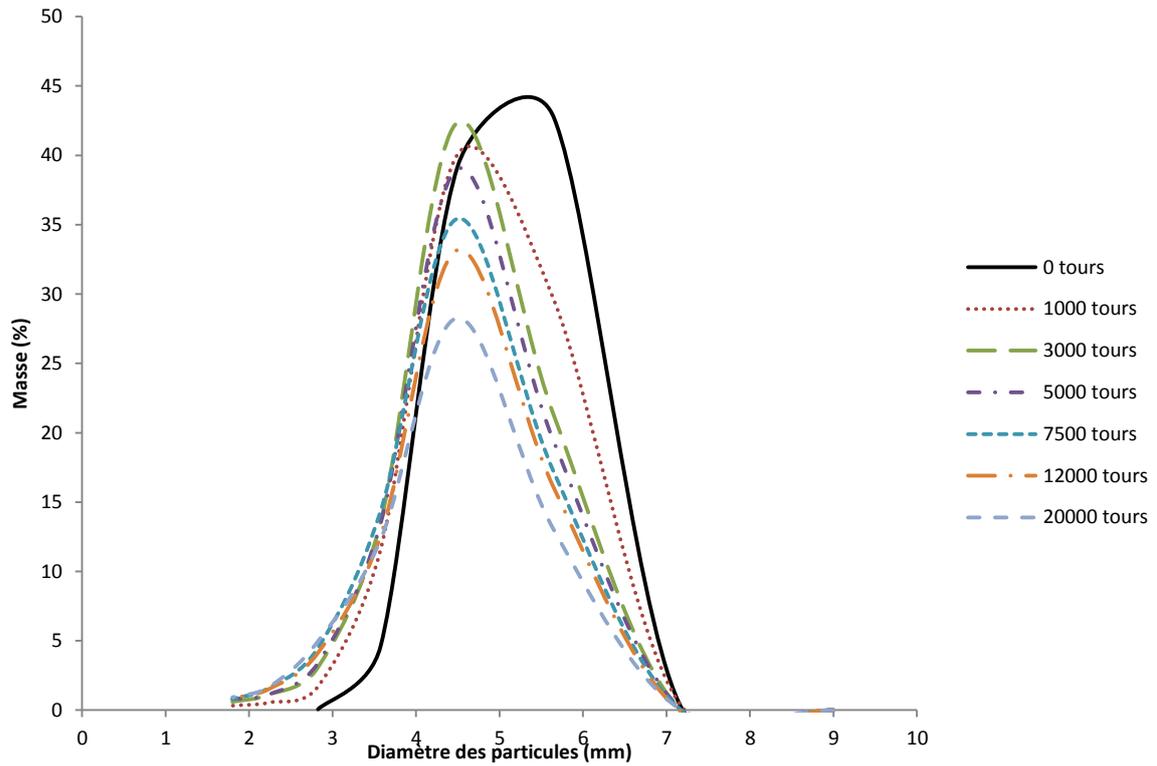


Figure 16 : Fréquence en masse du granulat 4/6,3 mm de béton recyclé de départ (0 tour) et des fractions produites après essai Micro-Deval à 1000, 3000, 5000, 7500, 12000 et 20000 tours pour la fraction supérieure à 1,6 mm

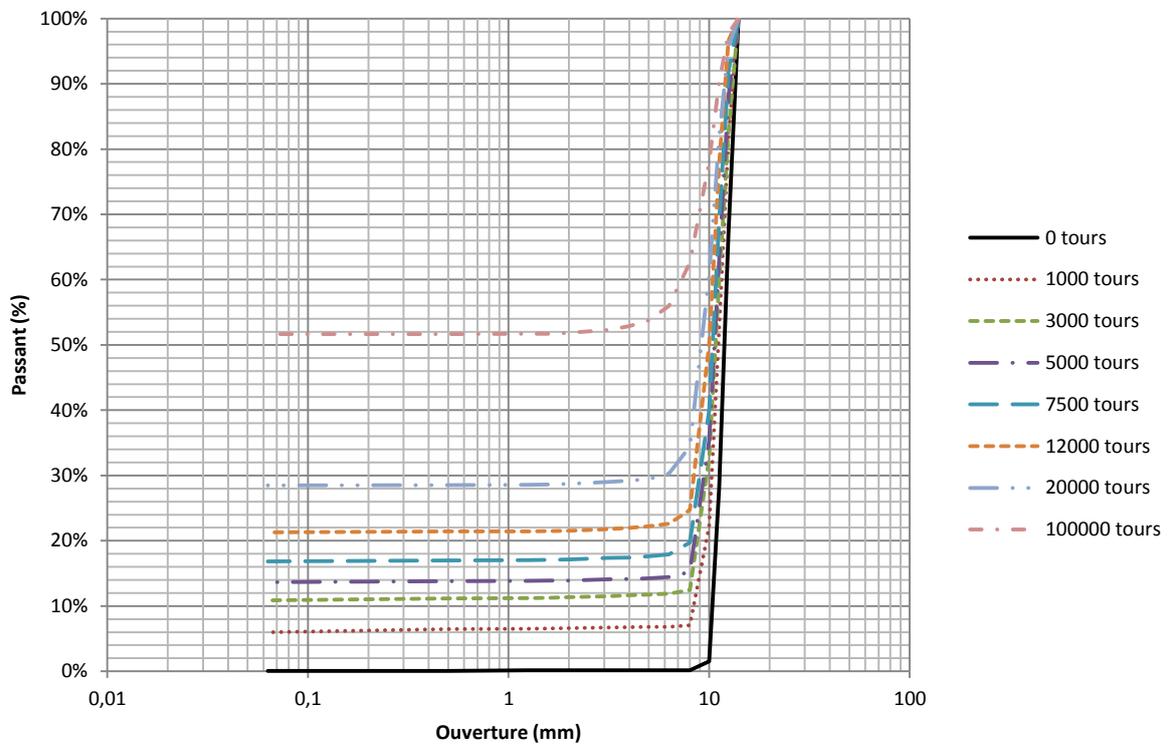
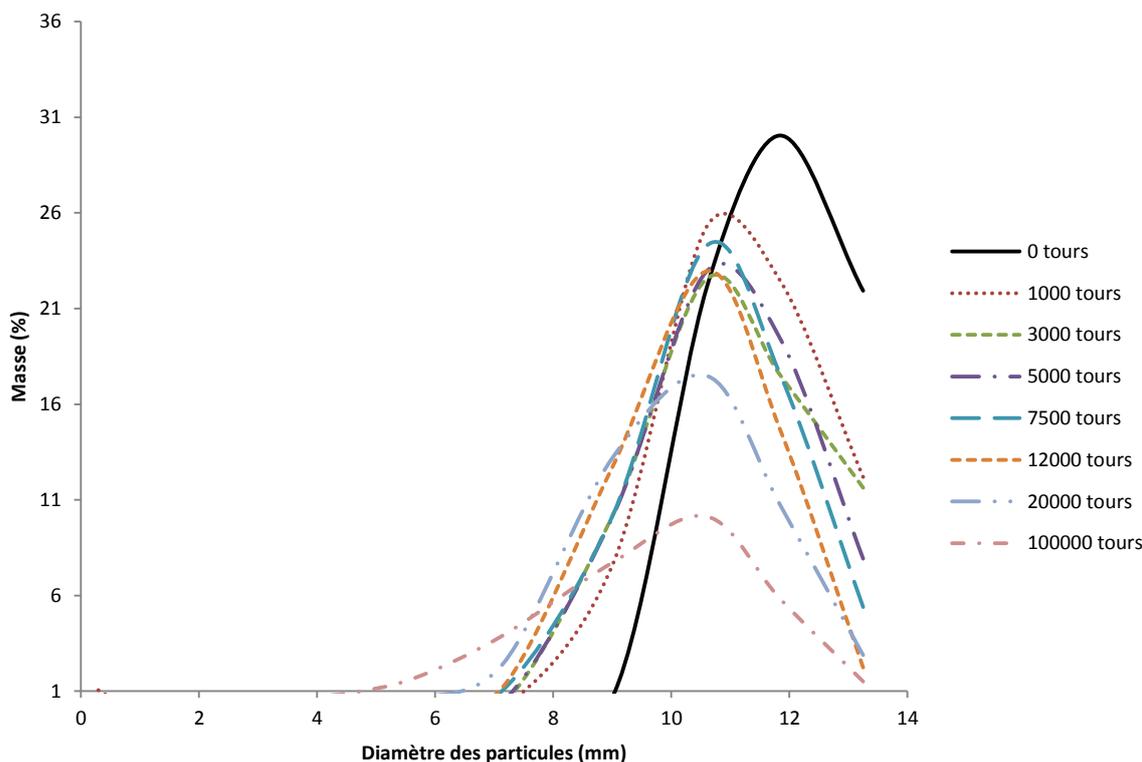


Figure 17 : Evolution de la granulométrie de la fraction 10/14 mm de recyclé en fonction des sollicitations de l'essai Micro-Deval (1000, 3000, 5000, 7500, 12000 et 20000 tours) pour la fraction supérieure à 0,63  $\mu\text{m}$



**Figure 18 : Fréquence en masse du granulat 10/14 mm de béton recyclé de départ (0 tour) et des fractions produites après essai Micro-Deval à 1000, 3000, 5000, 7500, 12000 et 20000 cycles pour la fraction supérieure à 63 µm**

Suite à la comparaison de l'évolution des différentes fractions de recyclé (Figure 14), deux fractions granulaires sont retenues, la 4/6,3 et la 10/14, pour réaliser les granulométries des produits de l'essai Micro-Deval à 1000, 3000, 5000, 7500, 12000 et 20000 tours.

L'évolution des granulométries, aussi bien du 4/6,3 mm (Figure 15) que du 10/14 mm (Figure 17) indiquent que plus la sollicitation subie par le matériau lors de l'essai Micro-Deval est importante et plus la proportion d'éléments fins augmente. L'évolution des passants à 1,6 mm (Figure 15, Figure 17) confirme celle observée précédemment (Figure 14).

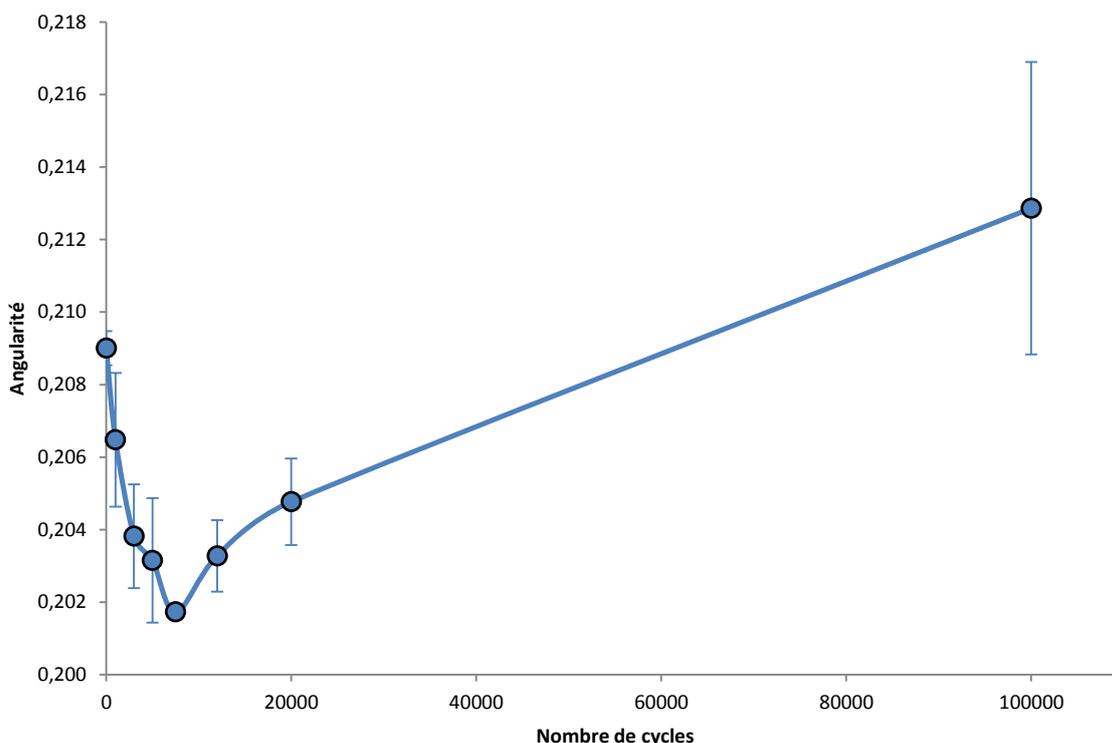
La représentation en fréquence de l'évolution granulométrique de la fraction 4/6,3 mm (Figure 16) indique que le matériau d'origine (0 tour) est caractérisé par un pic centré sur le diamètre 5 mm. Après 3000 tours les pics caractéristiques des produits de l'essai Micro-Deval sont tous centrés sur le diamètre 4,5 mm. Le pic caractéristique obtenu à 1000 tours est intermédiaire entre le matériau d'origine et la famille des matériaux dont les sollicitations sont supérieures à 3000 tours. On constate une réduction de la proportion d'éléments supérieurs à 4 mm et une augmentation des éléments inférieurs à 4 mm avec l'augmentation de la sollicitation (Figure 16).

