



Projet National de recherche et développement

Thème 1 :

INFLUENCE DU MALAXAGE SUR LA RHEOLOGIE DE BETONS DE GRANULATS RECYCLES

Rédigé par :

Jaime Moreno
Alexis Cothenet
Bogdan Cazacliu
(IFSTTAR)

R/15/RECY/016
LC/13/RECY/34
Février 2015

Site internet : www.pnrecybeton.fr

Président : Jacques ROUDIER

Directeur : Horacio COLINA

Directeur Scientifique : François DE LARRARD

Gestion administrative et financière : IREX, 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr



Projet National de recherche et développement

FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : Influence du malaxage sur la rhéologie des bétons de granulats recyclés

RAPPORT N° : R/15/RECY/016

DATE D'ETABLISSEMENT : Février 2015

AUTEUR(S) : J. MORENO, A. COTHENET, B. CAZACLIU

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

THEME DE RATTACHEMENT : 1

LETTRE DE COMMANDE : LC/13/RECY/34

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

Résumé :

Au cours du malaxage, les granulats d'un béton subissent des sollicitations qui altèrent leur granulométrie. Ce projet se propose d'étudier cette variation granulométrique au travers d'essais après malaxage dans une pâte de ciment et avec une formulation type béton.

Les différentes modalités étudiées sont le type de malaxeur, sa vitesse et sa configuration, le temps de malaxage, l'état hydrique initial du granulat (sec/saturé), les propriétés d'usure du granulat recyclé (MDE 21 et 27). Une comparaison est donnée avec des essais réalisés lors de la tranche 1 du Projet National Recybéton, avec agitation des granulats en l'absence de la pâte de ciment. Enfin, des essais d'affaissement ont été réalisés pour une partie des bétons fabriqués.

Le premier point d'étude est la création de passant à 2,5mm pour un granulat recyclé 10/14mm et la création de passant 0,5mm pour un sable recyclé 0.5/4mm. Pour le granulat recyclé 10/14, on observe un taux de création de passant à 2,5mm, fortement dépendant du type de malaxage, qui s'échelonne de 0,5%/min lors d'un malaxage dans un malaxeur planétaire jusqu'à 2,1%/min pour la configuration la plus extrême d'un malaxeur Eirich.

Le sable recyclé 0,5/4 mm subit le même protocole et le résultat de passant à 0,5mm obtenu est 5.9%/min pour le malaxeur Eirich avec une configuration classique contre-courant et une agitation de 500 tours/min.

Le second point de ce projet vise l'étude de l'étendue de la variation granulométrique à travers des essais au videogranulomètre sur les granulats après malaxage. Les sollicitations exercées vont entraîner de l'attrition ou de la fragmentation, phénomènes analysés au cours de la cinétique de réduction de la taille de granulats. Ces résultats s'ajoutent aux essais réalisés lors la tranche 1 du Projet National Recybéton, essai de malaxage sur le granulat de béton seul, à l'état sec ou en présence d'eau. On met en évidence que la pâte cimentaire protège le granulat et diminue la vitesse de création des particules inférieures à 2,5mm.

L'étude de la réduction de taille d'un granulat recyclé avec une moins bonne résistance à l'usure selon l'essai Micro Deval, nous a permis d'interpréter la cinétique du passant en fonction du temps. Il semblerait que l'interface mortier adhérent/granulats naturel des granulats recyclés avec un « bon » MDE fragilise les granulats en début de malaxage, qui devient plus résistant lors d'un malaxage plus long suite à l'émergence du granulat naturel d'origine. Pour les granulats avec un « mauvais » MDE une évolution linéaire de la création de passant à 2,5mm avec le temps de malaxage est observée. Il semblerait que la plus forte proportion de mortier dans ces granulats retarde l'influence du granulat naturel d'origine.

L'étude complémentaire de l'angularité des échantillons nous permet d'avoir une meilleure compréhension de l'ensemble des phénomènes. En effet, l'angularité des granulats recyclés baisse en début de malaxage lorsque le granulat perd son mortier adhérent. Elle augmente par la suite, lorsqu'on fait ressortir le granulat naturel présent dans le granulat recyclé. En ce qui concerne le granulat recyclé avec un « mauvais » MDE, ce phénomène n'apparaît pas car le grain est composé en moindre mesure de granulat naturel.

Enfin, des essais d'affaissements au cône sont réalisés pour examiner la maniabilité. La variation de taille des granulats a une influence sur la maniabilité car celle-ci augmente jusqu'à 180 secondes de malaxage puis diminue à 300 secondes.

Abstract:

During mixing, constituents of concrete undergo many stresses which will alter their size. This project intends to study this phenomenon through tests from mixing into a cement paste and with a standard concrete formulation.

Different modes are tested here with two types of mixers, different rotation speeds, two directions of rotations, different initial water conditions and different wearing properties regarding micro-Deval test. Comparison is made with tests performed during the first round of the national project Recybéton. In the end, slump test are done to determine influence of size reduction regarding the consistence of fresh concrete.

We first study the appearance of 0/2,5mm fraction created from initial recycled aggregate 10/14mm fraction and the appearance of 0/0,5mm fraction created from initial recycled sand 0,5/4mm fraction. First of all we can notice that the passing creation highly depends on the type of mixing. For recycled aggregate 10/14 the generating rate is range from 0,5%/min, in a planetary mixer, to 2.1%/min in an Eirich mixer with extreme configuration.

The recycled sand 0,5/4mm undergoes the same protocol and the result of passing 0,5mm rate obtained is 5,9%/min, for Eirich mixer with a typical configuration : against the current and stirring 500rev/min.

The second point of this project study the extend of the particle size variation through the videogranulometer test. Internal forces will cause attrition or fragmentation, phenomena analyzed in the kinetics of reduction size of aggregates. These results are added to the tests carried out in unit 1 : mixing only dry aggregates or with water. This leads to the conclusion that cement paste protects the aggregates and reduce speed of passing particles smaller than 2,5mm.

Study of granular size reduction of recycled aggregates with a lower wear resistance, according to the MDE test, allow us to interpret the passing time kinetics. It seems that the interface between attached mortar and natural aggregate for recycled aggregate with "good" MDE weakens the aggregate at the beginning of the mixing stage and becomes stronger with a longer mixing time because of the emergence of natural aggregate. For aggregates with "bad" MDE, the evolution is linear as these aggregates have higher proportion of attached mortar, influence of the natural aggregates takes longer to happen.

Complementary work consisting in measuring the angularity of tested samples, allow us to have a better understanding. In fact, angularity of recycled aggregates gets lower during mixing, up to 180 seconds, and increases thereafter. This could also be an effect of the emergence of the natural aggregates content in recycled aggregates. Regarding the results of angularity tests of recycled aggregate with "bad" MDE, the angularity only decreases because the grain is composed of lower natural aggregate proportion.

Finally, slump tests are carried out to examine workability. The variation of aggregate size affects consistence because workability gets better up to 180 seconds and then decreases at 300 seconds.

Table des matières

Table des matières

Table des matières	4
1 Introduction.....	6
2 Bibliographie.....	7
3 Campagne expérimentale	9
3.1 Matériaux sources.....	9
3.2 Malaxeurs.....	9
3.2.1 Malaxeur planétaire SKAKO.....	9
3.2.2 Malaxeur Eirich.....	10
3.3 Description de la campagne expérimentale.....	10
3.3.1 Essais sur le malaxeur Planétaire SKAKO.....	11
3.3.2 Essais sur le malaxeur Eirich	12
4 Résultats et discussion	17
4.1 Etude des fractions granulaires inférieures à 2,5mm produites lors du malaxage avec le malaxeur planétaire	17
4.2 Etude des fractions granulaires inférieures à 2,5mm produites lors du malaxage avec Eirich.....	19
4.2.1 Etude des fractions granulaires inférieures à 2,5mm produites lors du malaxage des granulats de fraction 10/14.....	19
4.3 Influence de l'état hydrique initial des granulats recyclés sur la création de particules inférieures à 2.5 mm.....	21
4.4 Essais 2 ^{ème} campagne	22
4.4.1 Essai granulats mauvais MDE.....	22
4.4.2 Etude des fractions granulaires inférieures à 0,5mm produites lors du malaxage des sables recyclés 0,5/4	23
4.4.3 Essai d'affaissement	23
4.5 Taux de création de passant par minute	24
4.6 Comparaison avec les résultats de la tranche 1	26
4.7 Résultats du VDG.....	26
4.7.1 Résultats de la granulométrie malaxeur planétaire.....	27
4.7.2 Résultats de la granulométrie malaxeur Eirich.....	28
4.7.3 Comparaison malaxeur planétaire / Eirich.....	28
4.7.4 Résultats de la granulométrie malaxeur Eirich mauvais MDE.....	29

4.7.5	Résultats de la granulométrie malaxeur Eirich granulats naturels	30
4.7.6	Comparaison des différentes modalités.....	31
4.7.7	Granulométrie Sable recyclé	32
4.7.8	Courbes granulométriques passant non-cumulé	33
4.7.9	Résultats de l'angularité	34
5	Conclusions.....	36
	Liste bibliographique	39

1 Introduction

Ce rapport présente les résultats et les conclusions de l'étude intitulée « Influence du malaxage sur la rhéologie des bétons de granulats recyclés » réalisée par le Laboratoire Granulats et Procédés d'Élaboration des Matériaux/ Département MATériaux et STructure (GPEM/MAST) de l'IFSTTAR dans le cadre de la tranche 2 du Projet National Recybéton.

La raréfaction des ressources 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.

Tout d'abord, ce rapport s'attache à présenter un rapide bilan du savoir scientifique actuel à travers sa partie bibliographique. Puis, il étudie l'évolution granulométrique de bétons recyclés grâce aux mesures de la diminution de la taille granulaire d'un mélange type béton, lors d'une agitation forcée. Afin d'appréhender les facteurs impactant cette évolution granulométrique diverses modalités sont testées à travers :

- le type de malaxeur → planétaire et Eirich,
- sa vitesse → 300tr/min et 500tr/min
- sa configuration de malaxage → co-courant et contre-courant,
- le temps de malaxage → 35secondes jusqu'à 300secondes,
- l'état hydrique initial du granulat → sec (humidité ambiante, séchés à l'air) et saturé (saturé surface sèche),
- les propriétés d'usure du granulat recyclé → MDE 21 et 27,
- la taille des grains → 0,5/4mm et 10/14mm.

Une comparaison est faite avec des essais réalisés lors de la tranche 1 du PN recybéton « Etude de la validité des normes d'essais mécaniques pour les granulats recyclés » [1]. Lors de cette étude des granulats seuls ont été malaxés dans un malaxeur planétaire et dans une bétonnière afin de tester l'évolution granulométrique.

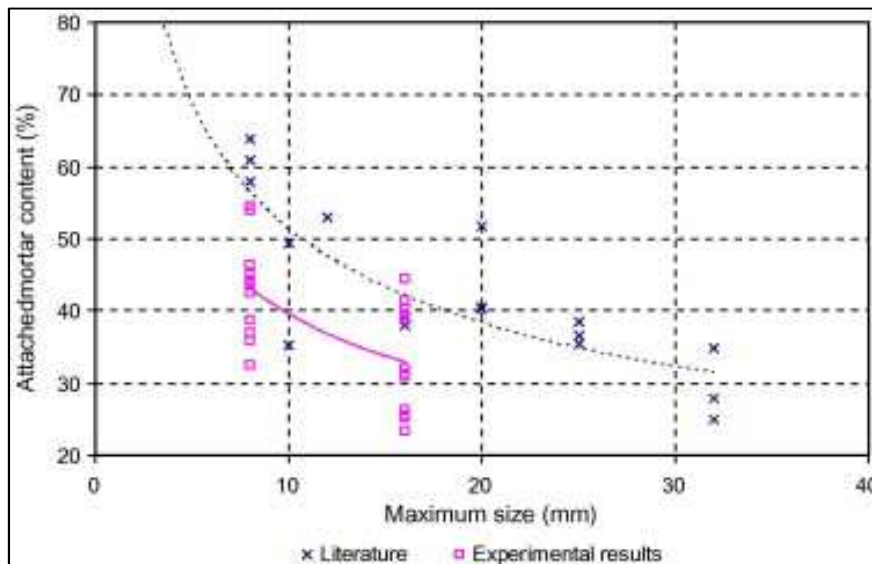
Afin d'obtenir les informations nécessaires à la compréhension des phénomènes, ce rapport présente les résultats de passant à 2,5mm lors du malaxage pour le granulat 10/14mm, de passant à 0,5mm pour le sable 0,5/4mm, les courbes granulométriques aux différents temps de malaxage, des mesures d'angularité après malaxage et les résultats des essais d'affaissement réalisés sur béton frais.

2 Bibliographie

Un granulat de béton recyclé est composé de granulat naturel du béton d'origine (granulat naturel d'origine), sur lequel une quantité plus ou moins importante de mortier de ciment d'origine est attachée (mortier adhérent) [2] [3]. Les bétons incorporant des granulats de bétons recyclés sont appelés bétons de granulats recyclés.

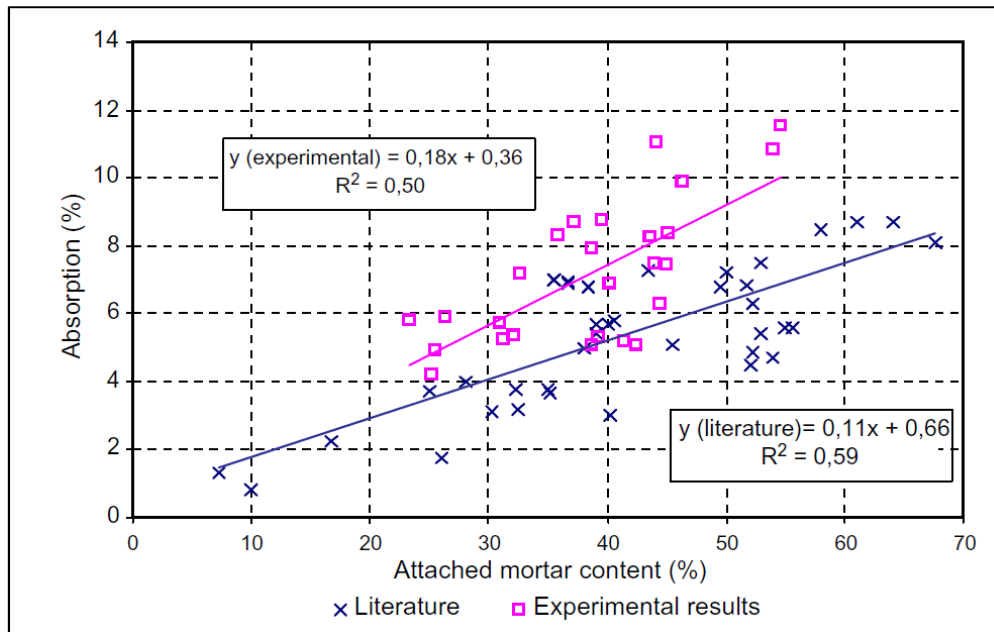
Des méthodes pour quantifier la part de mortier adhérent et de granulat naturel d'origine ont été étudiées par *A. Abbas et al.* [4] ainsi que par *Sánchez de Juan et Alaejos* [5]. Ils réussissent à quantifier la quantité de mortier adhérent en différenciant particules grossières et particules fines. Le taux de particules fines adhérentes (4/8 mm) varie entre 33 et 55% tandis que le taux de particules grossières (8/16 mm) varie entre 23 et 44%.

Les auteurs [5] mettent en évidence la relation entre la teneur en mortier adhérent et la taille du granulat.



Graphique 1 : Contenu de mortier adhérent par rapport à la taille du granulat.

Une relation entre le mortier adhérent et différentes propriétés mécaniques du granulat, comme la densité, l'absorption et la fragmentabilité Los Angeles, a aussi été mise en évidence. La conclusion de ceci pointe un seuil maximal de 44% de mortier pour garantir un granulat recyclé de qualité acceptable. D'autre part les auteurs [5] mettent en évidence une relation entre la teneur en mortier et l'absorption des granulats. Ils ont abouti à la conclusion que lorsque la teneur en mortier augmente, l'absorption d'eau augmente aussi. Cette relation décrit une fonction linéaire qui permet d'estimer le mortier adhérent en fonction de l'absorption (voir graphique suivant).



Graphique 2 : Relation entre la teneur en mortier et l'absorption

Ulsen *et al.* [6] 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.

Une solution serait de séparer le mortier adhérent du granulat naturel d'origine, pourtant la difficulté de séparer ces 2 entités est soulignée par plusieurs auteurs [7] [8] [9]. Des solutions sont proposées. Etxeberria *et al.* [3] affirment que le concasseur à impact permet d'obtenir une quantité importante de granulat recyclé sans mortier adhérent. Tsujino *et al.* [7] ainsi que Akbarnezhad *et al.* [10] proposent un traitement thermique par micro-ondes à réaliser avant le concassage, Shima *et al.* [8]. Mulder *et al.* [11] 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.* [12] 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. Après une réduction primaire par un concasseur à mâchoire, les granulats de béton recyclés sont broyés selon différentes modalités, faisant intervenir, ou non, un prétraitement 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 (de 4 à 11 % en moyenne pour les granulats de béton recyclé, contre 0.5 à 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 prétraitement thermique n'est efficace que pour le broyeur d'échelle 1. Dans le cadre du projet ANR cofrage [13], le BRGM s'est également penché sur la question et a étudié la libération du granulat d'origine par électro-fragmentation qui à l'échelle laboratoire a montré des résultats prometteurs.

3 Campagne expérimentale

3.1 Matériaux sources

Les matériaux utilisés dans cette étude sont :

- Des granulats de béton recyclés 0/20mm et 10/20mm fournis par le PN Recybéton. Ces matériaux ont été criblés pour obtenir une fraction granulaire d'étude 10/14mm et 0,5/4mm pour le sable.

Les granulats sont utilisés avec un état hydrique initial sec (séchés à l'air) d'une teneur en eau moyenne de 2,11% pour les 10/14mm et 4,81% pour les 0,5/4mm et avec un état hydrique initial saturé surface sèche d'une teneur en eau de 6,3% en moyenne pour les 10/14mm

- Des granulats naturels 10/14mm de type gneiss secs (0,16% de teneur en eau)

- Sable naturel 0/2,5mm sec (0,2% de teneur en eau moyenne). Le sable a été coupé manuellement à 2,5mm afin d'optimiser l'étendue de la réduction granulaire et de s'assurer qu'aucune particule supérieure à 2,5mm provenant du sable ne soit mesurée après la réalisation de nos essais. Le même sable 0/4mm a été utilisé dans la deuxième partie de la campagne sans être coupé à 2,5mm.

3.2 Malaxeurs

3.2.1 Malaxeur planétaire SKAKO

Le malaxeur planétaire SKAKO utilisé est de type discontinu à axe vertical et action forcée. Ce type de malaxeur est le plus souvent utilisé pour la fabrication du béton hydraulique en France. La capacité des malaxeurs industriels est comprise entre 0,5 et 3,5 m³. En laboratoire, leur capacité est comprise entre 20 et 200l et pour nos essais la capacité du malaxeur est de 30l. Les outils de brassage sont des pales montées sur des bras tournant autour d'un axe vertical. Elles induisent le mouvement forcé du matériau dans une cuve annulaire fixe. La vitesse de rotation des pales est de l'ordre de 20 à 30 tours/min. Elles sont équipées d'outils ayant une forte action de cisaillement localisé. Dans ces outils possédant un ou deux « tourbillons », les pales, généralement au moins trois par outil mais ici 1 pale pour notre malaxeur de laboratoire, exécutent un mouvement épicycloïdal autour de deux axes verticaux. La vitesse de rotation des pales autour de l'axe de rotation mobile est généralement trois fois supérieure à la vitesse de rotation de l'axe mobile autour de l'axe fixe. Des études réalisées dans le cadre du projet national B@P sur des malaxeurs industriels d'une taille de 1 m³ ont montré que l'utilisation d'un tourbillon permet de raccourcir le cycle de fabrication des bétons à hautes performances et des bétons autoplaçants dans un malaxeur annulaire. De manière générale, les malaxeurs à tourbillons font partie de la famille des malaxeurs planétaires. Cependant, dans la terminologie spécifique au domaine du béton, les malaxeurs planétaires (ou à train valseur) ont la cuve du malaxeur pleine (le centre n'est pas bloqué). Un ou deux outils en mouvement en double rotation (étoiles de malaxage) ont un rayon d'action qui peut couvrir le centre de la cuve. La vitesse de rotation de l'axe mobile autour de l'axe fixe du malaxeur est de 15 à 20 tours/min, la vitesse de rotation de l'étoile de malaxage étant environ trois fois supérieure. Il existe des malaxeurs planétaires avec cuve tournante, mais ces équipements demeurent rares de nos jours.

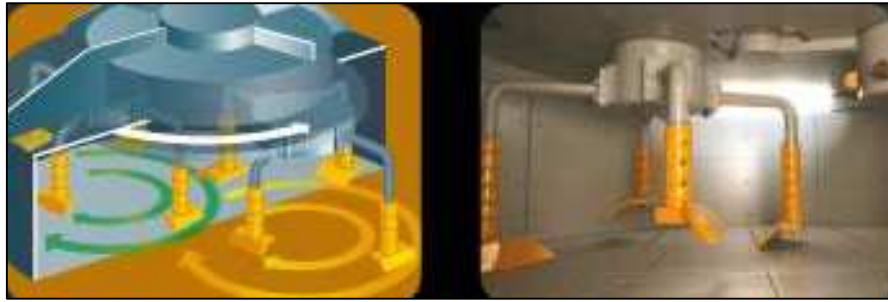


Figure 1 : Malaxeur planétaire SKAKO

3.2.2 Malaxeur Eirich

Ce malaxeur est de type discontinu à axe incliné, à action forcée. Ce système de malaxage est communément considéré comme le plus efficace. Il est constitué d'une cuve rotative inclinée, associée à un ou plusieurs agitateurs disposés excentriquement, pouvant engendrer un contre-courant ou un courant dans le sens de la cuve (co-courant) et d'un racleur statique. La cuve tourne typiquement entre 15 et 30 tours/min, alors que l'agitateur peut avoir des vitesses angulaires entre 50 à 700 tours/min. Les vitesses d'agitation et le sens de rotation sont choisis en fonction de l'application ou des différentes étapes de malaxage. Ce type de malaxeur, qui n'est pas classique pour le malaxage des bétons, commence à se répandre dans l'industrie du béton manufacturé, surtout pour la production des bétons haut de gamme. En effet, la bonne réputation de ce système est sans doute liée à sa capacité reconnue d'optimiser le malaxage des bétons fibrés à ultra-hautes performances.



Figure 2 : Malaxeur Eirich

3.3 Description de la campagne expérimentale

La campagne expérimentale s'est divisée en deux phases en fonction du type de malaxeur utilisé, le malaxeur planétaire Skako et le malaxeur Eirich.

Une première phase a consisté à réaliser le malaxage des granulats de béton recyclé dans le malaxeur planétaire de laboratoire et mesurer le poids des granulats avant et après le malaxage comme décrit ci-dessous puis mesurer l'angularité et la granulométrie au videogranulomètre (VDG). Une deuxième phase consiste à réaliser les mêmes essais, cette fois-ci avec le malaxeur Eirich. Dans les deux cas les essais se font avec des granulats de bétons recyclés secs (humidité ambiante) d'une part et avec des granulats saturés d'autre part. De plus, dans le cas du malaxeur Eirich il a été décidé d'introduire deux autres paramètres de malaxage pour étudier leurs influences sur l'objet de notre étude, à savoir, la vitesse de rotation et le sens.

Pour avoir une référence et pouvoir déterminer la diminution granulaire des bétons recyclés, un essai avec des granulats naturels est réalisé dans tous les cas.

3.3.1 Essais sur le malaxeur Planétaire SKAKO

1. Essais sur granulats recyclés secs

Avant l'expérimentation un lot de granulats ont été préparés (environ 80kg à humidité naturelle, séchés à l'air) puis l'humidité a été mesurée sur 3 échantillons de sable naturel (0,2%) et de granulats de béton recyclé (2,11%).

Pour obtenir une gâchée de 10L, l'essai s'est déroulé de la façon suivante :

- Prélèvement de 10 kg de granulat recyclé 10/14 dans le lot à humidité naturelle.
- Prélèvement de 10 kg de sable 0/2.5
- Prélèvement de 3,5 kg ciment.

Introduction dans le malaxeur à l'arrêt du ciment, sable et granulats recyclés 10/14.

Pesage de 2,6 litres d'eau dans la trémie d'eau. Cette valeur a été déterminée par des essais préliminaires, en réalisant l'essai d'affaissement au cône selon la norme NF EN 12350-2 [14].

L'affaissement visé se situe entre 10 à 15 cm et nous avons obtenu un affaissement de 12cm avec 2,6L d'eau d'ajout et un temps de malaxage de 180s (soit à mi-temps de notre étude).

Démarrage du malaxage avec 35 secondes de malaxage à sec puis introduction de l'eau (rapide) et un temps de malaxage humide de 35s, 55s, 180s (3minutes) et 300s (5 minutes).