La diminution du diamètre moyen des matériaux produits après 1000 et 3000 tours est liée au fractionnement des particules. Après 3000 tours, le diamètre moyen reste le même. Les particules subissent alors seulement l'effet d'usure, s'arrondissant en libérant des éléments fins. La présence du sable naturel d'origine dans le béton recyclé peut expliquer que le diamètre moyen des particules produites après 3000 tours soit stable.

La représentation en fréquence de l'évolution granulométrique de la fraction 10/14 mm (Figure 18) indique que le matériau d'origine (0 tour) est caractérisé par un pic centré sur le diamètre 12 mm. Les matériaux produits ont des diamètres moyens qui diminuent progressivement pour tendre vers 10 mm. Cependant cette évolution est peu marquée. Elle s'accompagne d'un appauvrissement en éléments supérieurs à 10 mm et un enrichissement en éléments plus fins (Figure 18).

Le diamètre moyen évolue de manière importante entre 0 et 1000 tours (Figure 18). Ensuite, au-delà de 1000 tours, les granulats s'usent progressivement, ce qui réduit leur diamètre et libère des éléments fins.

L'angularité, mesurée sur la fraction 8/14 des produits de l'essai Micro-Deval de la fraction 10/14 mm, à l'aide du VDG 40 (Figure 19), indique une baisse d'angularité de 0 à 7500 tours, puis une augmentation de l'angularité de 7500 à 100000 tours. Les granulats naturels testés au laboratoire donnent des valeurs d'angularité allant de 0,150 à 0,200, les écarts sont donc jugés significatifs. Les photos des grains avant essai et après essai à 7500 et 100000 tours (Figure 20) permettent de confirmer cette constatation.



**Figure 19 : Evolution de l'angularité, mesuré au VDG 40, de la fraction 8/14 mm du granulat de béton recyclé 10/14 en fonction du nombre de cycles d'essai Micro-Deval**



Figure 20 : Photos des granulats 10/14 avant l'essai Micro-Deval (a) et après 7500 (b) et 100000 (c) tours d'essai Micro-Deval

#### 5.4 Evolution au cours du malaxage à sec

La production d'éléments inférieurs à 1,6 mm, lors du malaxage à sec des fractions 10/14 et 14/20 mm de granulat recyclé, est d'autant plus importante que le temps de malaxage est élevé (Figure 21 et Figure 24).

Le diamètre moyen du matériau 10/14 mm d'origine et des matériaux produits lors du malaxage à 10, 40, 60 et 120 s est centré sur le diamètre 12 mm (Figure 22). A partir de 300 s. ce diamètre moyen diminue pour tendre vers 10 mm à 1800 s. L'évolution du diamètre moyen ( $D_{50}$ ) des échantillons (Figure 23) confirme cette observation. Cette évolution s'accompagne d'une réduction des éléments supérieurs à 10 mm et un enrichissement en éléments plus fins. On constate notamment l'apparition d'un pic centré sur le diamètre 4 mm (Figure 22). Le diamètre moyen du matériau 14/20 mm d'origine et des matériaux produits lors du malaxage à 10, 40, 60 et 120 s est centré sur le diamètre 16 mm (Figure 25). A partir de 300 s ce diamètre moyen diminue pour tendre vers 15 mm à 1800 s. L'évolution du diamètre moyen ( $D_{50}$ ) des échantillons (Figure 26) confirme cette observation. Cette évolution s'accompagne d'une réduction des éléments supérieurs à 14 mm et un enrichissement en éléments plus fins. On constate l'apparition d'un pic centré sur le diamètre 4 mm (Figure 25).

Le pic centré sur 4 mm peut être interprété comme la libération de la fraction sable du granulat naturel d'origine. L'évolution des passants à 1,6 mm au cours de l'essai de malaxage des fractions 10/14 et 14/20 (Figure 27) n'indique pas de différence notable entre ces deux fractions. Par contre les passants à 6,3 mm sont plus élevés pour la fraction 10/14 que pour la fraction 14/20 (Figure 28).

Les essais d'absorption à 24 h réalisés sur les fractions 4/6, 6/10 et 10/14 produites lors du malaxage à sec de la fraction 10/14 (Figure 29) indiquent un taux de mortier adhérent d'autant plus grand que la fraction granulaire est faible ainsi qu'une diminution du taux de mortier adhérent avec des temps de malaxage croissant.

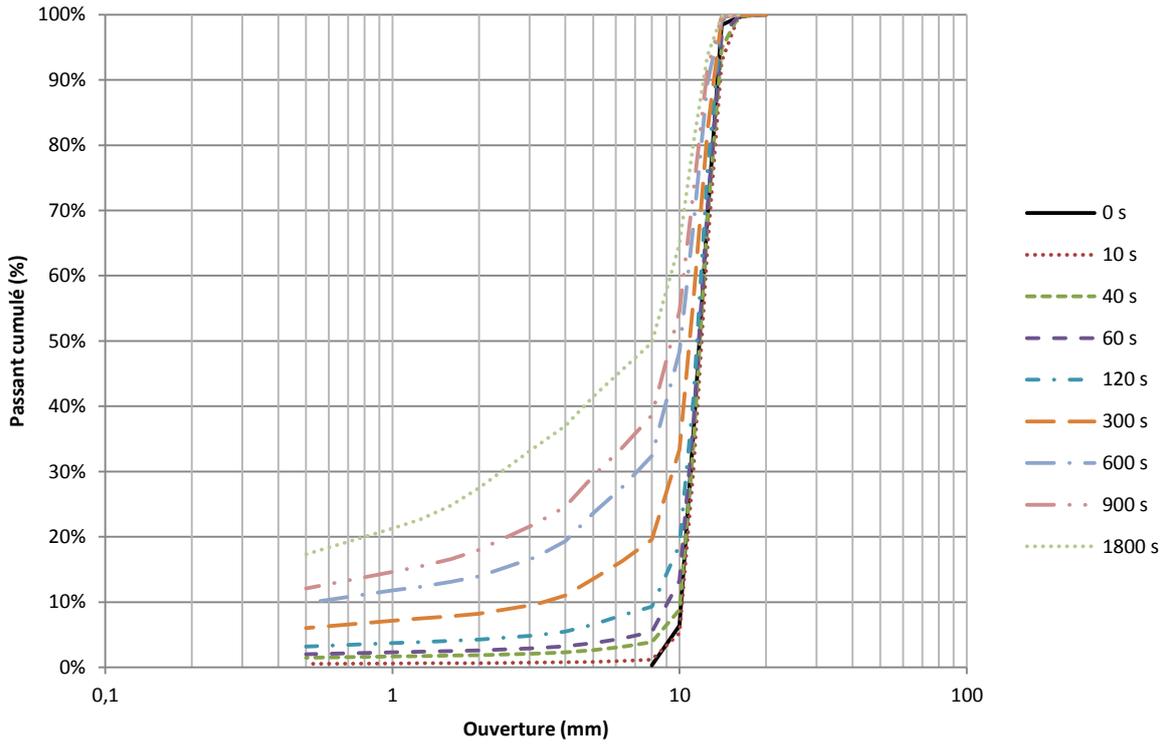


Figure 21 : Evolution des granulométries des échantillons 10/14 de granulat de béton recyclé lors de l'essai de malaxage

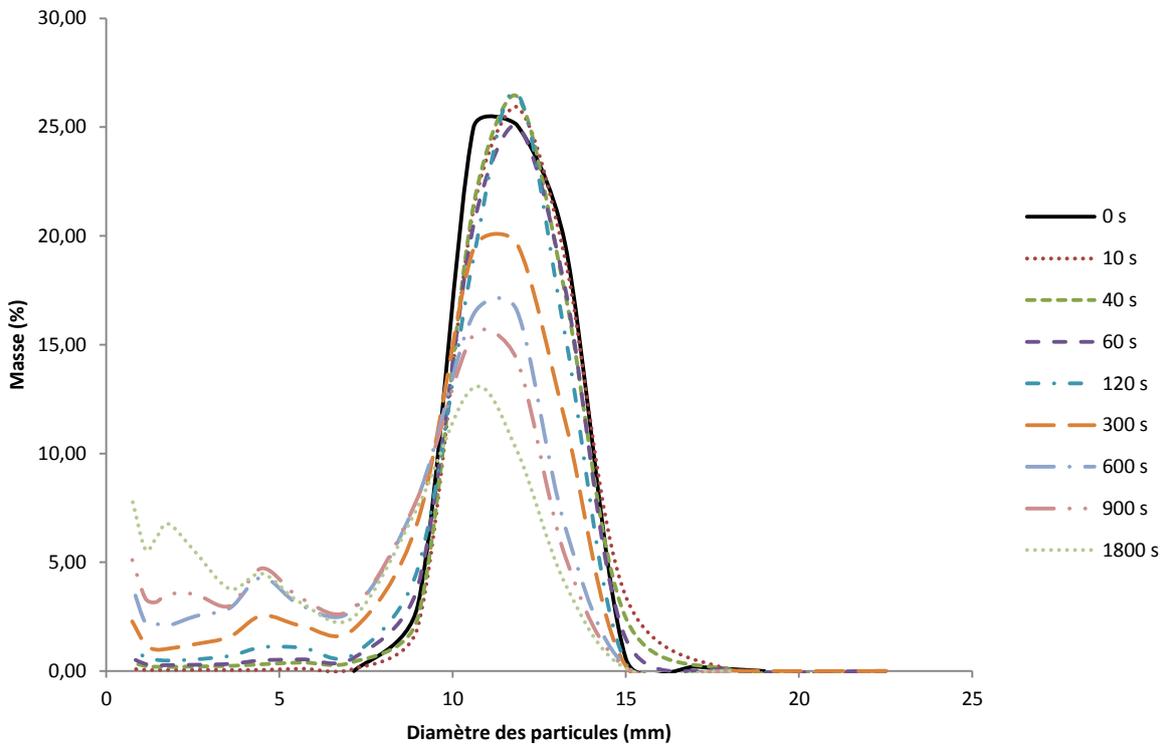


Figure 22 : Evolution des masses exprimées en fréquence des échantillons 10/14 de granulat de béton recyclé lors de l'essai de malaxage

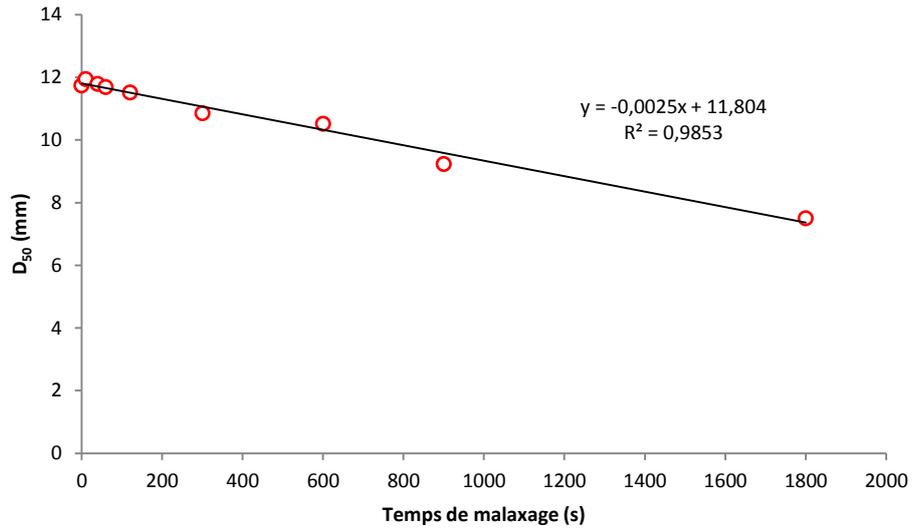


Figure 23 : Evolution du diamètre moyen (D<sub>50</sub>) des matériaux en fonction du temps de malaxage pour la fraction 10/14 mm