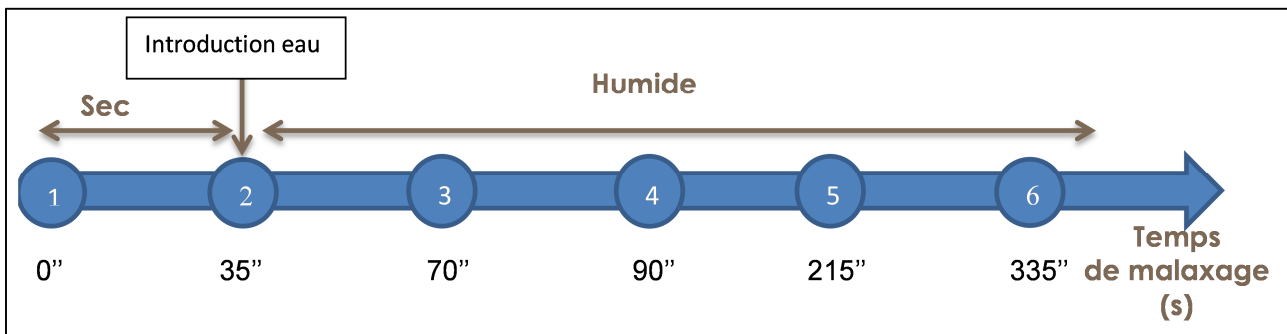


Figure 3 : Schéma de la méthode expérimentale

Après vidange :

- Tamisage sous eau sur un tamis de 2,5mm et lavage soigneux du refus.
- Séchage à l'étuve 70°C au moins 72 heures.
- Pesage à la sortie de l'étuve. Un soin particulier a été apporté au pesage rapide en sortie afin d'obtenir le poids réel du matériau sec, étant donné que le granulat recyclé a tendance à se réhydrater à l'air très rapidement.
- Refroidissement au moins 48 heures puis pesage afin d'étudier la réhydratation du matériau et de maîtriser celle-ci.
- Mis en sac.
- Mesure de la granularité au Vidéogranulomètre VDG.

2. Essais sur granulats recyclés saturés

L'essai se déroule de façon identique au protocole précédent mais une préparation préalable est nécessaire : un lot de granulats recyclés (environ 80 kg) est immergé dans l'eau au moins 48 heures puis est égoutté sur un tamis durant 2 heures. 3 mesures de teneurs en eau sont également effectuées afin de maîtriser l'humidité des granulats durant nos essais de malaxage, on obtient 6,11% de teneur en eau moyenne.

Le même protocole avec mesure d'affaissement est effectué afin de déterminer l'eau d'ajout nécessaire pour obtenir un affaissement compris entre 10 et 15 cm. Pour cette configuration l'eau d'ajout est de 2,1 litres d'eau ce qui a donné un affaissement de 13.5 cm.

3. Essais sur granulats naturels 10/14

Pour cet essai environ 30 kg de granulats naturels à humidité ambiante (0,16% de teneur en eau) ont été préparés.

L'essai se déroule de manière identique aux deux autres et l'eau d'ajout a elle aussi été quantifiée à travers l'essai d'affaissement pour obtenir 2,1l d'eau d'ajout par gâchée (identique au granulat recyclé saturé), pour un affaissement de 13cm. Pour cet essai avec granulat naturel, le temps de malaxage se limite à 35 secondes à sec et à 5 minutes humide.

4. Récapitulatif d'essais réalisés

	GR 10/14 « sec »	GR 10/14 « saturé »	GR 10/14 naturels
Pas de malaxage	oui	oui	oui
Malaxage à sec 35 s	oui	oui	
Malaxage à sec 35 s + humide 35 s	oui	oui	
Malaxage à sec 35 s + humide 55 s	oui	oui	
Malaxage à sec 35 s + humide 180 s	oui	oui	
Malaxage à sec 35 s + humide 300 s	oui	oui	oui

Soit 14 gâchées

Remarque : Pour les essais « pas de malaxage » les granulats recyclés subissent le même protocole (lavage, séchage, pesage, refroidissement, pesage, mesure VDG) sans passer dans le malaxeur.

3.3.2 Essais sur le malaxeur Eirich

1. Description des essais réalisés 1^{ère} campagne

Pour les essais sur le malaxeur Eirich le même protocole a été suivi mais en réduisant les quantités des matériaux utilisés pour faire des gâchées de 4L (capacité de la cuve). Cette quantité suppose un taux de remplissage de 48% tenant compte d'un 3% d'air occlus et estimant une densité de béton de 2300kg/m³. Les quantités de matériaux introduites, présentées ci-dessous, sont directement déduites du protocole précédent au malaxeur planétaire en passant d'un malaxage de 10l à 4l :

- Essais avec granulats de béton recyclé secs : 4 kg de granulats recyclés 10/14 dans le lot à humidité naturelle ; 4 kg de sable 0/2.5 ; 1,4 kg ciment et 0,95 litres d'eau.
- Essais avec granulats de béton recyclé saturés : 4 kg de granulats recyclés 10/14 préalablement immergés dans l'eau et égouttés pendant 2 heures ; 4 kg de sable 0/2.5 ; 1,4 kg ciment et 0,84 litres d'eau.
- Essais avec granulats naturels: 4 kg de granulats naturels 10/14 soit dans le lot à humidité naturelle ; 4 kg de sable 0/2.5 ; 1,4 kg ciment et 0,84 litres d'eau.

Des essais en faisant varier le sens de rotation de la cuve et du tourbillon ont été réalisés. Dans un premier temps avec le sens de rotation « normal » du malaxeur, nommé désormais « contre-courant » étant donné que cuve et tourbillon tournent dans le sens opposé l'un de l'autre.

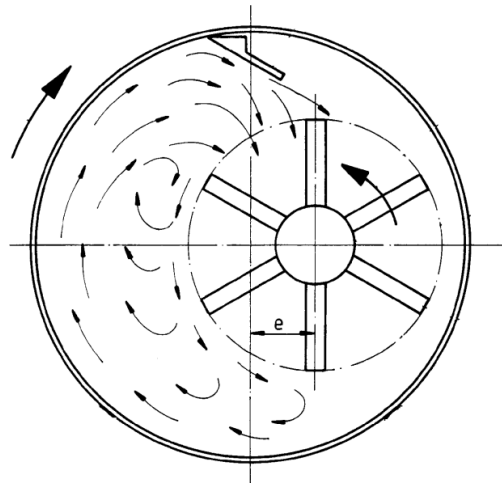


Figure 4 : Schéma du malaxeur Eirich en « contre-courant »

Des essais en inversant le sens de rotation du tourbillon ont ensuite été réalisés tout en conservant le reste des paramètres pour étudier l'influence du sens de rotation, cette fois le tourbillon tourne dans le « même sens » ou « co-courant » que la cuve.

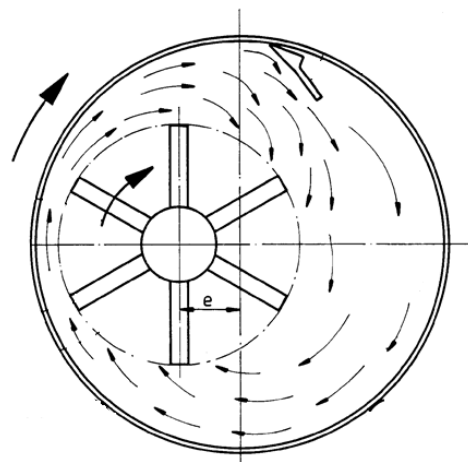


Figure 5 : Schéma du malaxeur Eirich en « co-courant »

Afin de compléter l'étude il a été décidé de faire varier un autre paramètre de malaxage tout en conservant les autres paramètres identiques. Des variations dans la vitesse de rotation du tourbillon ont été introduites, on passe d'une vitesse de rotation de 500 tours/min à une vitesse de 300 tours/min mais uniquement pour la modalité « granulats secs ».

Tableau récapitulatif des essais réalisés :

	GR 10/14 « sec »			GR 10/14 « saturé »		GN 10/14 naturels		
	« co-courant »	« contre-courant »		« co-courant »	« contre-courant »	« co-courant »	« contre-courant »	
	500 tr/min	300 tr/min	500 tr/min	500 tr/min	500 tr/min	500 tr/min	300 tr/min	500 tr/min
Pas de malaxage	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Malaxage à sec 35 s	oui	oui	oui	oui	oui			
Malaxage à sec 35 s + humide 35 s	oui	oui	oui	oui	oui			
Malaxage à sec 35 s + humide 55 s	oui	oui	oui	oui	oui			
Malaxage à sec 35 s + humide 180 s	oui	oui	oui	oui	oui			
Malaxage à sec 35 s + humide 300 s	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui

Soit 36 gâchées.

2. Description des essais 2^{de} campagne

- **Granulats « mauvais » MDE :**

Lors de la deuxième campagne expérimentale l'étude a été complétée tout d'abord avec des granulats de béton recyclés ayant un résultat au test Micro Deval (MDE) plus mauvais. Ils sont donc considérés comme peu résistants à l'usure par frottement. Afin d'obtenir ces matériaux un stratificateur densimétrique appelé JIG à eau a été utilisé. Le principe de cet appareil est de fluidiser le granulat par pulsation de l'eau à l'intérieur d'un bac étanche, les particules vont ainsi se déplacer, les plus lourdes en bas et les plus légères en haut. Le mode opératoire est de remplir 6 tiroirs et de ne conserver que les granulats des 2 tiroirs du dessus. A la suite, de cette manipulation des essais MDE sur le granulat « mauvais MDE » ont été réalisés ainsi que sur le granulat recyclé utilisé lors de la première campagne d'essai. Les résultats sont :

- GR mauvais MDE : **27**
- GR MDE 1^{ère} campagne : **21**

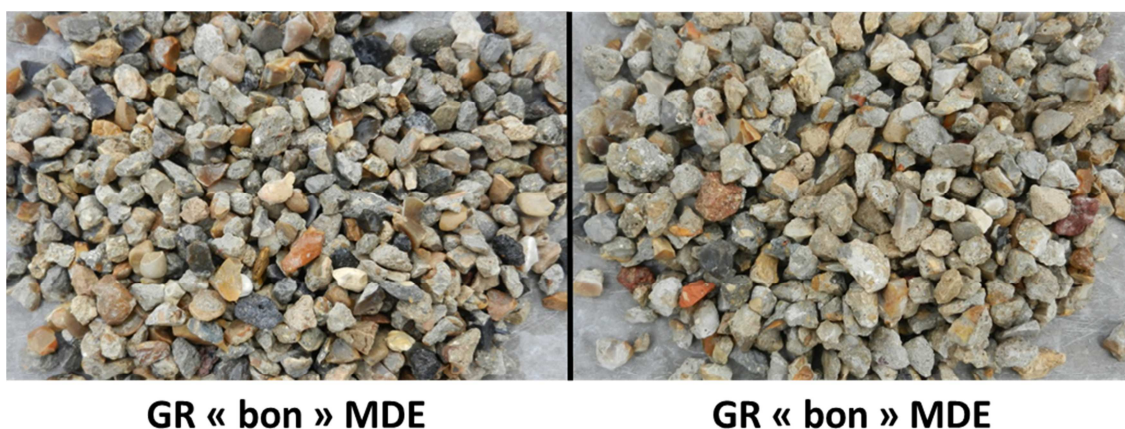


Figure 6 : A gauche granulats de béton recyclé avec un bon MDE ; à droite avec un mauvais MDE

La composition des gâchées est la suivante :

- Essais avec granulats de béton recyclé secs avec un mauvais résultat au MDE: 4 kg de granulats recyclés mauvais MDE 10/14 dans le lot à humidité naturelle ; 4 kg de sable naturel 0/2.5 ; 1,4 kg ciment et 1 litre d'eau.
- Essais avec granulats naturels: 4 kg de granulats naturels 10/14 soit dans le lot à humidité naturelle ; 4 kg de sable 0/2.5 ; 1,4 kg ciment et 0,90 litres d'eau.

Tableau récapitulatif des essais « mauvais » MDE :

	GR 10/14 « sec » mauvais MDE
	« contre-courant »
	500 tr/min
Pas de malaxage	oui
Malaxage à sec 35 s (sans ciment)	oui
Malaxage à sec 35 s (avec ciment)	oui
Malaxage à sec 35 s + humide 35 s	oui
Malaxage à sec 35 s + humide 55 s	oui
Malaxage à sec 35 s + humide 180 s	oui
Malaxage à sec 35 s + humide 300 s	oui

Soit 7 gâchées

- **Sables recyclés :**

Enfin des essais avec des sables recyclés de fraction 0,5/4 obtenus du même échantillon que les granulats ont été effectués. L'intérêt sera ici d'observer la création de passant à 0,5mm provenant d'un 0,5-4mm. Pour ces essais les quantités suivantes sont utilisées:

- Essais avec sables recyclés secs : 4 kg de granulats naturels 10/14 dans le lot à humidité naturelle ; 4 kg de sable recyclé 0,5/4 ; 1,4 kg ciment et 0,95 litres d'eau.

Le sable 0,5/4mm est obtenu par tamisage soigneux afin d'éliminer la fraction 0/0,5mm

Il faut préciser que pour cette campagne d'essais des granulats à l'état hydrique initial sec ont été utilisés (voir chapitre 3.1 pour la teneur en eau). Les essais issus de la première campagne ayant démontré que la différence entre un granulat sec et un granulat préalablement saturé n'était pas fondamentale. Egalement, seul le malaxeur Eirich, avec la configuration de « contre-courant » et 500tr/min, a été utilisé, au vu des résultats concluants obtenus lors de la première campagne d'essai (voir chapitre 4).

Tableau récapitulatif des essais sable recyclés :

	SR 0,5/4 « sec »
	« contre-courant »
	500 tr/min
Pas de malaxage	oui
Malaxage à sec 35 s (sans ciment)	oui
Malaxage à sec 35 s (avec ciment)	oui
Malaxage à sec 35 s + humide 35 s	oui
Malaxage à sec 35 s + humide 55 s	oui
Malaxage à sec 35 s + humide 180 s	oui
Malaxage à sec 35 s + humide 300 s	oui

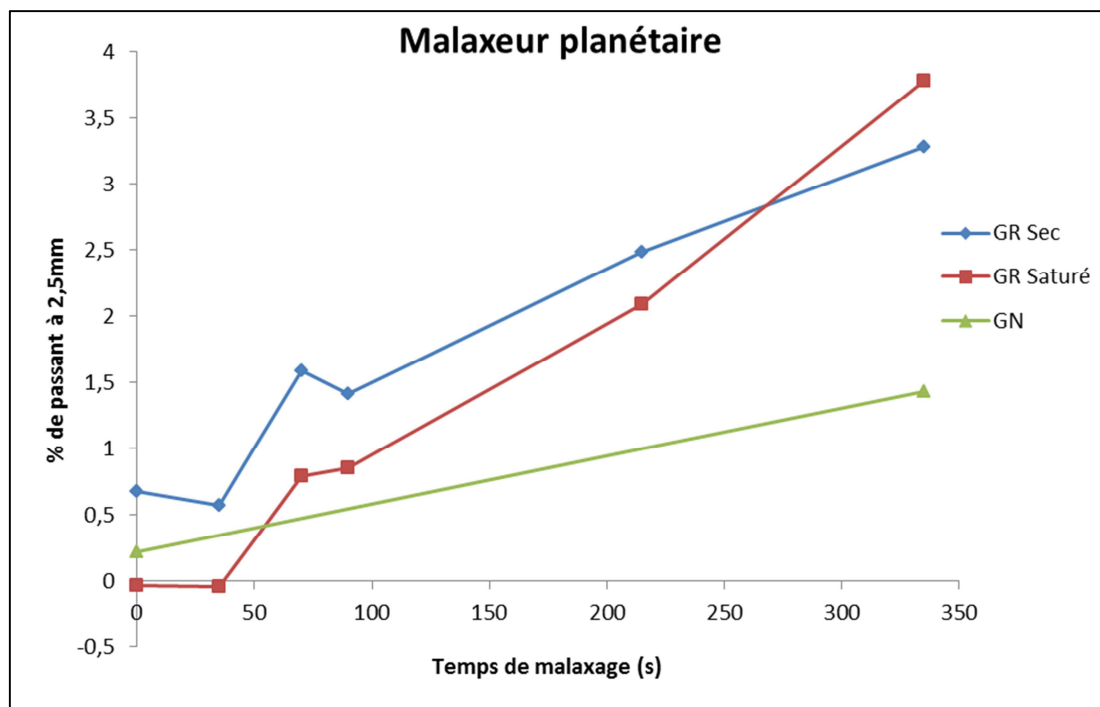
Soit 7 gâchées.

Une autre modalité introduite dans cette deuxième campagne, qui résulte de l'expérience acquise au cours de la première, est de faire un essai supplémentaire lors du malaxage à sec 35s, avec ciment et sans ciment. En effet, les essais de la première campagne avec la modalité 35s malaxage à sec n'ont pas été concluants car le ciment adhère aux granulats et fausse donc la mesure de poids. Cet effet est décrit plus précisément dans le chapitre 4. Ceci nous a également permis d'observer l'influence de la présence ou non de ciment sur la création de passant et sur la granulométrie.

4 Résultats et discussion

4.1 Etude des fractions granulaires inférieures à 2,5mm produites lors du malaxage avec le malaxeur planétaire

Les différents lots de granulats de béton recyclés (GR Sec ; GR Saturé) et naturels (GN) utilisés pour cette étude, subissent un malaxage avec les autres constituants, cités au chapitre précédent, avec différents temps de malaxage et avec deux états hydriques : sec et saturé. Le but de cette partie est d'étudier la création de particules fines passant au tamis de 2,5mm. L'évolution des passants à 2,5mm des différents essais est représentée dans le Graphique 3 :



Graphique 3 : Evolution du passant à 2,5 mm en fonction du temps de malaxage avec le malaxeur planétaire

Pour un temps de 0 seconde on effectue un lavage des constituants étudiés sans effectuer de malaxage ce qui permet de déterminer le pourcentage de particules fines présentes avant le malaxage.

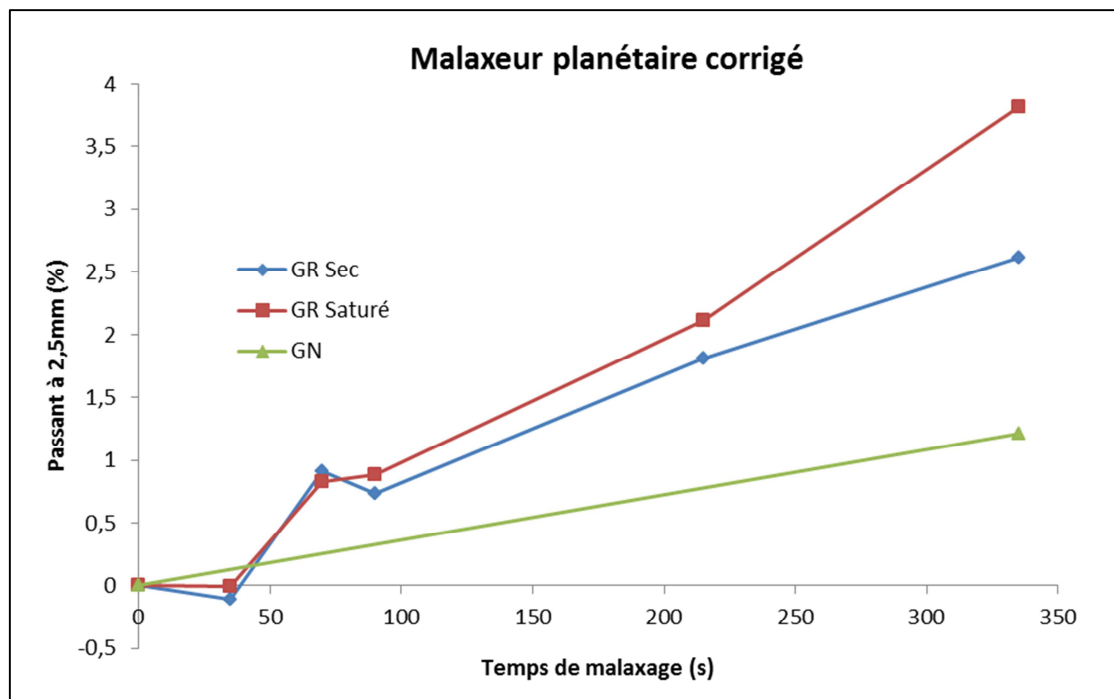
On peut observer que l'évolution de création de particules inférieures à 2,5mm présente une grande croissance à partir de l'introduction de l'eau à 35 sec jusqu'à 70 secondes (ce qui représente un temps de malaxage utilisé traditionnellement pour la fabrication du béton au niveau industriel), puis à partir de 70 sec le taux de création de particules inférieures à 2,5 mm présente une évolution linéaire. Il est apparu lors de nos essais que la quantification de passant à 2,5mm créée durant **le malaxage à sec 35s** n'est pas exploitable. En effet, durant le malaxage uniquement à sec les fines de ciment viennent se coller aux granulats et faussent la mesure. La photo ci-dessous présente ce phénomène :



Figure 7 : Fines de ciment collées aux granulats

Malgré un lavage soigné, il n'a pas été possible de retirer ce ciment adhérent. Ce phénomène disparaît lorsque nous introduisons l'eau car les fines vont s'incorporer dans la pâte.

Par ailleurs, nous pouvons penser que la comparaison des données obtenues lors du malaxage n'est pas possible directement puisqu'il y a une présence initiale de fines, dans les granulats secs et dans les granulats naturels, qui ne sont pas créées à cause du malaxage. Par contre, les granulats saturés ne contiennent pas de fines au départ, cela s'explique par l'immersion en eau préalable qui va enlever les fines. Pour faire une comparaison réelle de fines créées lors du malaxage on corrige les résultats en fonction de la présence initiale de fines, on obtient ainsi les courbes du graphique 4 suivant.



Graphique 4 : Evolution du passant à 2,5 mm corrigée en fonction du temps de malaxage avec le malaxeur planétaire

Dans ce cas de figure, avec les valeurs corrigées on observe la création réelle de particules inférieures à 2,5mm pendant le malaxage du béton.

En ce qui concerne l'influence du paramètre initial de saturation des granulats recyclés, on observe que la quantité de particules inférieures à 2,5mm est plus élevée quand on part d'une condition initiale de

granulats recyclés saturés que lorsqu'on malaxe avec des granulats secs (humidité ambiante). La création de passants à 2,5 mm pour un granulat de départ sec est d'environ 2.6% alors que pour un granulat initial saturé on est à environ 3.6%.

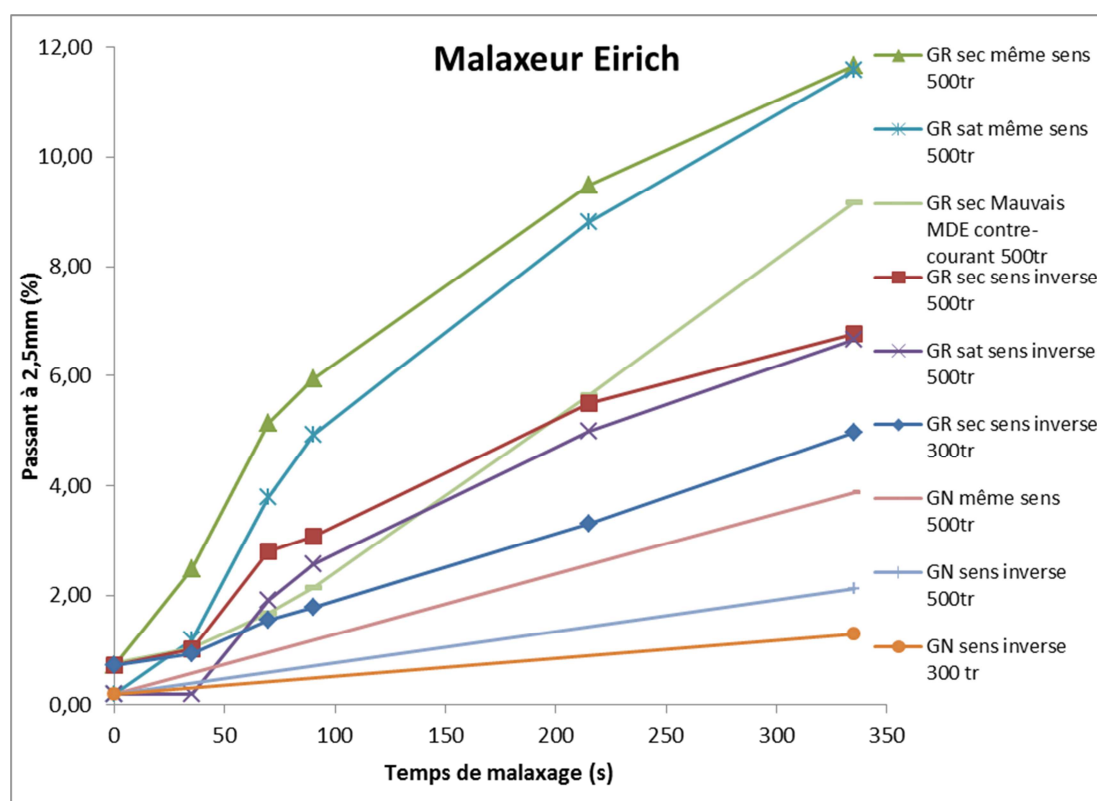
A l'aide d'un autre système de malaxage nous allons observer si les mêmes ordres de grandeurs et les mêmes évolutions apparaissent.