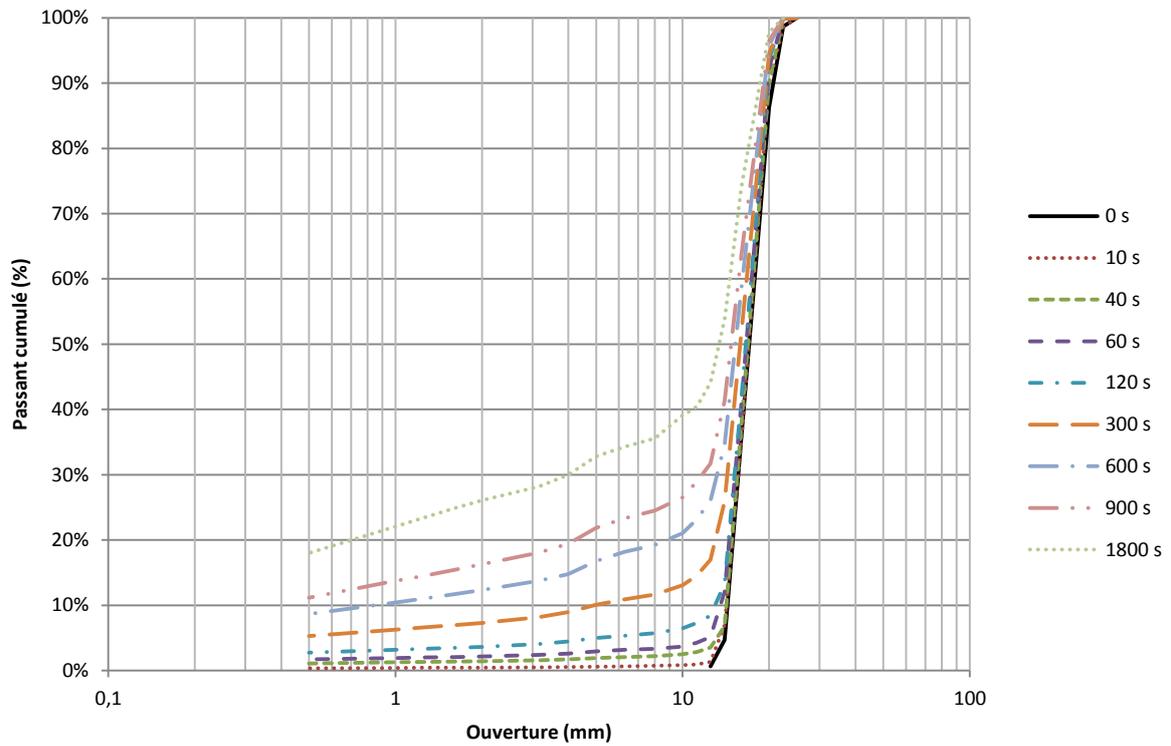


Figure 24 : Evolution des granulométries des échantillons 14/20 de granulats de béton recyclé lors de l'essai de malaxage

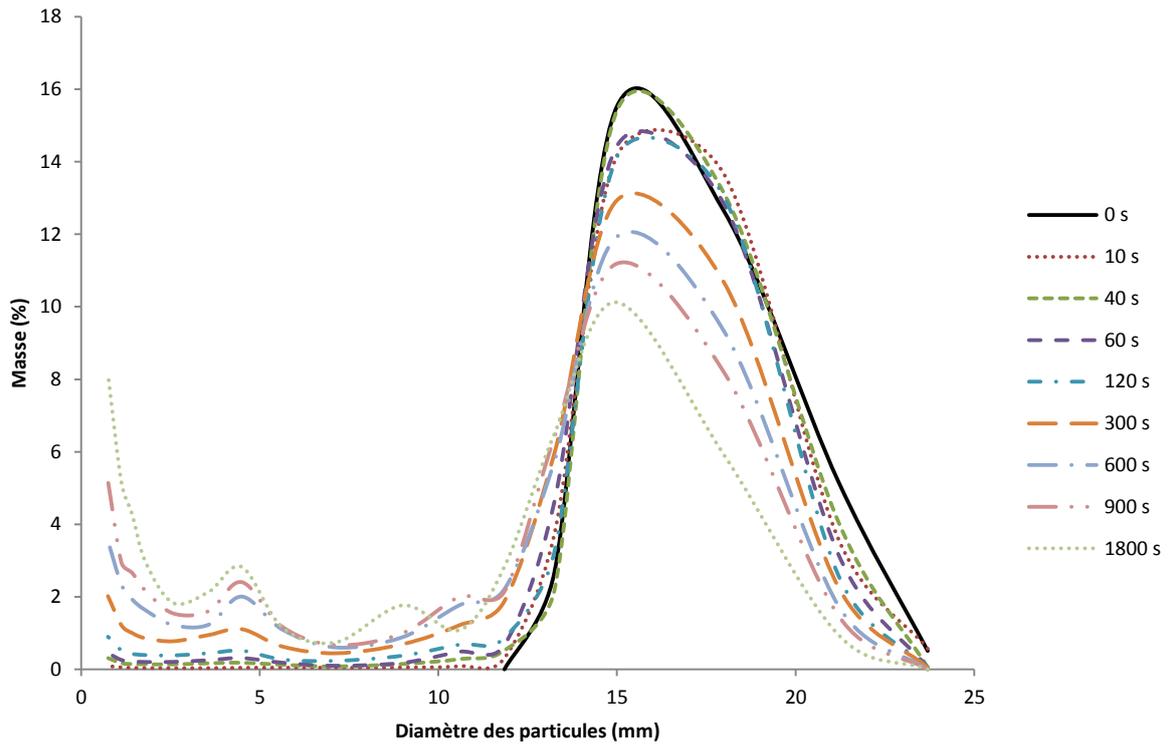


Figure 25 : Evolution des masses exprimées en fréquence des échantillons 14/20 de granulats de béton recyclé lors de l'essai de malaxage

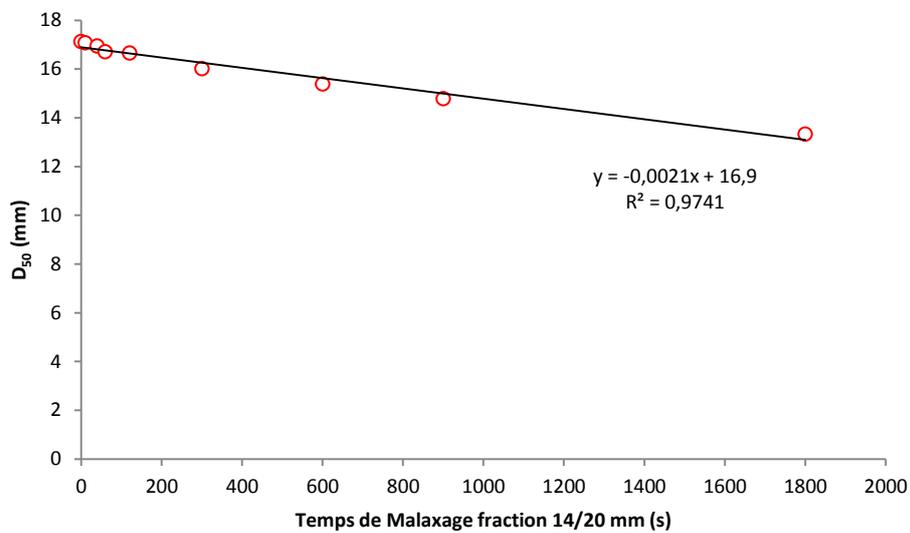


Figure 26 : Evolution du diamètre moyen (D<sub>50</sub>) des matériaux en fonction du temps de malaxage pour la fraction 14/20 mm

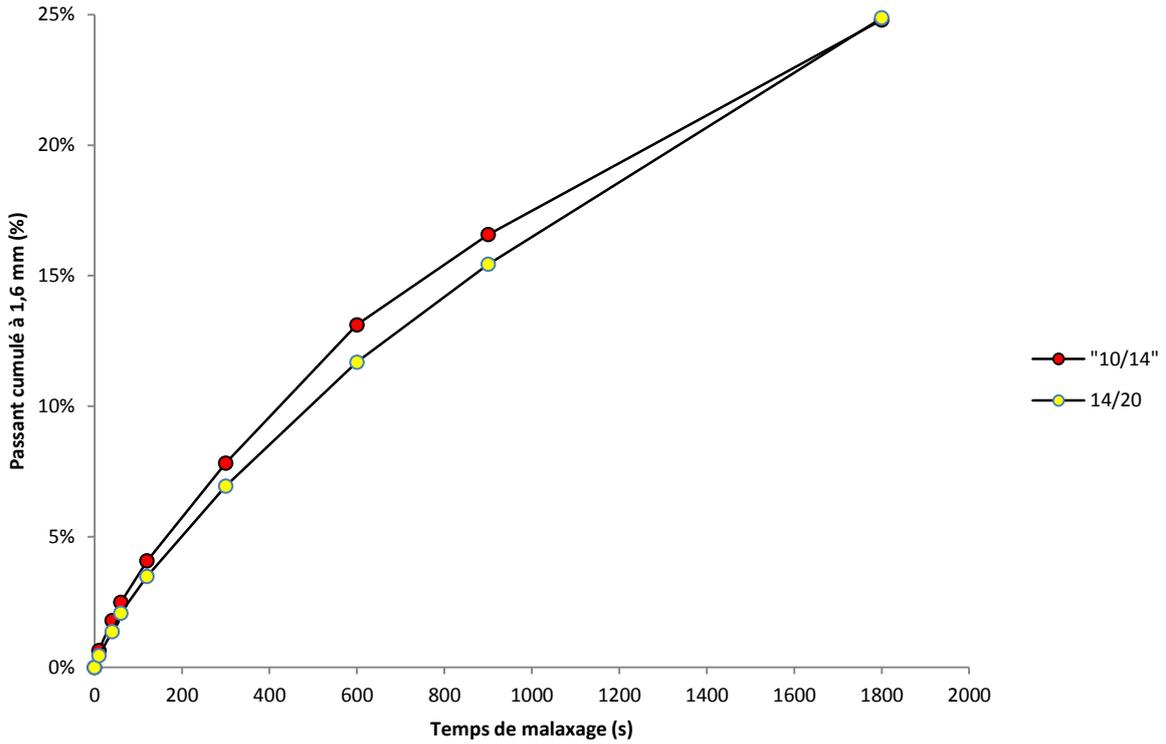


Figure 27 : Evolution des passants à 1,6 mm lors des malaxages à sec des fractions 10/14 et 14/20 mm de granulats de béton recyclé

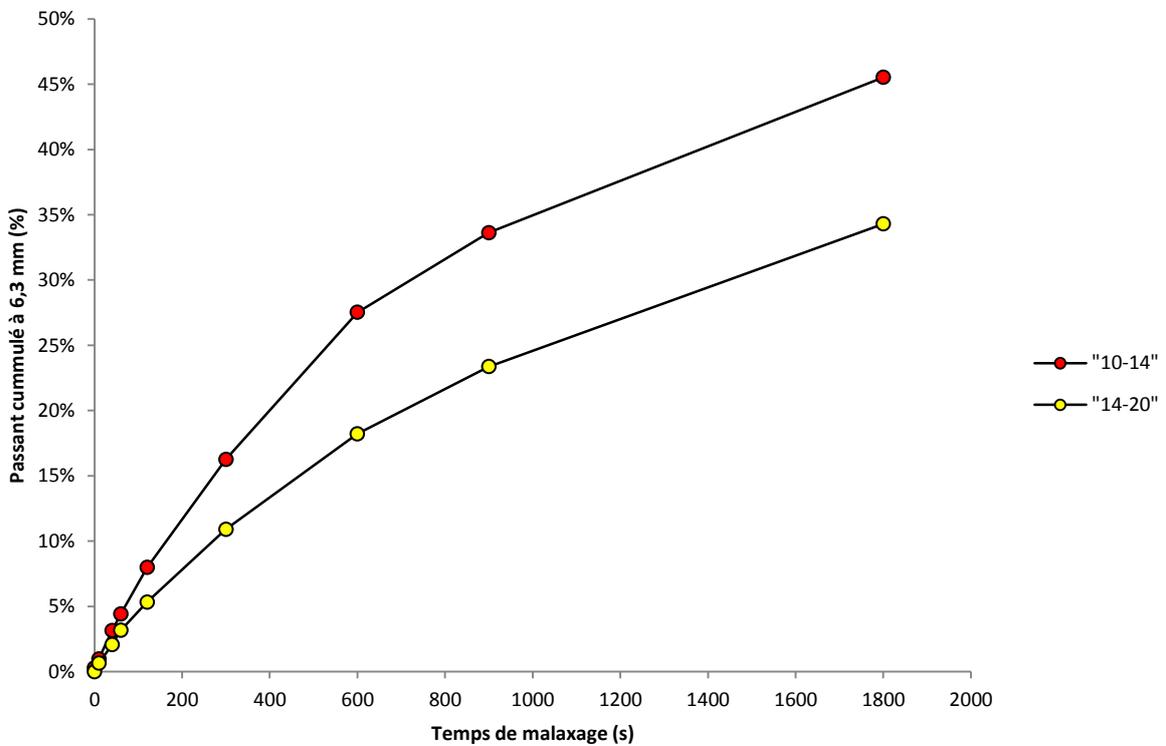


Figure 28 : Evolution des passants à 6,3 mm lors des malaxages à sec des fractions 10/14 et 14/20 mm de granulats de béton recyclé