4.2 Etude des fractions granulaires inférieures à 2,5mm produites lors du malaxage avec Eirich.

4.2.1 Etude des fractions granulaires inférieures à 2,5mm produites lors du malaxage des granulats de fraction 10/14

Par la suite, nous avons étudié les fractions granulaires plus fines produites lors du malaxage avec un malaxeur de laboratoire Eirich. Les différences de contraintes appliquées entre ce malaxeur et le malaxeur planétaire sont décrites précédemment.

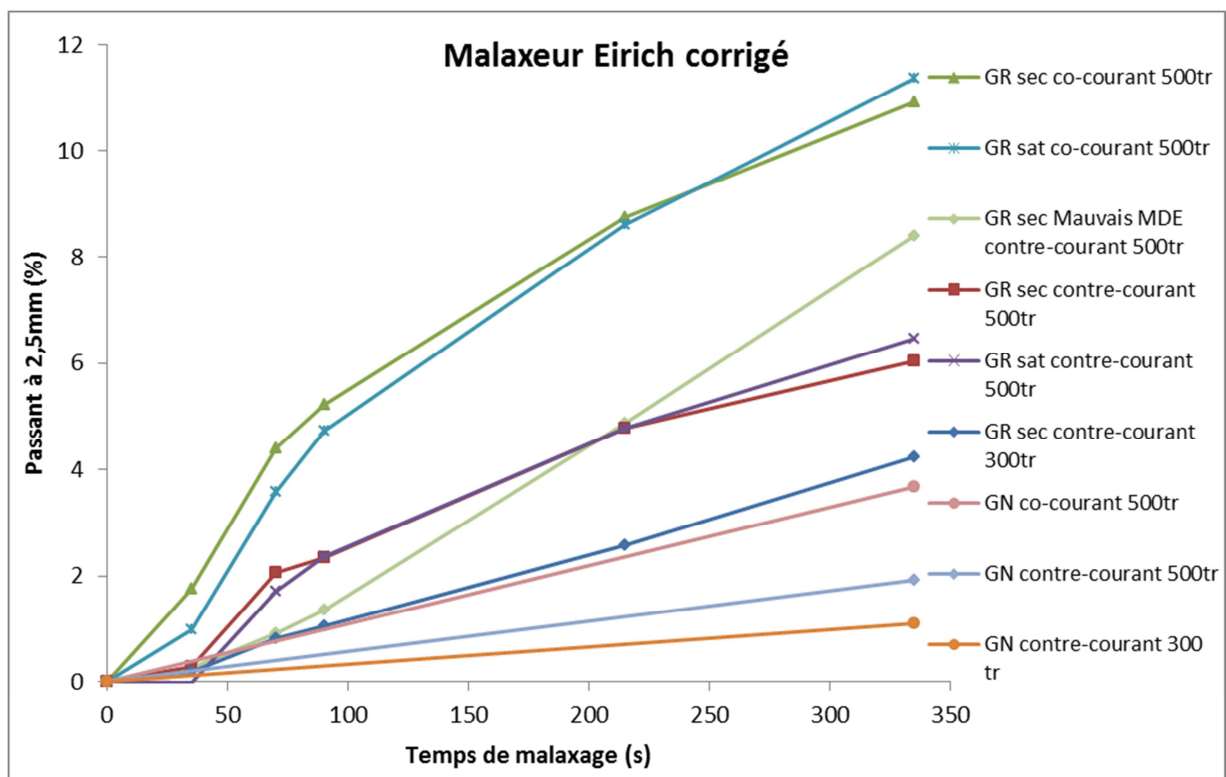
Nous avons introduit de nouveaux paramètres d'études en modifiant la vitesse de rotation de l'agitateur ainsi que le sens de rotation.



Graphique 5 : Evolution du passant à 2,5 mm en fonction du temps de malaxage avec le malaxeur Eirich

Comme lors des essais avec le malaxeur planétaire on observe toujours une tendance linéaire dans tous les essais réalisés on constate une forte croissance entre le moment où on introduit l'eau et 70 sec avec puis à partir de 70 sec une croissance constante mais moins prononcée. Entre l'instant 0s et 35s il existe croissance quasiment nulle qui correspond au malaxage à sec, dû au phénomène des fines de ciment collées aux granulats, sauf pour les malaxages où on a le même sens de rotation cuve et agitateur, car ici, la sollicitation est suffisamment intense pour créer plus de particules inférieures à 2,5mm que de ciment adhérent aux granulats.

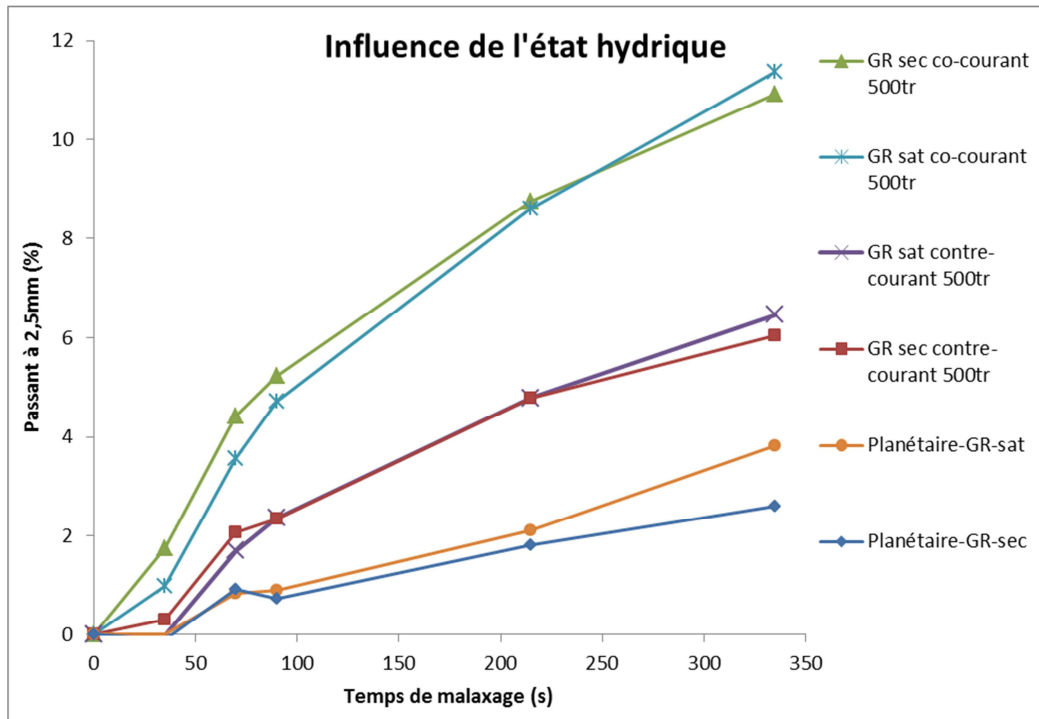
Pour continuer avec notre étude nous allons corriger les valeurs, comme précédemment, afin d'éliminer l'influence des fines présentes dans les échantillons au début des essais (graphique 6).



Graphique 6 : Evolution du passant à 2,5 mm corrigée en fonction du temps de malaxage avec le malaxeur Eirich

Le premier commentaire à faire est la grande différence de valeurs qu'il y a entre ce malaxeur et le planétaire en ce qui concerne le pourcentage de création de fractions fines. Ici, la création de fines va jusqu'à 11,3% pour le cas le plus défavorable tandis que pour les essais avec le malaxeur planétaire la valeur la plus défavorable est de 3,8%. Il y a donc environ 3 fois plus de fractions inférieures à 2,5mm créées avec ce type de malaxage.

4.3 Influence de l'état hydrique initial des granulats recyclés sur la création de particules inférieures à 2.5 mm.



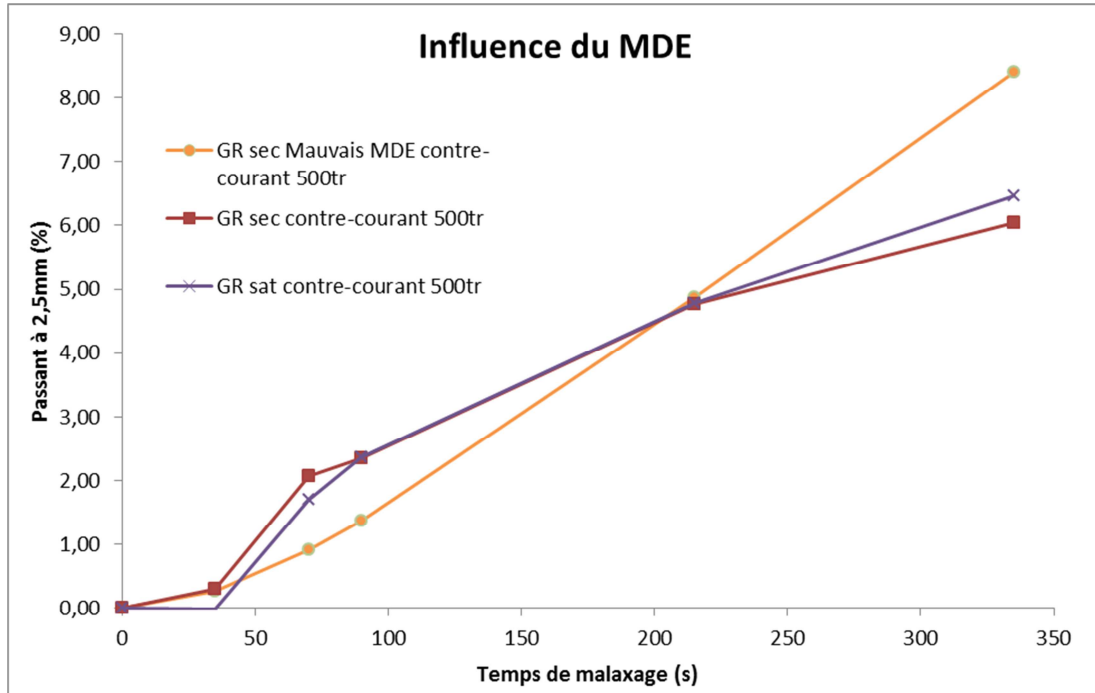
Graphique 7 : Comparaison de l'évolution du passant à 2,5 mm entre GR saturés et secs pour les différents malaxeurs et configurations

On ne voit pas de différence claire entre la création de particules fines des granulats précédemment saturés et des granulats initialement secs. On ne peut donc pas tirer des conclusions sur l'influence de l'état hydrique initial sur la création de fines.

4.4 Essais 2^{ème} campagne

4.4.1 Essai granulat mauvais MDE

En ce qui concerne l'étude de la fraction granulaire inférieure à 2,5mm réalisée sur les échantillons de granulats de bétons recyclés de fraction 10/14 et un mauvais résultat lors du test MDE, les résultats sont présentés ci-dessous :



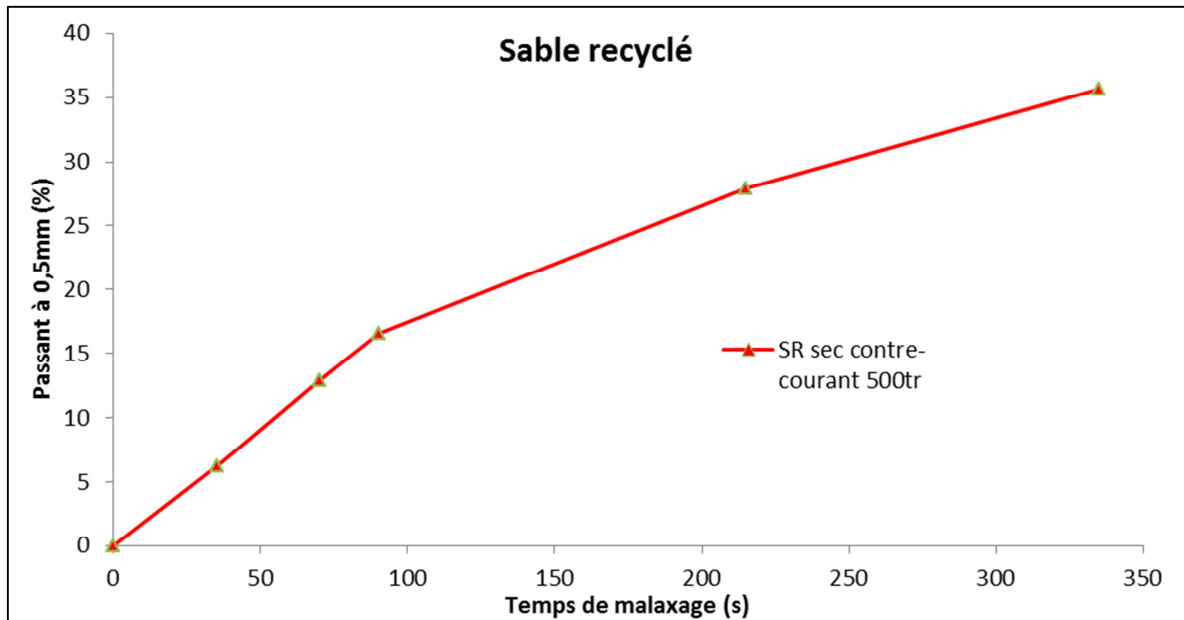
Graphique 8: Evolution corrigée du passant à 2,5 mm en fonction du temps de malaxage avec le malaxeur Eirich

Le malaxage de granulats avec un « mauvais » MDE avec une valeur de 27 entraîne une création de passant à 2,5mm supérieure aux granulats avec un MDE de 21. Cette apparition de passant est pourtant inférieure jusqu'au point 90s. Une explication probable de ce phénomène est que le GR MDE 27 est composé en plus grande partie de mortier adhérent, tandis que le GR MDE 21 contient une proportion plus grande de particules de granulats naturels. Pour le GR MDE 21 l'interface granulats naturels mortier adhérent est moins résistante, les grains vont donc se détacher plus rapidement, jusqu'à ce que le granulat d'origine présente plus de grains naturels à l'attrition ce qui le rend donc moins friable. Lorsque l'on observe l'évolution de la création de particules inférieures à 2,5mm pour le GR MDE 27, on constate une évolution plus linéaire car les particules de mortier vont se détacher de manière régulière, alors que le GR MDE 21 a une évolution avec deux pentes distinctes. De 35s à 70s l'évolution est rapide puis la vitesse de réduction de l'échantillon diminue.