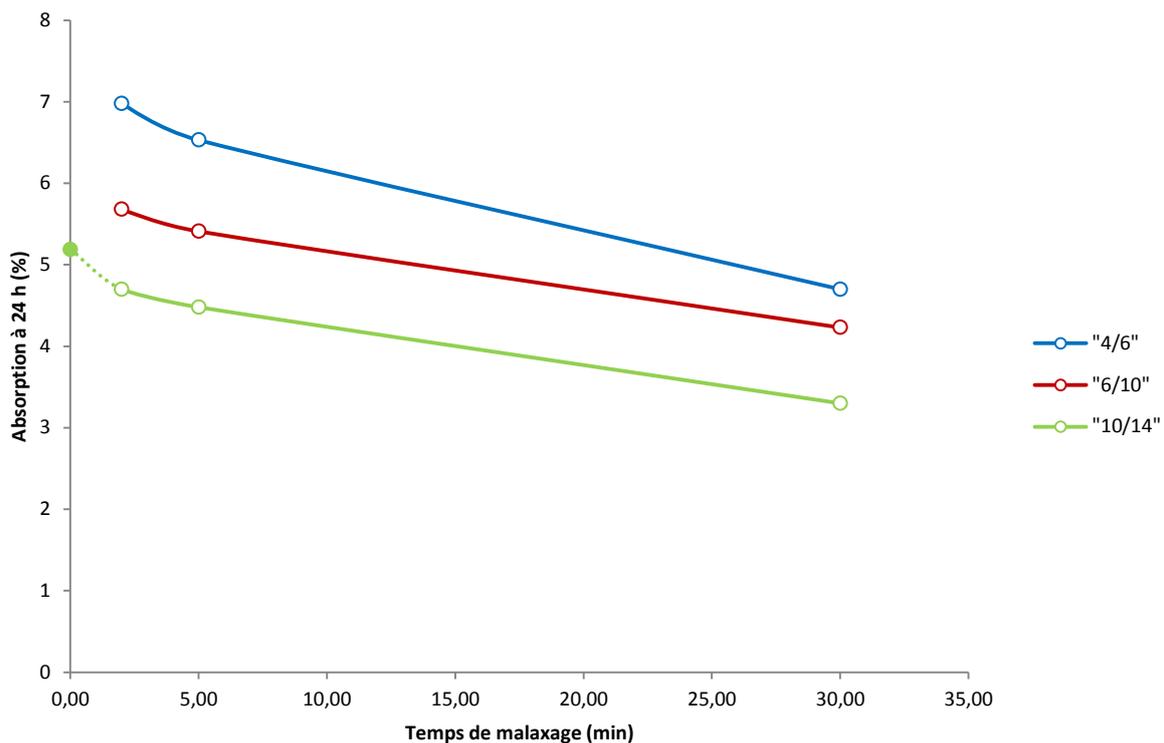


Figure 29 : Absorption à 24 h des produits du malaxage à sec à 2, 5 et 30 min de la fraction 10/14 mm. Chaque courbe correspond à l'évolution de l'absorption des fractions 4/6, 6/10 et 10/14 mm obtenues par tamisage du produit du malaxage

## 5.5 Evolution au cours du brassage humide

La teneur en éléments inférieurs à 1,6 mm augmente lors du brassage humide du granulat de béton recyclé (Figure 30, Figure 32 et Figure 34). Il n'existe pas de différence notable entre la création d'éléments inférieurs à 1,6 mm au cours du brassage humide entre les fractions 10/14 et 14/20 mm (Figure 34).

Pour la fraction 10/14, même si la création d'éléments fins est vérifiée, on ne constate pas d'effet notable sur la fraction grossière du matériau (Figure 31). Dans le cas de la fraction 14/20 (Figure 33), une tendance se dégage indiquant la réduction de la teneur en éléments supérieurs à 14 mm.

Les éléments présents dans l'eau de brassage de la fraction 10/14 après 45 min sont prélevés pour être analysés au granulomètre laser. La distribution granulométrique fait apparaître deux modes (Figure 35), l'un centré sur le diamètre 4  $\mu\text{m}$  et l'autre centré sur le diamètre 50  $\mu\text{m}$ .

L'absorption d'eau à 24 h est un indicateur de la teneur en mortier adhérent. Plus l'absorption est grande et plus le granulat recyclé est riche en mortier adhérent. Pour la fraction 6/10 mm, les absorptions à 24 h passent de 6,1 % après 5 min à 5,6 % après 45 min de brassage (Figure 36). Pour la fraction 10/14 mm elles passent de 5,3 % après 5 min à 4,6 % après 45 min de brassage (Figure 36). Le brassage a pour effet de réduire la teneur en mortier adhérent des granulats brassés, mais dans des proportions modestes.

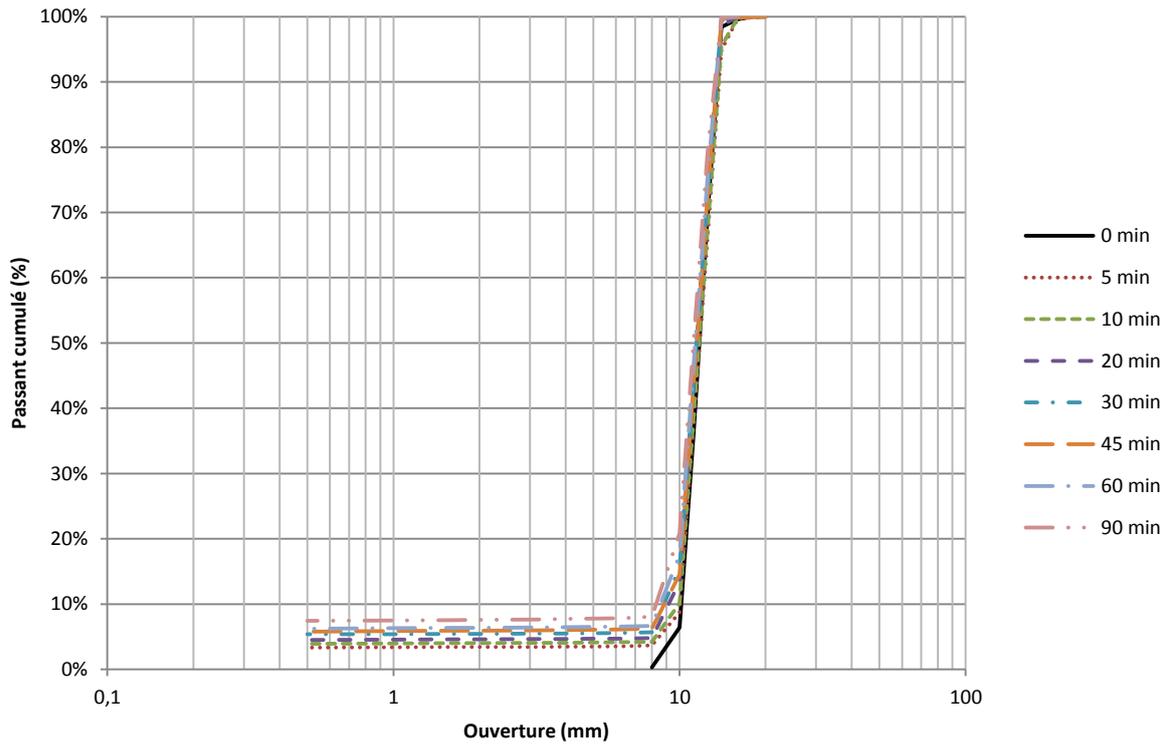


Figure 30 : Granulométrie du matériau 10/14 mm d'origine (0 min) et des matériaux produits lors du brassage humide

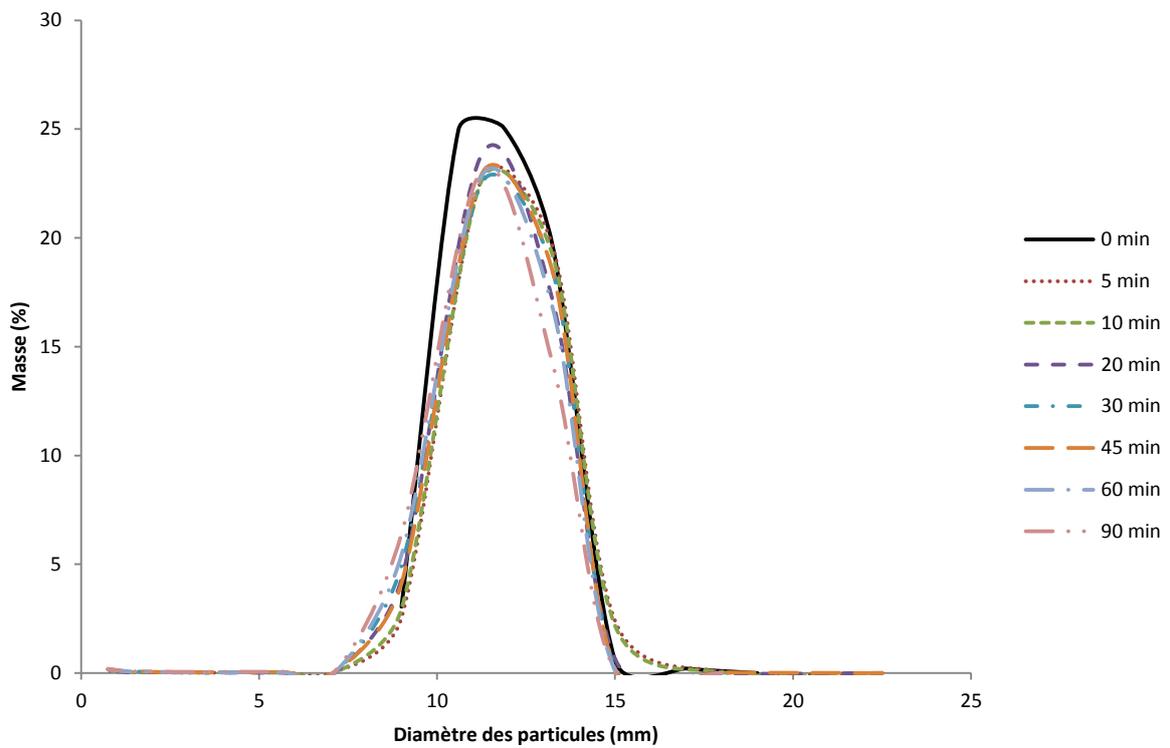
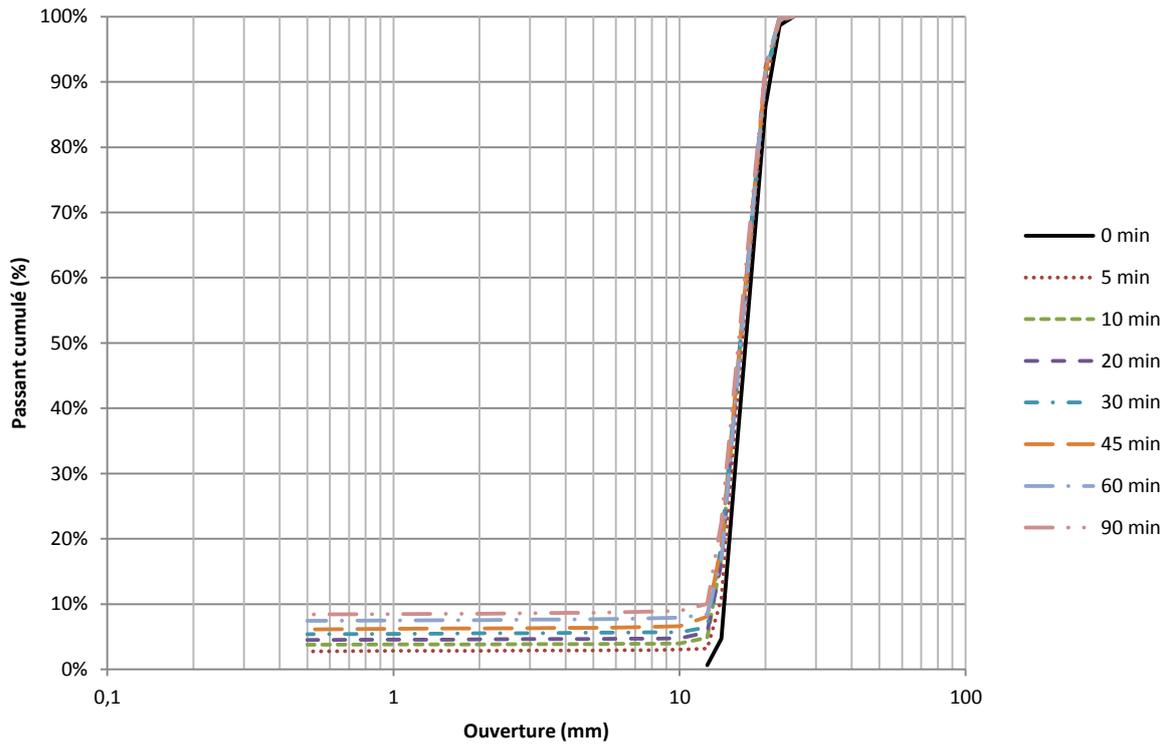
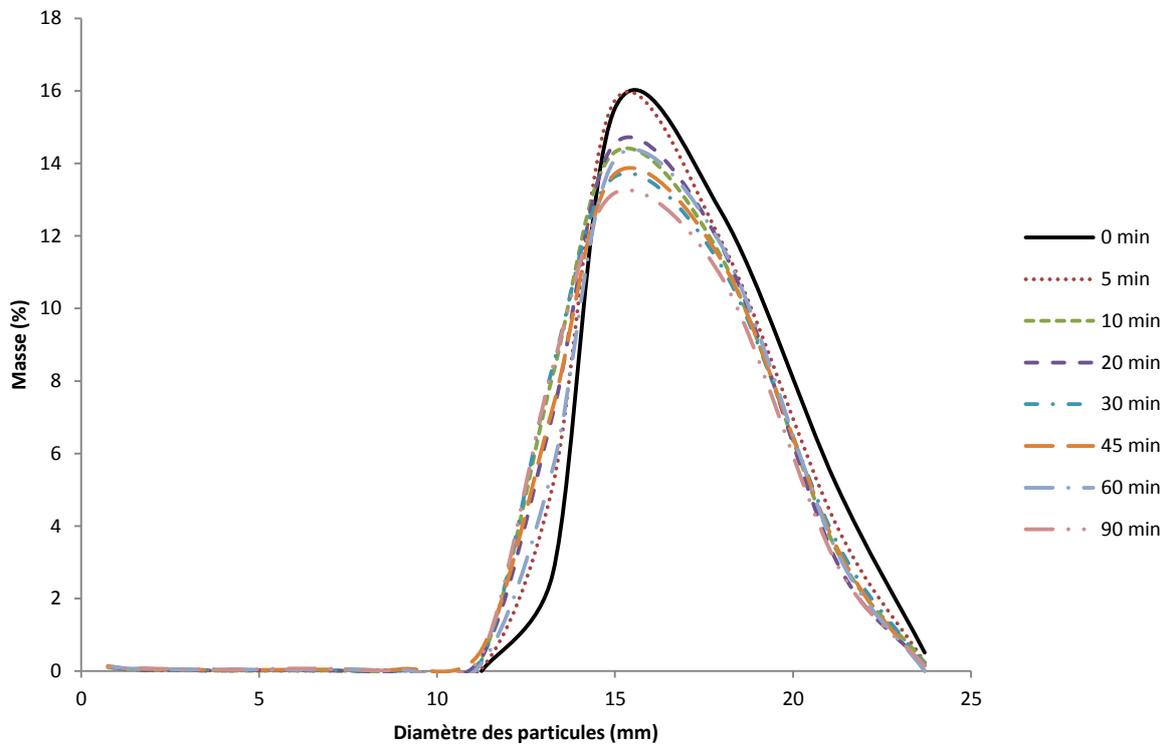


Figure 31 : Représentation en fréquence du matériau 10/14 mm d'origine et des matériaux produits lors du brassage humide



**Figure 32 : Granulométrie du matériau 14/20 mm d'origine (0 min) et des matériaux produits lors du brassage humide**



**Figure 33 : Représentation en fréquence du matériau 14/20 mm d'origine et des matériaux produits lors du brassage humide**

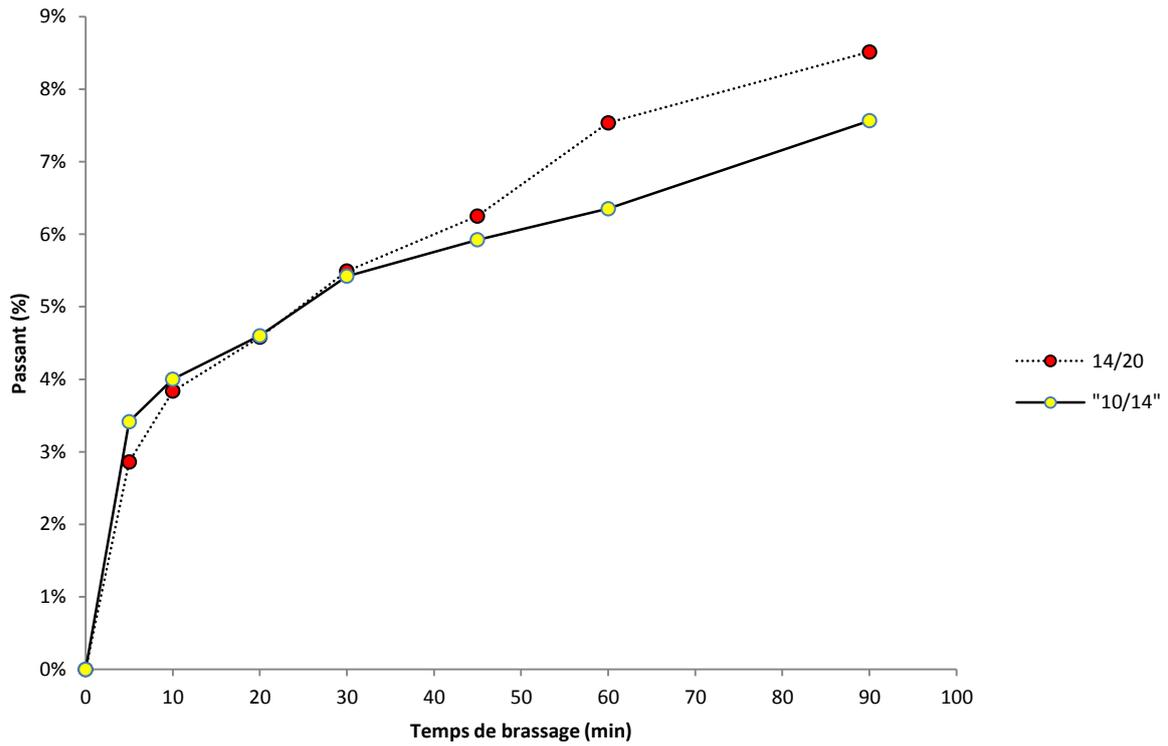


Figure 34 : Evolution des passants à 1,6 mm lors des brassages humides des fractions 10/14 et 14/20 mm de granulat de béton recyclé

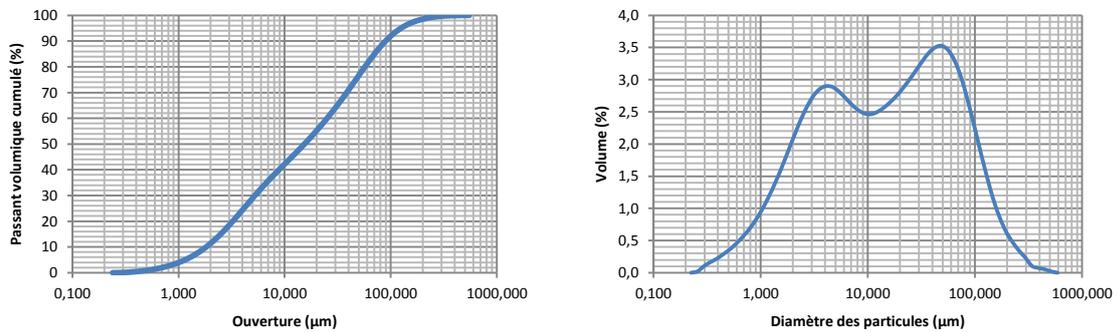


Figure 35 : Granulométrie laser en volume des éléments inférieur à 500 µm produits lors du brassage humide de la fraction 10/14 mm à 45 min, représentée en passant cumulé à gauche et en fréquence à droite

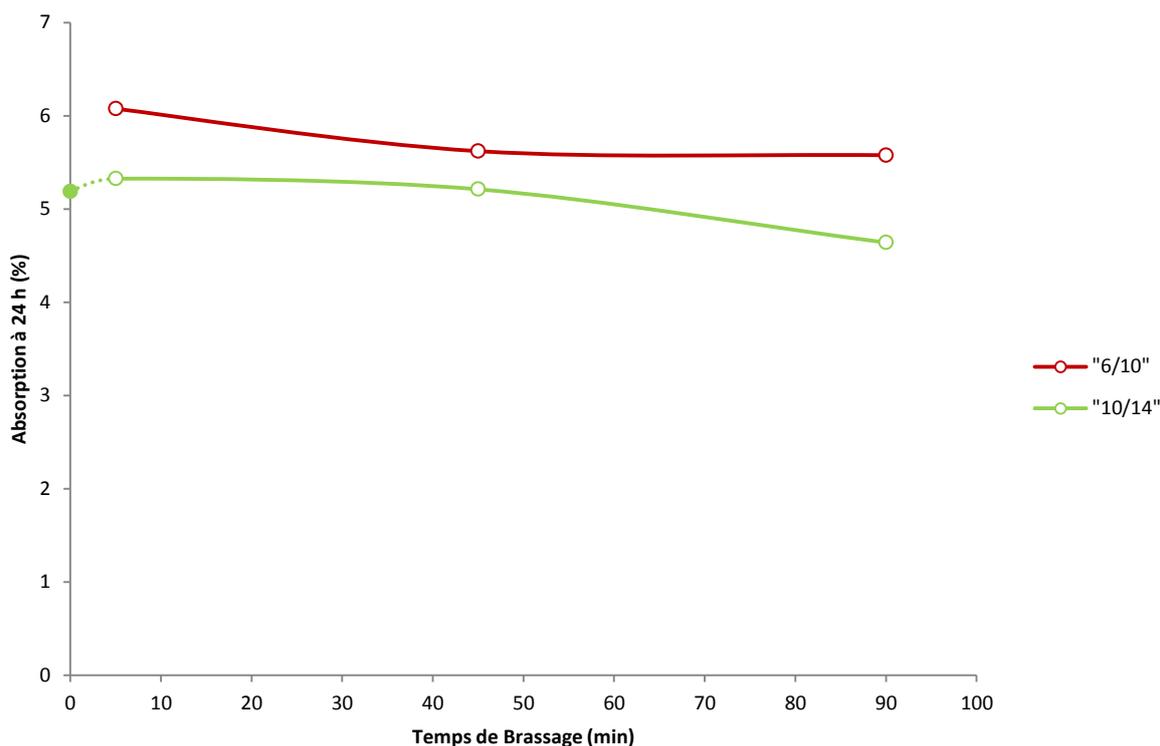


Figure 36 : Absorption à 24 h des fractions granulaires 6/10 et 10/14 produites lors du brassage humide à 5, 45 et 90 min de la fraction de départ 10/14 mm

## 5.6 Etude complémentaire : résultats des essais de Los Angeles, Micro-Deval et d'absorption de l'étude du concassage des granulats de béton recyclé

Une seconde étude confiée par le Projet National Recybéton au laboratoire GPEM de l'IFSTTAR consistait à étudier l'influence du concassage sur la production de granulats recyclés. Dans le cadre de cette seconde étude, des essais de Los Angeles, Micro-Deval et d'absorption à 24 h ont été réalisés. Ces essais concernent les matériaux d'entrée et de sortie des concasseurs. Les concasseurs employés sont un concasseur à mâchoires, un concasseur giratoire et un concasseur à percussion. Les essais Micro-Deval et d'absorption à 24 h ont été réalisés selon les normes respectives. En revanche, l'essai Los Angeles a été adapté. A la lumière des résultats précédents (5.1), qui ont montré la non-linéarité de l'évolution des passants à 1,6 mm pour les granulats de béton recyclés, les passants sont mesurés pour 50, 200, 500, 700 et 1000 tours afin de décrire convenablement cette évolution.