L'étude de l'angularité présentée au paragraphe 4.7.9 conforte également cette hypothèse, puisque l'angularité des grains diminue constamment pour le MDE 27 alors que les granulats recyclés MDE 21 retrouvent de l'angularité après 180 s de malaxage.

4.4.2 Etude des fractions granulaires inférieures à 0,5mm produites lors du malaxage des sables recyclés 0,5/4

En ce qui concerne l'étude de la création de particules inférieures à 0,5mm lors du malaxage d'un sable recyclé de fraction 0,5/4, les résultats sont présentés ci-dessous (graphique 8) :

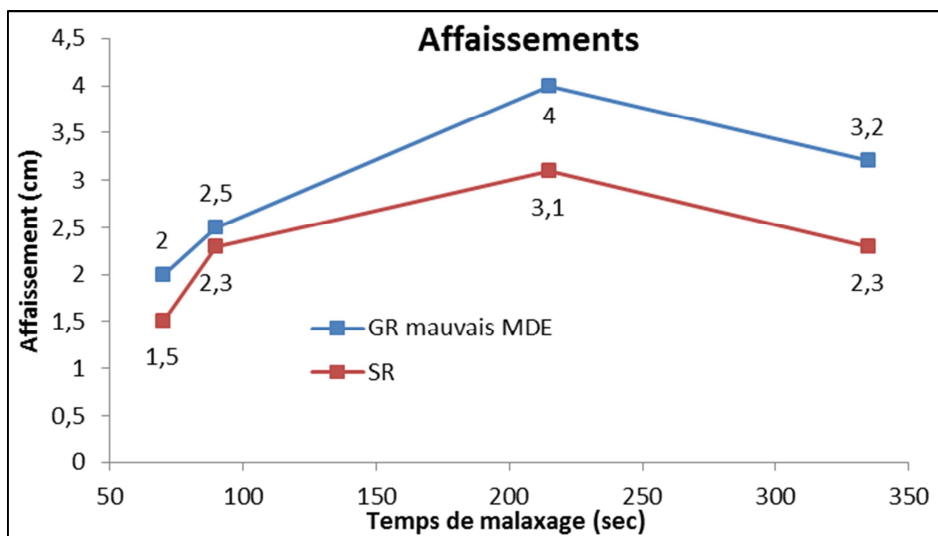


Graphique 9 : Evolution corrigée du passant à 0,5 mm du sable recyclé en fonction du temps de malaxage.

Des résultats surprenants sont constatés, non pas sur l'évolution des courbes puisqu'elles présentent les mêmes évolutions précédemment expliquées, mais au niveau des pourcentages de création obtenus. On arrive à obtenir plus de 35% de passants à 0,5mm créés lors du malaxage de sables recyclés.

4.4.3 Essai d'affaissement

Des essais d'affaissement au cône ont été réalisés à la suite de chaque gâchée en utilisant le cône pour la table à secousses (essai DIN NF EN 12350-5). Les résultats sont présentés ci-dessous :



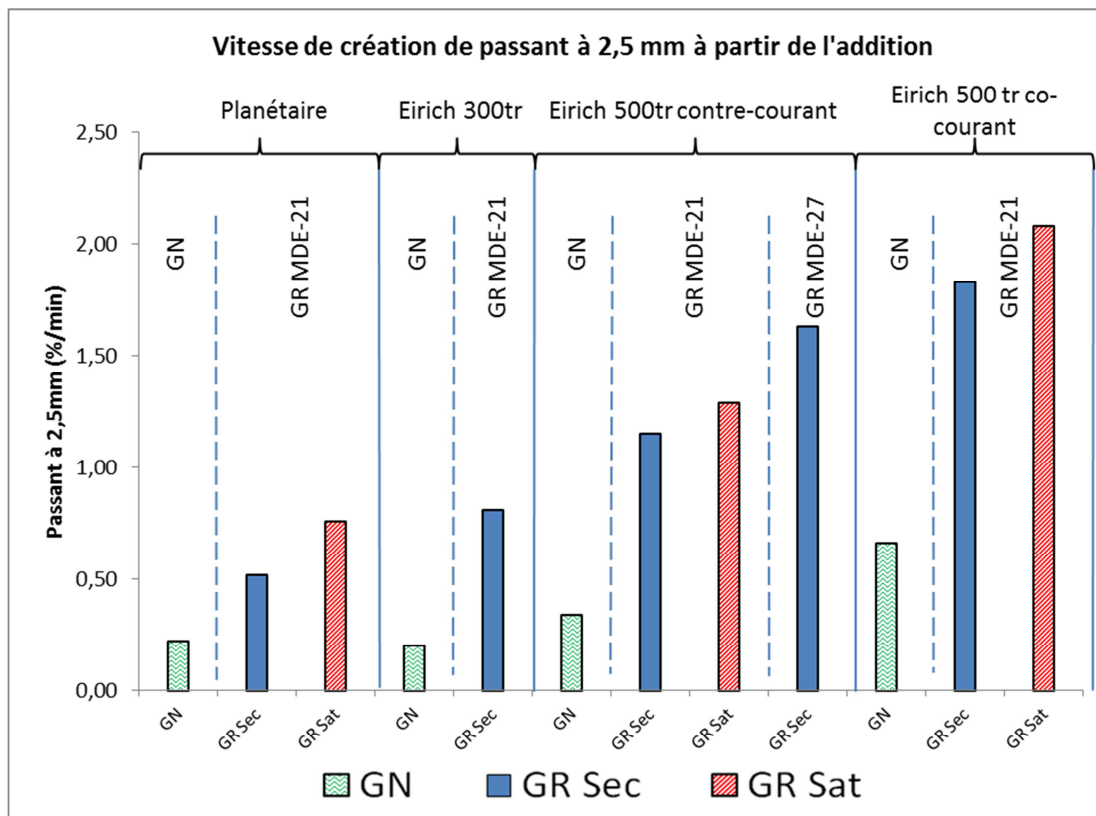
Graphique 10 : Affaissements en fonction du temps de malaxage.

On constate que l'affaissement augmente jusqu'à 180s de malaxage humide puis diminue à 300s dans les deux cas. Ceci peut s'expliquer par le fait que les fines créées vont tout d'abord permettre une meilleure maniabilité des grosses particules (augmentation de la compacité maximale à compacité réelle constante). Lorsque la création des fines fait diminuer la compacité maximale (à compacité réelle constante) la maniabilité diminue.

4.5 Taux de création de passant par minute

Etant donné que les résultats présentés jusqu'à présent sont peu parlants en termes de vitesse de création de passants à 2,5 mm et qu'en milieu industriel les temps de malaxage sont plus courts, les résultats sont exprimés en formation de passant à 2,5 mm par minute de malaxage.

		Taux de création de passant à 2,5 mm par minute (depuis l'addition d'eau)
Malaxeur planétaire	GR sec	0,52
	GR sat	0,76
	GN	0,22
Malaxeur Eirich	GR sat co-courant 500tr	2,08
	GR sec co-courant 500tr	1,83
	GR sec contre-courant 500tr	1,50
	GR sat contre-courant 500tr	1,29
	GR sec contre-courant 300tr	0,81
	GN co-courant 500tr	0,66
	GN contre-courant 500tr	0,34
	GN contre-courant 300tr	0,20
	GR sec Mauvais MDE contre-courant 500tr	1,63
	SR sec contre-courant 500tr	5.90

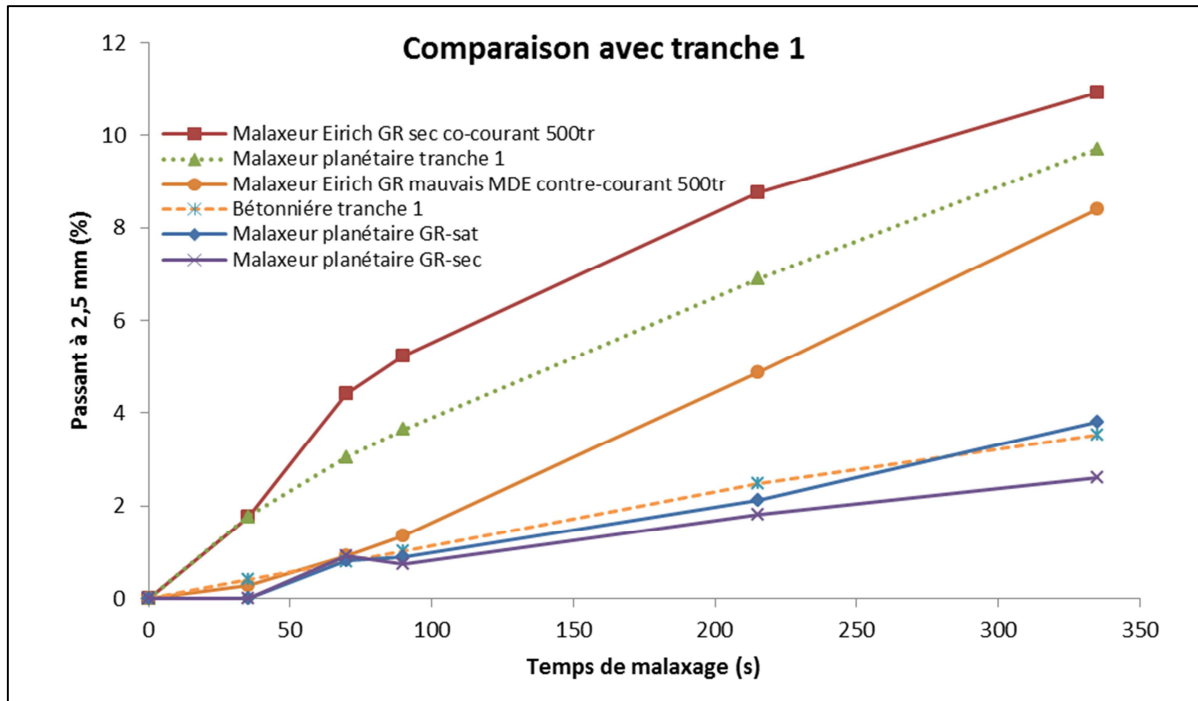


Graphique 11: Vitesse de création de passant à 2,5 mm par minute de malaxage en fonction du type de malaxeur et des configurations des malaxeurs.

On déduit de ces résultats que pour le cas le plus extrême de chaque malaxeur il y a 2,7 fois plus de création de passant à 2,5 mm pour un malaxeur de type Eirich que pour un malaxeur planétaire.

Il est observé également que pour une configuration Eirich contre-courant, 500tr/min et un état hydrique sec initial il y a 3,9 fois plus de création de passant pour les **sables recyclés** que pour les **granulats recyclés**.

4.6 Comparaison avec les résultats de la tranche 1



Graphique 12 : Comparaison de l'évolution du passant à 2,5 mm en fonction du temps de malaxage entre les différents malaxeurs + études de la tranche 1

Pour rappel, lors de la tranche 1 de ce PN [1] le même type d'essais ont été réalisés. La différence est que le malaxage n'était pas dans une pâte cimentaire mais le granulat seul, avec eau dans la bétonnière et sans eau dans le malaxeur planétaire SKAKO. Les granulats étaient donc plus exposés à l'action mécanique des différentes parties du malaxeur. Il faut donc préciser que la comparaison des résultats est relative mais permet d'avoir une étendue des particules fines créées sous différentes contraintes.