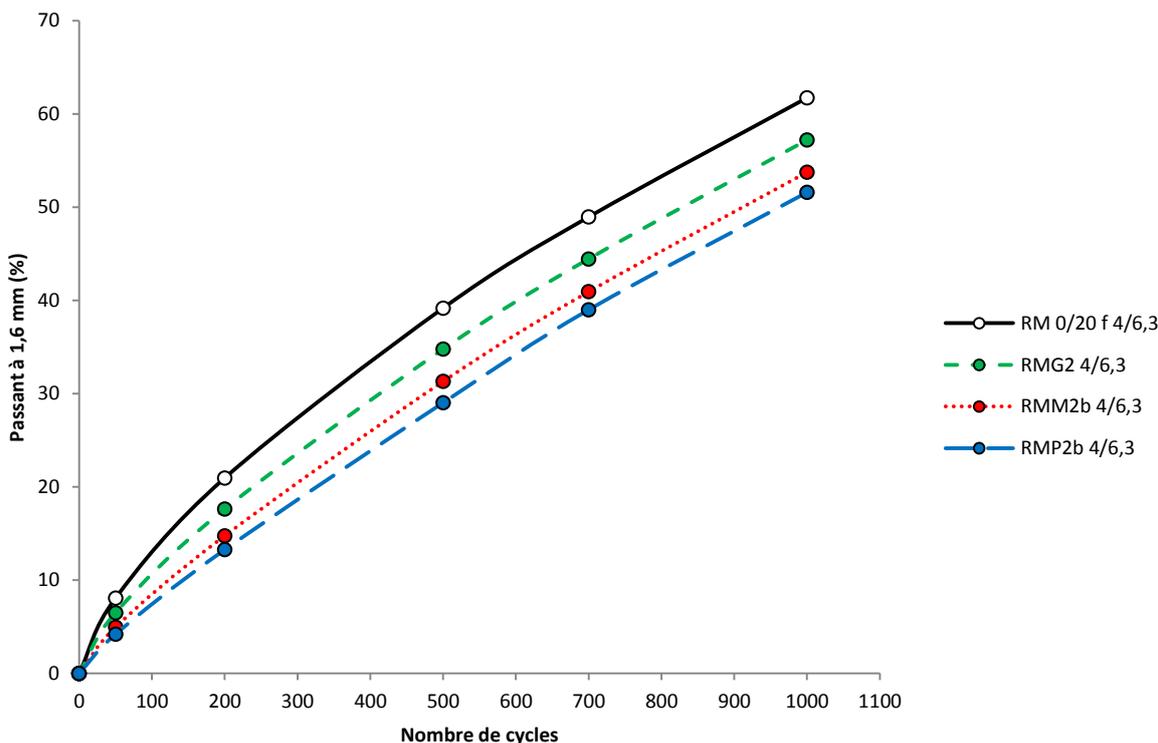


Figure 37 : Evolution des passants à 1,6 mm lors des essais de Los Angeles pour les fractions 4/6,3 mm du matériau source (RM 0/20) et des produits des concasseurs giratoires (RMG2), à mâchoires (RMM2b) et à percussion (RMP2b)

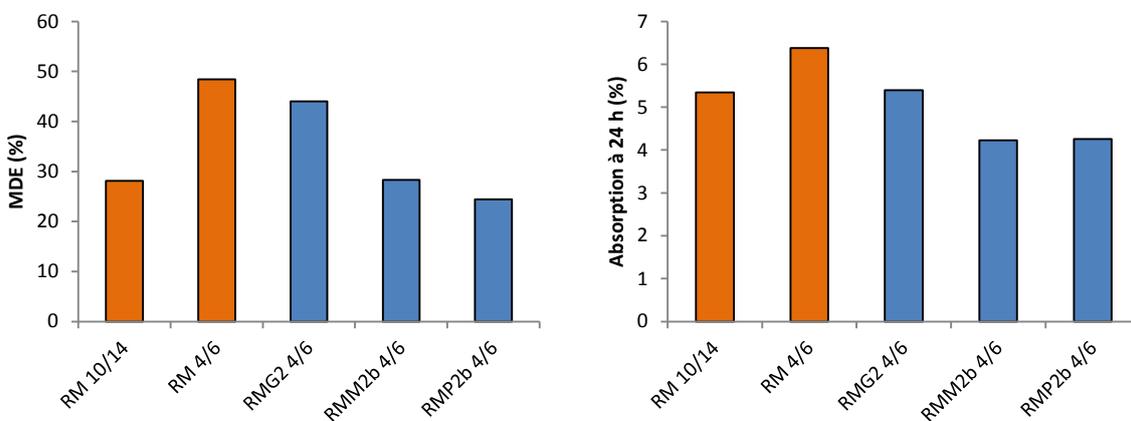


Figure 38 : Comparaison entre les résultats de l'essai Micro-Deval et d'absorption à 24 h pour deux fractions granulaire du matériau d'entrée (RM 10/14 et RM 4/6) et d'une fraction de sortie des concasseurs giratoires (RMG2 4/6), à mâchoires (RMM2b 4/6) et à percussion (RMP2b 4/6)

Le traitement aux concasseurs permet d'améliorer la résistance à la fragmentation de la fraction 4/6,3 mm (Figure 37). La résistance à la fragmentation est toutefois plus importante pour les granulats produits par le concasseur à percussion, puis dans le concasseur à mâchoires et enfin dans le giratoire (Figure 37). On retrouve la même hiérarchie dans les résultats des essais Micro-Deval ainsi que dans les absorptions (Figure 38).

## 6 Discussion

### 6.1 Teneur en mortier adhérent

Schreirer *et. al.* [8] préconisent l'emploi de la technique par dissolution pour estimer le taux de mortier adhérent dans les granulats de béton recyclé. Cependant, cette technique n'a pas été retenue dans cette étude, car les bétons de démolitions proviennent de la région parisienne et sont donc riches en granulats naturel d'origine calcaires, solubles dans l'acide. Une autre manière de comparer la teneur en mortier adhérent entre les granulats est d'utiliser la masse volumique ou l'absorption d'eau. En reprenant les données de de Juan et Gutiérrez [6], on constate que pour des teneurs en mortier adhérent variant de l'ordre de 60 %, les masses volumiques réelles des granulats testés varient de l'ordre de 6 % alors que leurs absorptions à 24 h varient de l'ordre de 80 %. L'absorption d'eau est jugée plus discriminante que la masse volumique pour comparer les taux de mortier adhérent des granulats de béton recyclé. C'est la raison pour laquelle cette méthode est retenue comme estimateur de la teneur en mortier adhérent dans cette étude.

### 6.2 Essai Los Angeles

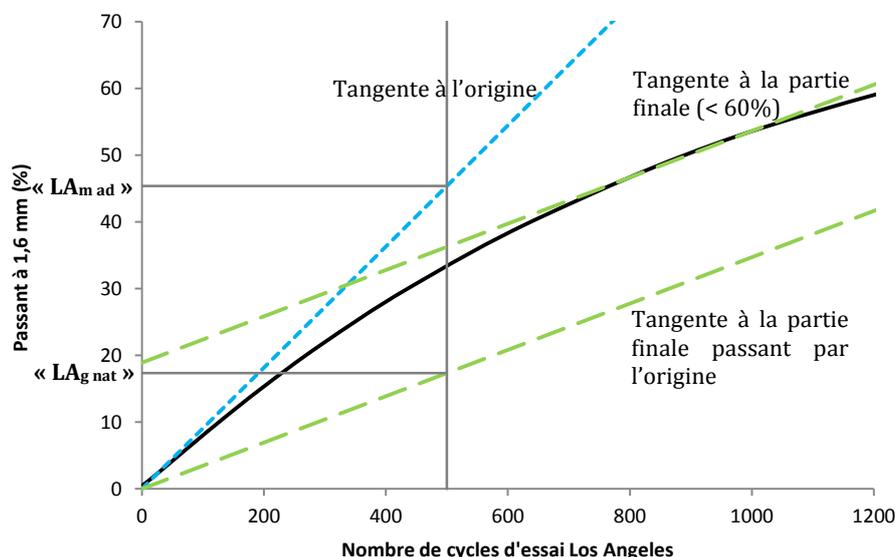
Il n'est pas surprenant de constater que le matériau naturel, un gneiss, présente une résistance à la fragmentation plus élevée que celle du granulats de béton recyclé (Figure 5). Les différences constatées entre les fractions granulaires du granulats de béton recyclé (Figure 6) peuvent s'expliquer par la teneur en mortier adhérent plus élevée dans les fractions plus petites (donc moins résistante) et/ou par l'utilisation de boulets de taille identique quelques soient les classes granulaires. Les petits grains (4/6,3) sont alors proportionnellement plus sollicités que les gros (14/20).

Les granulométries réalisées sur les fractions 4/6,3 et 10/14 mm de granulats recyclés après essai Los Angeles montrent que le passant à 1,6 mm (Figure 9 et Figure 11) est un bon indicateur de la création de fines pour les granulats recyclés. Ceci confirme la pertinence de l'utilisation de ce seuil pour l'essai Los Angeles, dans le cas des granulats recyclés.

Pour les passants à 1,6 mm inférieurs à 60 %, l'évolution du granulats naturel peut être considérée comme linéaire. Ce n'est pas le cas des fractions granulaires de recyclé qui présentent une évolution « concave » (Figure 6). Cette évolution est liée au caractère composite des granulats de béton recyclés. On fait l'hypothèse que l'évolution rapide du passant à 1,6 mm lors des premiers cycles est causée par des ruptures qui interviennent majoritairement dans le mortier adhérent, plus fragile, et que le passant à 1,6 mm tend ensuite à s'approcher de la pente de la droite d'évolution du granulats naturel d'origine du béton recyclé. On propose de décrire ce comportement bimodal par la définition de deux droites - l'une représentant l'influence du mortier adhérent et l'autre représentant l'influence du granulats naturel d'origine - et une courbe assurant la transition entre ces deux droites. La droite représentant le mortier adhérent est la tangente à l'origine de la courbe d'évolution des passant à 1,6 mm du granulats recyclé. L'équation de cette tangente est calculée en considérant qu'elle passe par l'origine et par le premier point de la courbe (Figure 38). Celle représentant le granulats naturel d'origine est la tangente de la portion finale de la courbe d'évolution du passant à 1,6 mm (Figure 39). L'équation de cette tangente est calculée en considérant qu'elle passe par les points immédiatement

inférieurs à 60 % de passant à 1,6 mm. A partir de ces deux droites, il est possible de calculer le passant à 1,6 mm qu'aurait le mortier adhérent et le granulat naturel d'origine, c'est à dire une estimation de leur LA, désignés respectivement par «  $LA_{m\ ad}$  » pour le mortier adhérent et «  $LA_{g\ nat}$  » pour le granulat naturel d'origine. Nous définissons ces deux paramètres, dans le but de tester l'hypothèse précédente, comme suit :

- Le «  $LA_{m\ ad}$  », correspond au passant à 1,6 mm à 500 tours de la tangente à l'origine de la courbe d'évolution des passants à 1,6 mm du granulat recyclé pendant l'essai de Los Angeles. Ce paramètre approxime le coefficient de Los Angeles qu'aurait le mortier adhérent seul (Figure 39),
- Le «  $LA_{g\ nat}$  », correspond au passant à 1,6 mm à 500 tours de la tangente à la partie finale de la courbe d'évolution des passants à 1,6 mm, translattée pour passer par l'origine, du granulat recyclé pendant l'essai de Los Angeles. Ce paramètre approxime le coefficient de Los Angeles qu'aurait le granulat naturel seul (Figure 39).



**Figure 39 : Détail du mode de calcul des «  $LA_{m\ ad}$  » et «  $LA_{g\ nat}$  ». La tangente à l'origine représente l'évolution des passants à 1,6 mm qu'aurait le mortier adhérent seul. La tangente à la partie finale passant par l'origine représente l'évolution des passants à 1,6 mm qu'aurait le granulat naturel d'origine**

Par ailleurs on désigne par «  $LA_{moy}$  » la moyenne des «  $LA_{m\ ad}$  » et «  $LA_{g\ nat}$  ». Les guillemets soulignent le fait que ces valeurs ne sont que des estimations sans fondement réel.

Fraction granulaire (mm)	"LA <sub>m ad</sub> "	"LA <sub>g nat</sub> "	"LA <sub>moy</sub> "	LA
14/20	37	17	27	29
10/14	46	19	32	33
6,3/10	46	20	33	32
4/6,3	49	20	35	35

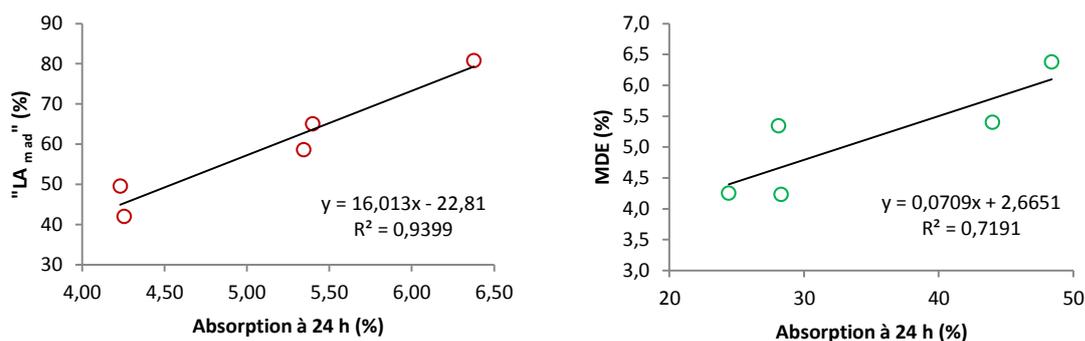
**Tableau 5 : Valeur de Los Angeles des granulats de béton recyclés calculés selon la norme (LA), estimés pour la partie mortier adhérent (« LA<sub>m ad</sub> »), estimés pour le granulat naturel d'origine (« LA<sub>g nat</sub> ») et moyenne des LA estimés pour le mortier et le granulat (« LA<sub>moy</sub> »)**

Le Tableau 5 présente les résultats des calculs des différents LA pour les fractions de l'étude. Les valeurs des « LA<sub>m ad</sub> » ont tendance à croître lorsque la fraction granulaire décroît. Les « LA<sub>g nat</sub> » ont également tendance à croître lorsque la fraction granulaire décroît, mais dans une proportion plus modeste que pour le « LA<sub>m ad</sub> ». Les « LA<sub>moy</sub> » de chacune des fractions sont en accord avec les LA mesurés selon la norme NF EN 1097-2 (Tableau 5).

A partir des résultats des essais complémentaires obtenus dans le cadre de l'étude du concassage, on peut également calculer les « LA<sub>m ad</sub> », « LA<sub>g nat</sub> » et « LA<sub>moy</sub> ». Par contre, dans ce cas, le « LA<sub>m ad</sub> » est calculé en prenant en compte le point à 50 cycles, alors que c'est le point à 25 cycles qui est pris en compte pour les calculs du Tableau 5. Les résultats sont présentés dans le Tableau 6.

Matériau	"LA <sub>m ad</sub> "	"LA <sub>g nat</sub> "	"LA <sub>moy</sub> "	LA	MDE	Absorption 24 h
RCA entrée 10/14	59	18	38	35	28	5,34
RCA entrée 4/6	81	21	51	39	48	6,38
Mâchoires 4/6	50	21	35	31	28	4,23
Giratoire 4/6	65	21	43	35	44	5,40
Percuteur 4/6	42	21	32	29	24	4,25

**Tableau 6 : Résultats des calculs des « LA<sub>m ad</sub> », « LA<sub>g nat</sub> » et « LA<sub>moy</sub> » (moyenne des « LA<sub>m ad</sub> » et « LA<sub>g nat</sub> ») et présentation des résultats des essais normalisés de Los Angeles (LA), Micro-Deval (MDE) et d'absorption à 24 h pour les fraction 4/6,3 mm de la campagne de concassage**



**Figure 40 : Corrélation entre le « LA<sub>m ad</sub> » et l'absorption à 24 h (gauche) et MDE l'absorption à 24 h (droite).**

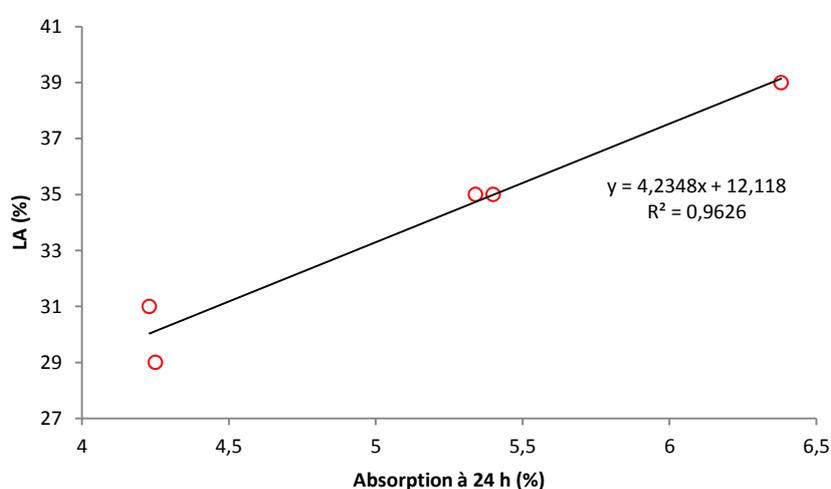
Les valeurs des « LA<sub>m ad</sub> » sont très différentes d'un matériau à l'autre (Tableau 6) mais peuvent être corrélées à l'absorption à 24 h (Figure 40,  $R^2 = 0,94$ ). Les valeurs de « LA<sub>g nat</sub> » diffèrent entre les fractions 4/6 et 10/14 du matériau d'entrée (Tableau 6), en revanche, ces valeurs sont identiques pour l'ensemble des fractions 4/6 que ce soit pour le matériau d'entrée ou les matériaux de sortie des trois concasseurs (Tableau 6). La corrélation entre les valeurs de MDE et les valeurs d'absorption à 24 h est moins évidente (Figure 40,  $R^2 = 0,72$ ), il s'agit plutôt d'une tendance.

Les « LA<sub>m ad</sub> » calculés sur les 4 fractions granulaires de l'étude (Tableau 5) indiquent que leurs valeurs sont d'autant plus grandes que la fraction granulaire est petite. Or le taux de mortier adhérent est d'autant plus important que la fraction granulaire est petite. On peut donc relier la valeur de « LA<sub>m ad</sub> » à la teneur en mortier adhérent. Les données supplémentaires obtenues dans l'étude sur le concassage (Tableau 6) confirment cette observation. On trouve en effet une bonne corrélation entre les « LA<sub>m ad</sub> » calculé pour un même granulat traité selon différents modes de concassage et l'absorption à 24 h (Figure 40,  $R^2 = 0.94$ ). Le paramètre « LA<sub>m ad</sub> » ne mesure donc pas le coefficient Los Angeles du mortier adhérent, car si tel était le cas on obtiendrait la même valeur pour un même granulat, mais est un indicateur du taux de mortier adhérent. Plus le taux de mortier adhérent est important et plus la tangente à l'origine de la courbe d'évolution des passants à 1,6 mm lors de l'essai Los Angeles a un coefficient directeur élevé.

Les valeurs des « LA<sub>g nat</sub> » calculés sur les 4 fractions granulaires de l'étude (Tableau 5) sont influencées par la taille de la fraction considérée, mais très proches les unes des autres. Le fait que les fractions les plus grandes soient plus résistantes que les plus petites est probablement lié à la sollicitation plus forte exercée par les boulets de taille fixe sur les petits granulats. Les « LA<sub>g nat</sub> » calculés dans le cadre de l'étude sur le concassage (Tableau 6) confirme cette observation. Le « LA<sub>g nat</sub> » de la fraction 10/14 est plus faible que celui de la fraction 4/6 (Tableau 6). En outre, l'ensemble des fractions 4/6, que ce soit le matériau d'entrée ou les matériaux produits par les 3 types de concasseurs, donnent un « LA<sub>g nat</sub> » identique (Tableau 6). Même si on ne peut pas affirmer que la valeur du « LA<sub>g nat</sub> » est la valeur vraie du coefficient LA du granulat naturel piégé dans le granulat de béton recyclé, puisqu'il existe nécessairement une influence du mortier adhérent, on peut utiliser ce coefficient comme indicateur de la qualité du granulat naturel d'origine, sous réserve de comparer des fractions granulaires identiques.

L'hypothèse selon laquelle l'évolution des passants à 1,6 mm est contrôlée majoritairement par la teneur en mortier adhérent lors des premiers cycles et par la qualité du granulat naturel d'origine lors des derniers cycles, pour peu qu'on se situe en-dessous du seuil de 60 % de passant à 1,6 mm, est validée.

Les résultats des essais de Los Angeles font apparaître une influence de la classe granulaire sur la résistance à la fragmentation. Plus la fraction granulaire est petite et plus elle est fragile (Figure 6). On interprète cet effet comme la combinaison de deux facteurs. Le premier est le taux de mortier adhérent qui est plus important dans les fractions granulaires les plus petites, ce qui contribue à les rendre plus fragiles que les granulats des fractions plus grandes. Le deuxième facteur est lié à la taille des boulets qui est fixe quel que soit la fraction, occasionnant des sollicitations d'autant plus importantes que la fraction granulaire testée est petite. Ces observations sont en accord avec la littérature qui rapporte l'influence du taux de mortier adhérent sur la résistance mécanique des granulats de béton recyclés [5] [7].



**Figure 41 : Correspondance entre les valeurs de Los Angeles (500 tours) et les absorptions à 24 h d'un même granulat de béton recyclé avant et après réduction aux concasseurs (mâchoires, percussion, giratoire)**

On trouve une bonne corrélation entre les coefficients de Los Angeles (500 tours) et les absorptions à 24 h (estimateur du taux de mortier adhérent) pour un même granulat recyclé avant et après réduction aux concasseurs (Figure 41,  $R^2 = 0.96$ ). De plus, en considérant l'équation de la droite de régression linéaire, si on considère une absorption à 24 h de 2 % pour le granulat naturel d'origine (un calcaire à silex), on obtient un coefficient LA de 20 % environ. Ces estimations confirment la cohérence des résultats de la Figure 41. On peut en conclure que, pour un même granulat naturel d'origine, la résistance à la fragmentation du granulat de béton recyclé est dépendante de la teneur en mortier adhérent. Plus cette teneur en mortier adhérent est importante, moins le granulat de béton recyclé résiste à la fragmentation.

### 6.3 Essai Micro-Deval

Les granulométries réalisées sur les fractions 4/6,3 et 10/14 mm de granulats recyclés après essai Micro-Deval montrent que le passant à 1,6 mm (Figure 15 et Figure 17) est un bon indicateur de la création de fines pour les granulats recyclés.

Nous disposons de 4 mesures de passant à 1,6 mm pour 6 niveaux (1000, 3000, 5000, 7500, 12000 et 20000 tours) et pour deux fractions granulaires (4/6,3 et 10/14 mm). Il est donc possible de calculer un écart-type moyen sur les 6 niveaux pour chacune des classes granulaires. On obtient un écart-type moyen sur les valeurs des passants à 1,6 mm (%) de 1,1 pour la fraction 10/14 et de 0,4 pour la fraction 4/6,3 mm.

La fraction 4/6 mm se détache clairement des fractions plus grossières lors de l'évolution des passants à 1,6 mm de l'essai Micro-Deval (Figure 14). Il semble exister un seuil, à 6 mm, en-dessous duquel les fractions testées sont plus sensibles à l'usure. On peut rapprocher cette sensibilité au taux de mortier adhérent, qui croît dans les fractions les plus faibles. Mais si tel était le cas, cet effet serait également visible sur les fractions les plus grossières. Or, ce n'est pas le cas (Figure 14). Cet effet est probablement plus à rapprocher de la taille fixe des billes employées lors de l'essai, qui est de 10 mm de diamètre, et qui doit solliciter de manière plus importante la fraction 4/6 mm. Par contre, pour les trois fractions supérieures à 6 mm, on ne peut pas faire de distinction significative en termes de résistance à l'usure.

La mesure de l'angularité sur la fraction 10/14 permet de décrire les mécanismes mis en jeu lors de l'essai d'usure humide des granulats de béton recyclé (Figure 19). L'usure a pour effet d'arrondir les grains, ce qui réduit leur angularité, puis dégage des éléments du granulat naturel d'origine de la pâte de ciment. Ces éléments sont plus résistants à l'usure que le mortier adhérent qui les emprisonnait, ils sont donc de plus en plus saillant à la surface des grains (Figure 20) leur procurant une angularité plus importante (Figure 19). Ces observations sont corroborées par l'évolution des granulométries pendant l'essai Micro-Deval (Figure 16 et Figure 18). Le diamètre moyen des particules est en effet peu modifié. L'usure ayant pour effet principal de libérer des fines arrachées en majeure partie au mortier adhérent à la surface des grains.

#### **6.4 Essais de malaxage et de brassage**

Afin de pouvoir confronter les résultats des essais normalisés (LA, MDE et MDS) avec les résultats des essais de brassage humide et de malaxage à sec, nous retenons comme référence la fraction 10/14 mm et exprimons les passants à 1,6 mm des différents essais en fonction du nombre de cycles subis par le matériau. Les résultats des essais de malaxage et de brassage étant exprimés en fonction du temps, les vitesses de rotation des malaxeurs employés ont été utilisées pour convertir ces temps en nombre de tours.

En appliquant un facteur correctif sur le nombre de cycles des essais normalisés, on tente de trouver des tendances permettant de corréliser le malaxage à sec et le brassage humide avec les essais normalisés (LA, MDE et MDS).