Dans le malaxeur planétaire utilisé lors des deux campagnes d'essais, on observe que la création de particules inférieures à 2,5 mm est plus de deux fois supérieure lorsque que le granulat n'est pas protégé dans sa pâte. On peut donc conclure que le fait de malaxer dans une pâte cimentaire permet de diminuer nettement la production de particules. Ils amortissent d'une part les impacts mécaniques des pales du malaxeur et d'autre part ils ont une fonction lubrifiante pour éviter l'attrition entre pales et cuve.

4.7 Résultats du VDG

Un Vidéogranulomètre mesure la répartition granulaire des mélanges, il est conçu pour caractériser avec rapidité la granularité et la forme des matériaux de construction routière et de génie civil. L'appareil est conçu pour effectuer l'essai selon la norme XP P 18-566 [15]. Cet essai peut être utilisé en tant qu'essai alternatif pour la distribution granulométrique.

Les performances du VDG lui permettent d'analyser l'intégralité des particules composant un échantillon avec une excellente fidélité. La différence qui existe entre l'essai au vidéogranulomètre et un essai granulométrique selon la norme NF EN 933-3 [16] réside dans le fait que le VDG effectue son calcul sur la base de l'ombre du grain perçu, donc il aura une granulométrie en volume et non en poids comme pour l'essai traditionnel.

L'échantillon est introduit dans un réservoir d'alimentation, les constituants sont conditionnés de manière à tomber selon une dynamique maîtrisée devant un analyseur optique. Un algorithme logiciel traite les images afin d'extraire les informations relatives à chaque granulat.

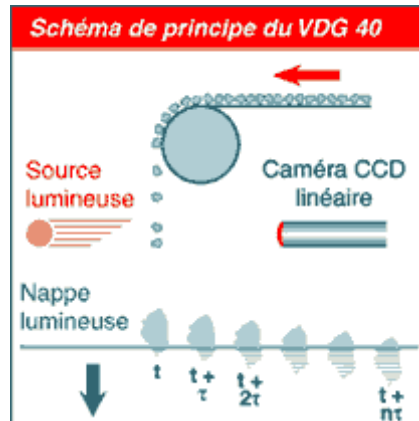
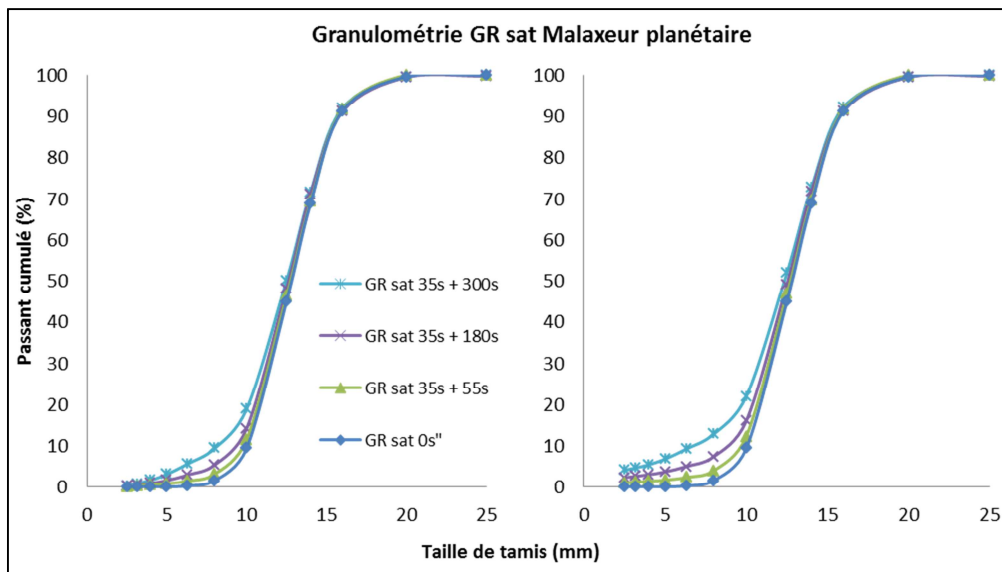


Figure 8 : Schéma du principe de fonctionnement du VDG

4.7.1 Résultats de la granulométrie malaxeur planétaire

Les résultats de la granulométrie effectuée sur les échantillons provenant du malaxage avec le malaxeur planétaire sont présentés ci-dessous :



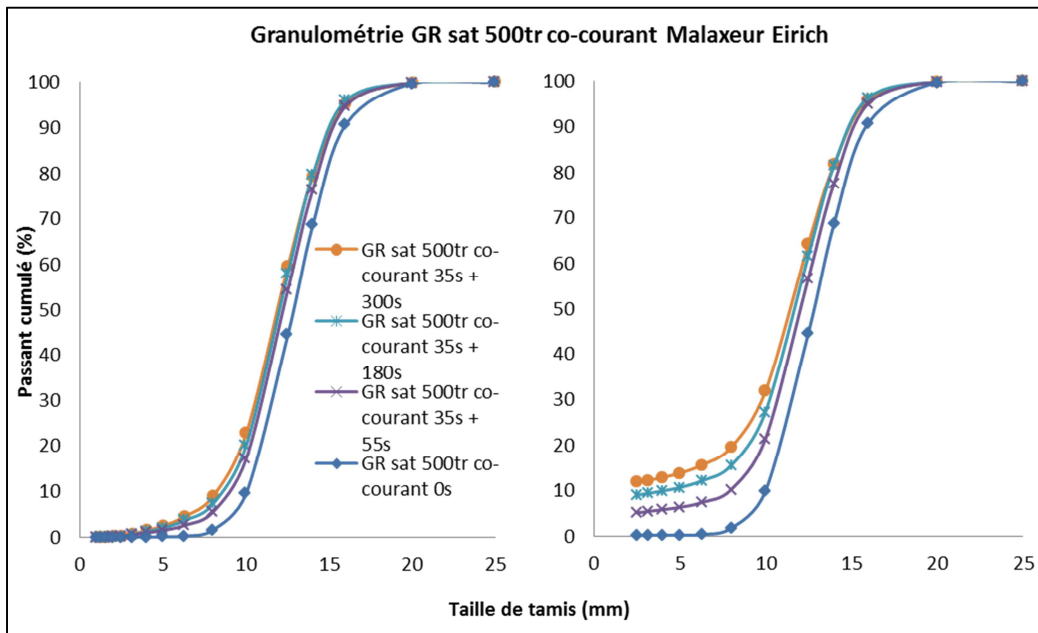
Graphique 13 : Courbes granulométriques des différents échantillons issus du malaxeur planétaire. A gauche les mesures issues du VDG, à droite les mesures tenant compte des passants à 2,5 mm.

Un déplacement des courbes est clairement observé au fur et à mesure qu'on augmente le temps de malaxage. Il y a une création de particules de granulométrie 2.5/10 qui augmente avec le temps de malaxage. Tout cela est en concordance avec les résultats obtenus précédemment.

On observe également que la réduction granulométrique de l'échantillon d'origine 10/14 est très lente ce qui indique que la variation est due à l'attrition entre les grains qui va faire diminuer progressivement la dimension des grains et créer des fines de mortier adhérent.

Observons dans le chapitre suivant les courbes obtenues après malaxage au malaxeur Eirich.

4.7.2 Résultats de la granulométrie malaxeur Eirich

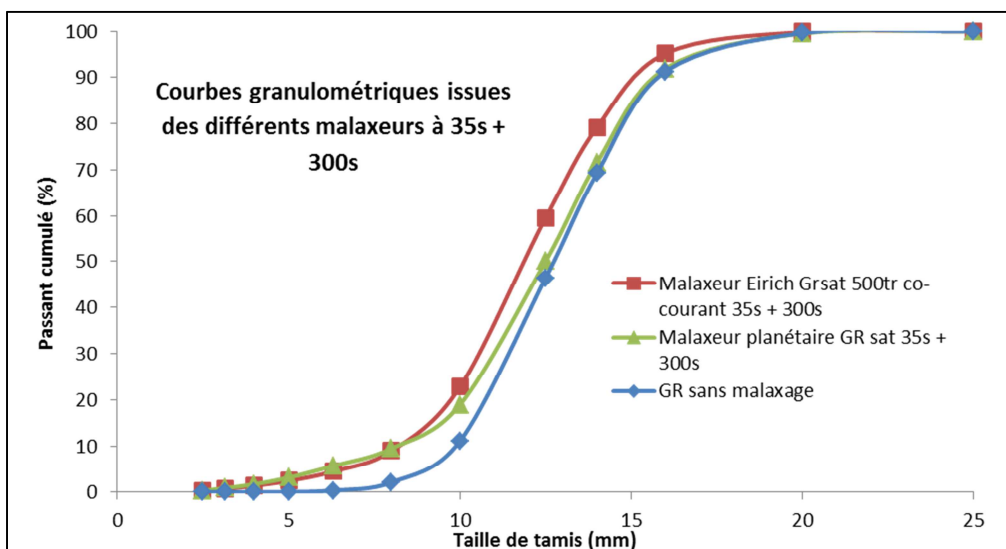


Graphique 14 : Courbes granulométriques des différents échantillons issus du malaxage avec Eirich. A gauche les mesures issues du VDG, à droite les mesures tenant compte des passants à 2,5 mm.

Parallèlement aux résultats obtenus avec le malaxeur planétaire on observe une claire augmentation en fonction du temps de malaxage de la fraction granulaire 2.5/10 par rapport à l'échantillon initial sans malaxage.

En revanche, ce qui attire l'attention par rapport aux résultats précédents, c'est le déplacement dès le fuseau granulométrique d'origine 10/14. On confirme donc que les différents types de contraintes appliquées en fonction du malaxeur ont une influence sur le type de réduction de l'échantillon. Cet effet est observé dans le chapitre ci-dessous.

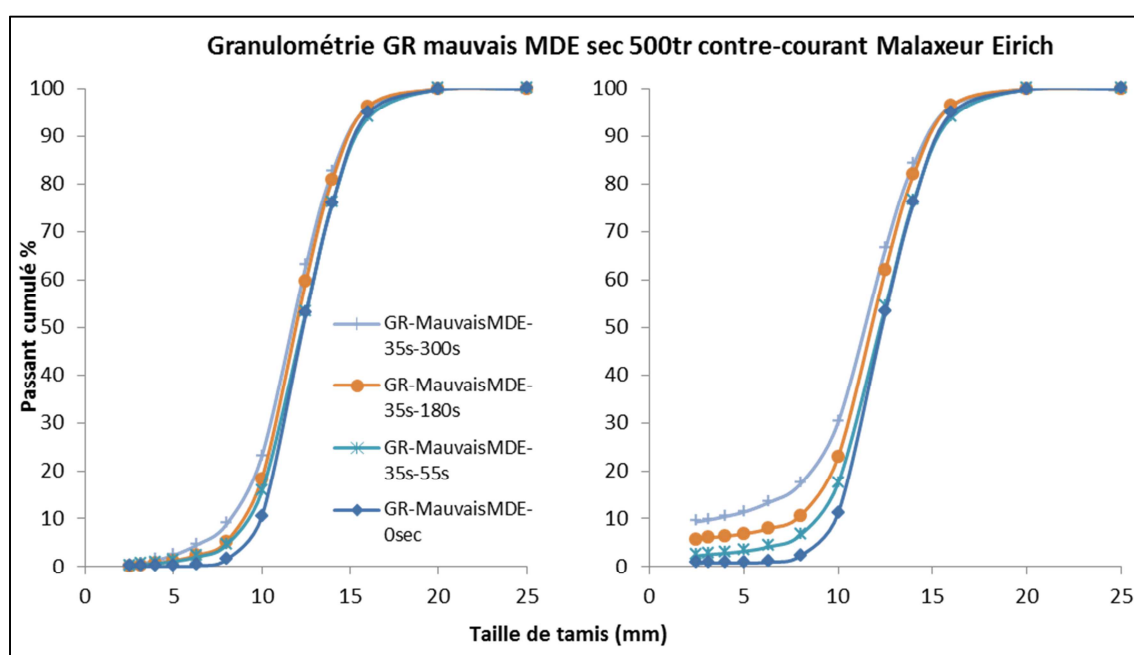
4.7.3 Comparaison malaxeur planétaire / Eirich



Graphique 15 : Comparaison des courbes granulométriques issues des différents malaxeurs à 335 secondes de malaxage (mesures obtenues du VDG). Combinaisons les plus défavorables pour la création de passants à 2,5mm.