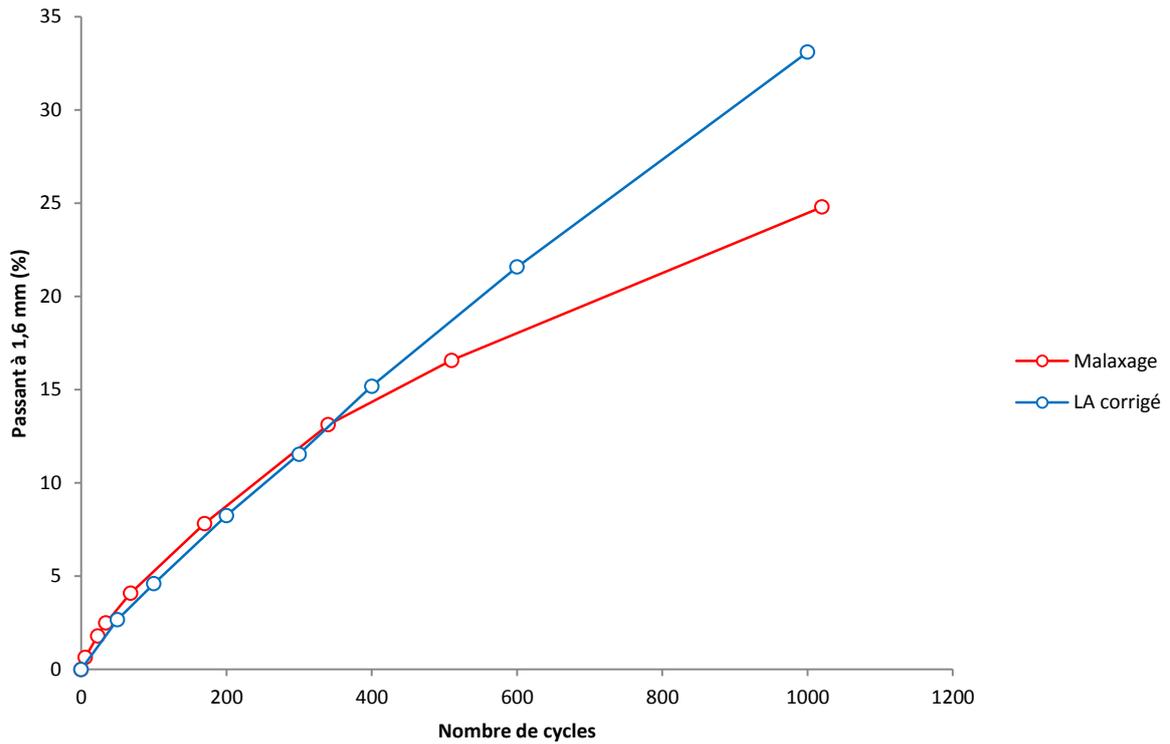


Figure 42 : Corrélation entre le malaxage à sec et l'essai Los Angeles corrigé (2 cycles de malaxage correspondent à 1 tour de LA)

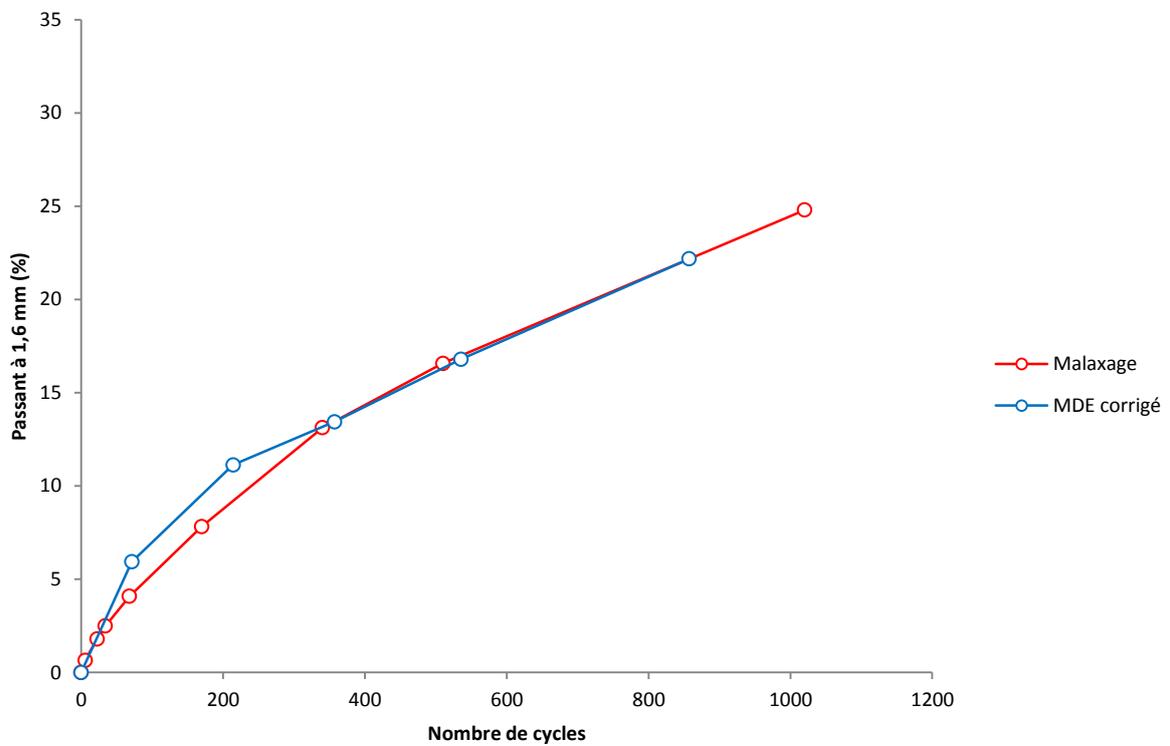
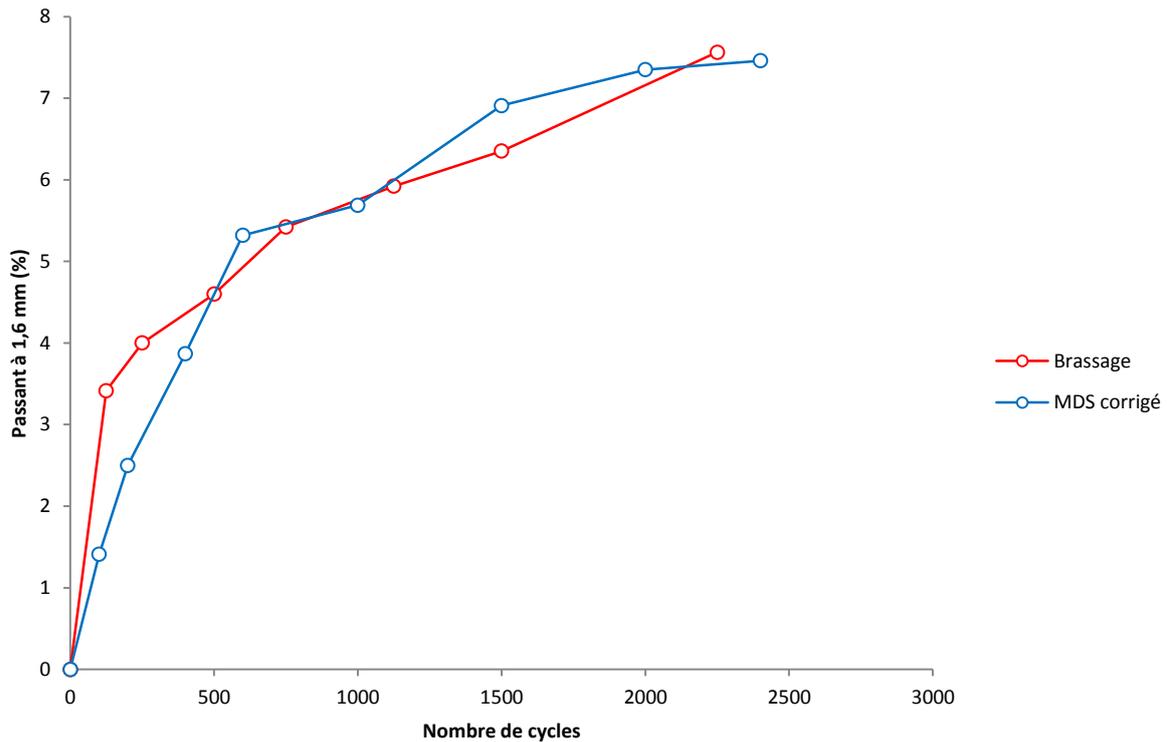


Figure 43 : Corrélation entre le malaxage à sec et l'essai Micro-Deval humide corrigé (1 cycle de malaxeur correspond à 14 cycles de MDE)



**Figure 44 : Corrélation entre le brassage humide et l'essai Micro-Deval sec corrigé (1 cycle de brassage correspond à 5 cycles de MDS)**

La corrélation entre le malaxage à sec et l'essai Los Angles corrigé (Figure 42) est assez bonne jusqu'à environ 400 cycles de malaxage (soit 200 cycles de Los Angles), ce qui équivaut à un peu plus de 10 min de malaxage. Au-delà, la corrélation est perdue. La corrélation entre le malaxage à sec et l'essai Micro-Deval humide corrigé (Figure 43) est convenable de 0 à 400 cycles de malaxage (soit 5600 cycles MDE) puis très bonne au-delà de 400 cycles, jusque 1000 cycles de malaxage (soit 14000 cycles MDE), ce qui équivaut à 30 min de malaxage. Ces résultats tendent à montrer que le malaxage à sec soumet les granulats à des sollicitations similaires à celles qu'ils subissent lors de l'essai de LA, puis subissent des sollicitations similaires à celles qu'ils subissent lors de l'essai MDE. Cependant, les durées de malaxage des bétons en centrale dépassent rarement les 3 min. C'est donc l'essai Los Angles qui reproduit le mieux la création d'éléments inférieurs à 1,6 mm lors du malaxage à sec. La gamme de cycles représentatifs de l'essai Los Angles pour la production des éléments inférieurs à 1,6 mm, pour le granulat recyclé de cette étude, s'étale entre 0 et 100.

Etant donné le peu d'éléments inférieurs à 1,6 mm créés lors du brassage humide, le seul essai qu'il soit possible de corréler au brassage humide est l'essai Micro-Deval sec (MDS) (Figure 44). Même si la corrélation n'est pas parfaite, le taux d'éléments inférieurs à 1,6 mm produit lors du brassage au bout de 2250 cycles de brassage, ce qui correspond à 1 h 30 de brassage, est sensiblement le même que celui créé lors de l'essai MDS au bout de 11250 cycles. L'essai MDS peut donc être jugé comme représentatif de la création d'éléments inférieurs à 1,6 mm entre 0 et 12000 cycles.

## 7 Conclusion

Cette étude fait le point sur la validité des normes d'essais de résistance à la fragmentation et à l'usure pour les granulats de béton recyclés. On peut en tirer les conclusions suivantes :

- Le passant à 1,6 mm semble pertinent pour décrire la création d'éléments fins lors des essais Los Angeles et Micro-Deval,
- Pour un même béton de démolition, la résistance à la fragmentation du granulat est d'autant plus importante que celui-ci est pauvre en mortier adhérent,
- Au cours de l'essai Los Angeles le granulat de béton recyclé la création d'éléments inférieurs à 1,6 mm est d'abord dépendante du mortier adhérent puis dépendante du granulat naturel d'origine. Deux nouveaux paramètres présentés dans cette étude permettent de décrire ce comportement bi-modal, le « LA<sub>m ad</sub> » et le « LA<sub>g nat</sub> »,
- On peut distinguer deux phases au cours de l'usure des granulats de béton recyclé pendant l'essai Micro-Deval : lors de la première phase, comme pour les granulats naturels, les éléments s'émoussent et prennent une forme plus arrondie ; lors de la seconde phase, l'usure du mortier adhérent libère une partie du granulat naturel d'origine jusque-là protégé par le mortier. Le granulat naturel étant plus résistant à l'usure que le mortier, l'usure concerne principalement le mortier adhérent, ce qui a pour effet de libérer le granulat naturel d'origine et modifie la forme des grains, qui, bien qu'émoussés, deviennent plus anguleux,
- On observe un effet de seuil à 6 mm lors de l'essai de Micro-Deval. Les fractions supérieures à 6 mm semblent s'user dans des proportions identiques, alors que les fractions inférieures à 6 mm sont plus sensibles à l'usure,
- La représentativité des essais Los Angeles et Micro-Deval est questionnée par rapport à des essais de malaxage à sec et de brassage humide. Il en ressort que l'essai de LA semble représentatif de la création d'éléments inférieurs à 1,6 mm générés par le malaxage à sec pour des sollicitations allant de 0 à 100 cycles de LA, ce qui correspond approximativement à une durée de malaxage allant de 0 à 5 min. L'essai Micro-Deval sec (MDS) semble représentatif du taux d'éléments inférieurs à 1,6 mm généré lors du brassage humide pour des sollicitations allant de 0 à 12 000 cycles de MDS, ce qui correspond approximativement à des durées de brassage humide allant de 0 à 1 h 30.
- Enfin, rappelons que cette étude est basée sur l'étude d'un seul matériau de démolition. Il n'est donc pas possible de généraliser ses conclusions.

## Liste bibliographique

- [1] Nagataki S, Gokce a, Saeki T, Hisada M. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cem Concr Res* 2004;34:965–71.
- [2] Etxeberria M, Vázquez E, Marí a., Barra M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem Concr Res* 2007;37:735–42.
- [3] De Oliveira MB, Vazquez E. The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. *Waste Manag* 1996;16:113–7.
- [4] Etxeberria M, Vasquez E, Mari A. Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. *Mag Concr Res* 2006;58:683–90.
- [5] Tam VWY, Wang K, Tam CM. Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis. *J Hazard Mater* 2008;152:703–14.
- [6] De Juan MS, Gutiérrez PA. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Constr Build Mater* 2009;23:872–7.
- [7] Ulsen C, Kahn H, Hawlitschek G, Masini E a., Angulo SC, John VM. Production of recycled sand from construction and demolition waste. *Constr Build Mater* 2013;40:1168–73.
- [8] Schreier M, Groger T. Impact crushing of concrete for liberation and recycling. *Powder Technol* 1999;105:39–51.
- [9] 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. *Mater Struct* 2009;43:519–28.
- [10] Berredjem L, Arabi N. Les matériaux de démolition une source de granulats pour béton : Formulation et caractérisation d'un béton à base de ces recyclés. *SBEIDCO - 1st Int. Conf. Sustain. Built Environement Infrastruct. Dev. Ctries., Oran (Algeria): 2009, p. 255–62.*

## Annexe : Bilan des essais

Essai	Nombre prévu	Nombre réalisé
MDE/MDS	23	154
LA	23	70
Granulométrie laser	12	15
Absorption	10	42
Malaxage	0	16
Brassage	0	16