Sur ce graphique la création de passant à 2,5mm n'est pas prise en compte afin de pouvoir étudier l'évolution propre à la fraction 2,5/14mm. On observe clairement sur ce graphique la différence d'évolution des courbes granulométriques en fonction du malaxeur par rapport à la courbe de référence du granulats recyclés sans malaxage. On peut voir que pour les fractions allant de 2,5 à 8mm il n'y a pas de différence entre le malaxeur Eirich et le planétaire mais entre 8 et 15mm la sollicitation des grains est différente. Pour le malaxeur planétaire, la sollicitation sur les grains semble moins forte et la variation granulométrique plus progressive. Des particules de mortier adhérent vont s'effriter en faisant évoluer le fuseau granulométrique progressivement jusqu'à créer du passant à 8 non-existant sur le GR sans malaxage. Pour le malaxeur Eirich, les contraintes sont plus prononcées et la variation granulométrique apparait dès le haut du fuseau granulométrique à 14mm.

4.7.4 Résultats de la granulométrie malaxeur Eirich mauvais MDE

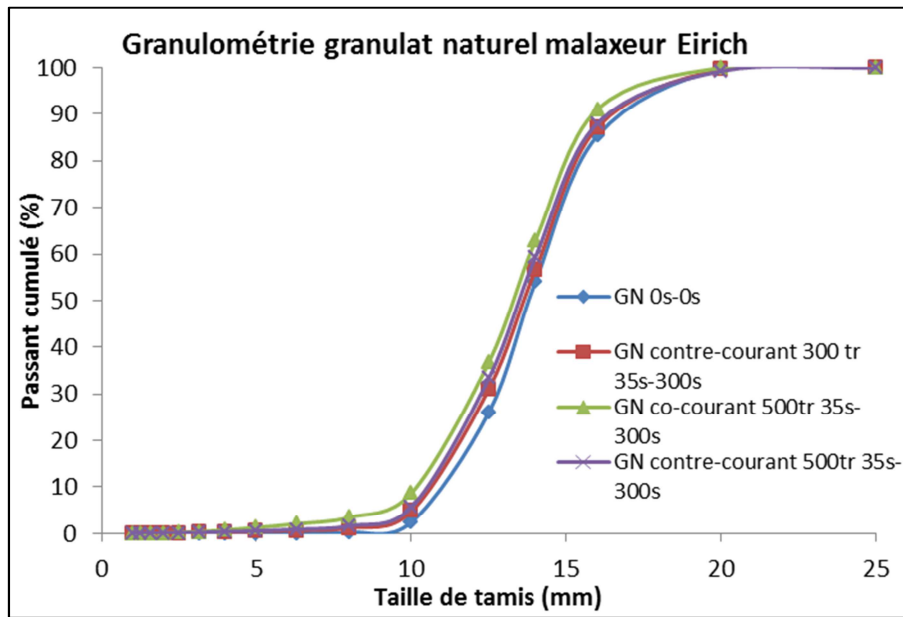


Graphique 16 : Courbes granulométriques malaxeur avec Eirich pour les granulats recyclés à mauvais MDE. A gauche sans les mesures issues du VDG, à droite les mesures tenant compte des passants à 2,5 mm.

Parallèlement au graphique 14, tout le fuseau granulométrique est affecté à cause des contraintes plus élevées exercées par le malaxeur Eirich par rapport au malaxeur planétaire.

Par contre, on observe une évolution plus constante de la granulométrie des granulats recyclés avec mauvais MDE que pour les granulats avec un bon MDE. Sur le graphique 14 il existe une grande évolution initiale entre 0 et 70 secondes de malaxage puis l'évolution diminue et reste constante en fonction du temps de malaxage. Pour expliquer ce phénomène on reprend l'explication donnée pour le graphique 8 où on constate que pour le GR MDE 21 les grains vont donc se détacher plus rapidement à cause d'une interface granulats naturels/mortier adhérent moins résistante, tandis que pour le GR MDE 27, on constate une évolution plus linéaire toute au long du malaxage car les particules de mortier vont se détacher de manière régulière. Le GR MDE 21 a une évolution avec deux pentes distinctes, de 35s à 70s l'évolution est rapide puis la vitesse de réduction de l'échantillon diminue.

4.7.5 Résultats de la granulométrie malaxeur Eirich granulats naturels



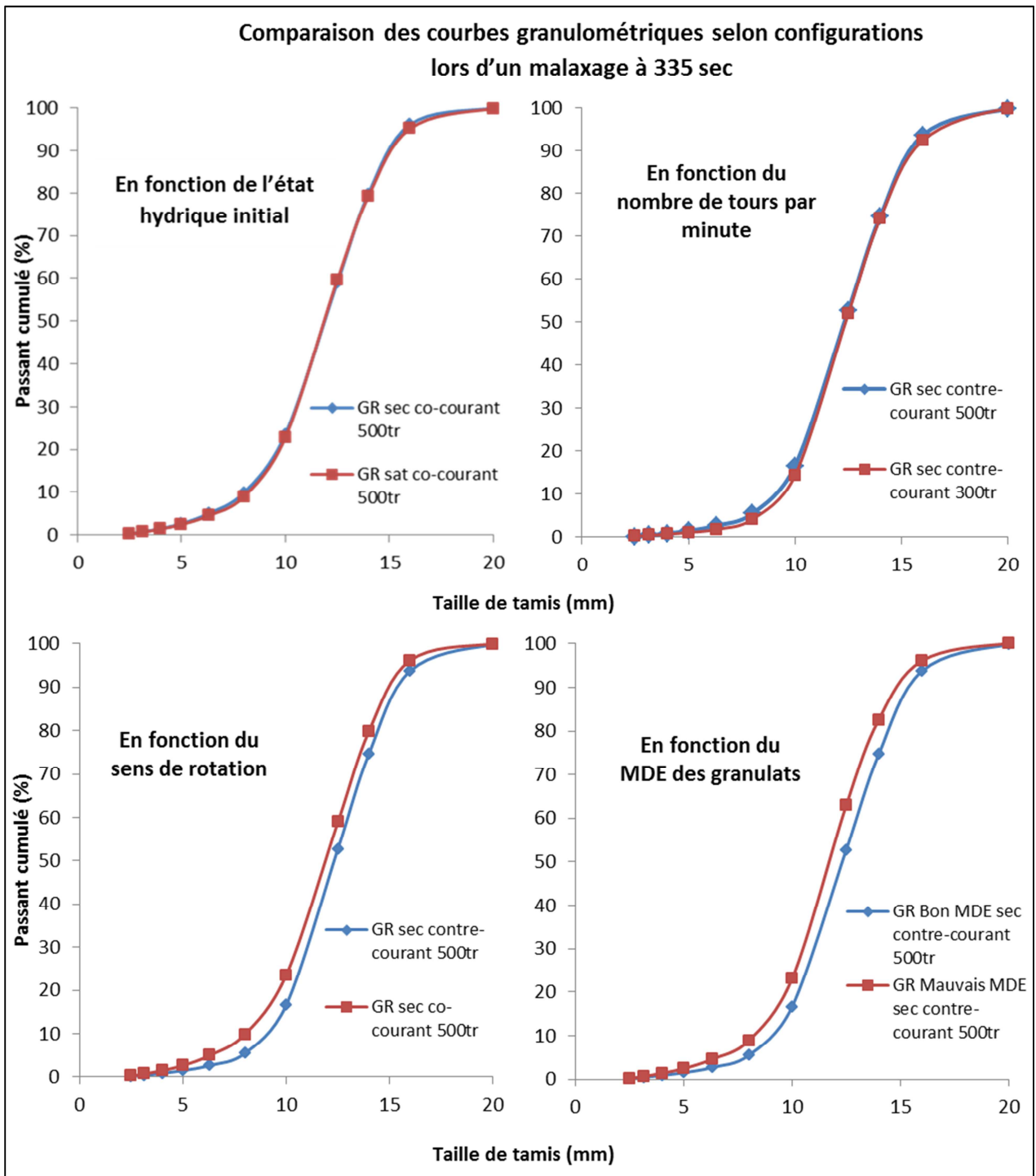
Graphique 17 : Courbes granulométriques des différents échantillons issus du malaxage avec Eirich pour les granulats naturels. Mesures obtenues du VDG sans prendre en compte la création de passant à 2,5mm.

Ce graphique nous montre qu'avec une même configuration et un même matériau, une augmentation de la vitesse de malaxage provoque une évolution de la courbe granulométrique qui se traduit par la perte de masse déjà expliquée précédemment.

De plus on peut observer que pour un même matériau et une même vitesse, le fait de changer le sens de rotation du tourbillon implique une réduction granulaire considérable de notre matériau. On peut donc conclure qu'à grande vitesse, une configuration en co-courant est plus agressive qu'une configuration en contre-courant.

4.7.6 Comparaison des différentes modalités

On compare ci-dessous l'influence des différentes modalités de configuration, des états hydriques initiaux et le MDE sur l'évolution des courbes granulométriques :



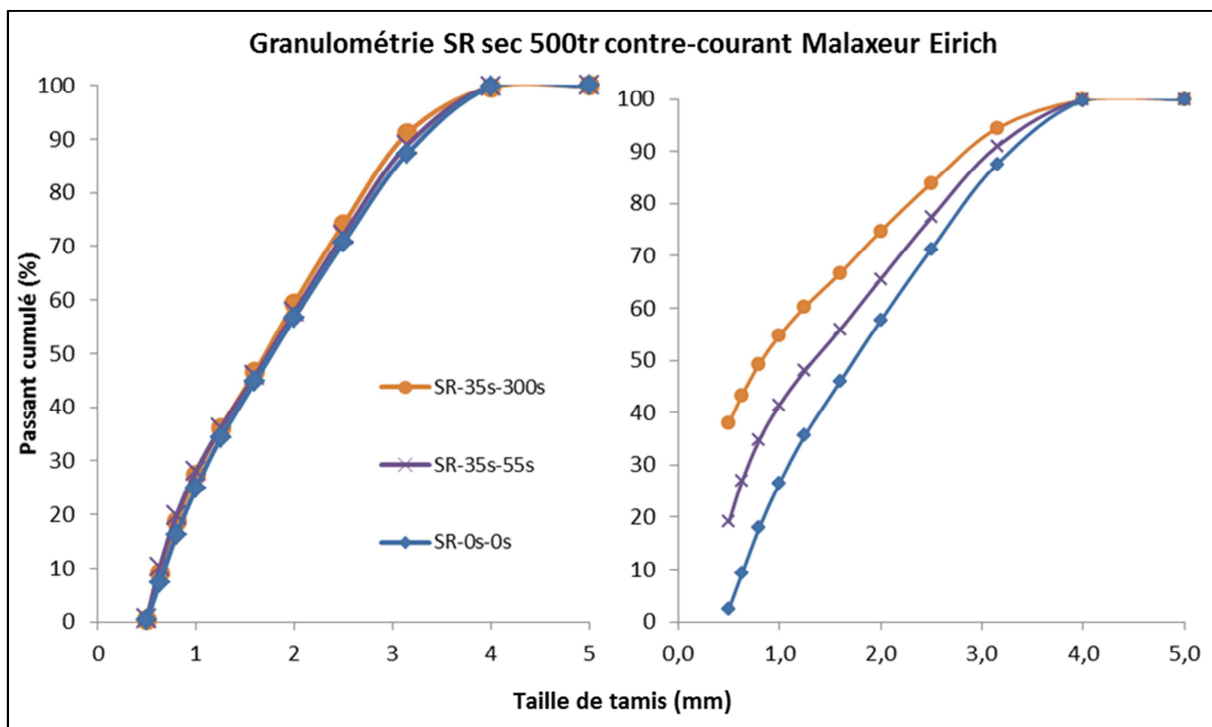
Graphique 18 : Comparaison entre les différentes courbes granulométriques pour un temps de malaxage de 335 secondes et différentes configurations dans le malaxeur Eirich. Mesures obtenues du VDG sans prendre en compte la création de passant à 2,5mm.

A partir de ces graphiques on peut tirer les informations suivantes :

- Il y a très peu d'écart dans la variation de la taille granulaire de l'échantillon avec un état hydrique initial sec par rapport au saturé. Ceci est en concordance avec la création de passants à 2,5 mm étudiée. On ne peut pas donc tirer beaucoup de conclusions sur l'influence de l'état hydrique initial des granulats sur la création de particules fines et la diminution de la taille granulaire.
- En ce qui concerne l'influence de la vitesse de rotation des pâles, on observe clairement que la courbe granulométrique se déplace vers la gauche quand on augmente la vitesse et donc une diminution plus forte de la taille granulaire de l'échantillon est mise en évidence.
- Parallèlement on observe que si on fait tourner les pâles et la cuve dans le même sens on obtient des réductions granulaires plus importantes, de même que lorsqu'on utilise des granulats avec un mauvais MDE.

4.7.7 Granulométrie Sable recyclé

Dans le cas du sable, la granulométrie a été réalisée selon la norme NF EN 933-1 [17], analyse granulométrique par tamisage, car le VDG ne permet pas l'étude des fractions inférieures à 2mm. On ne peut donc pas comparer directement avec les résultats obtenus au VDG car il effectue une granulométrie en volume et non en poids. Néanmoins, l'évolution est comparable aux résultats obtenus précédemment.

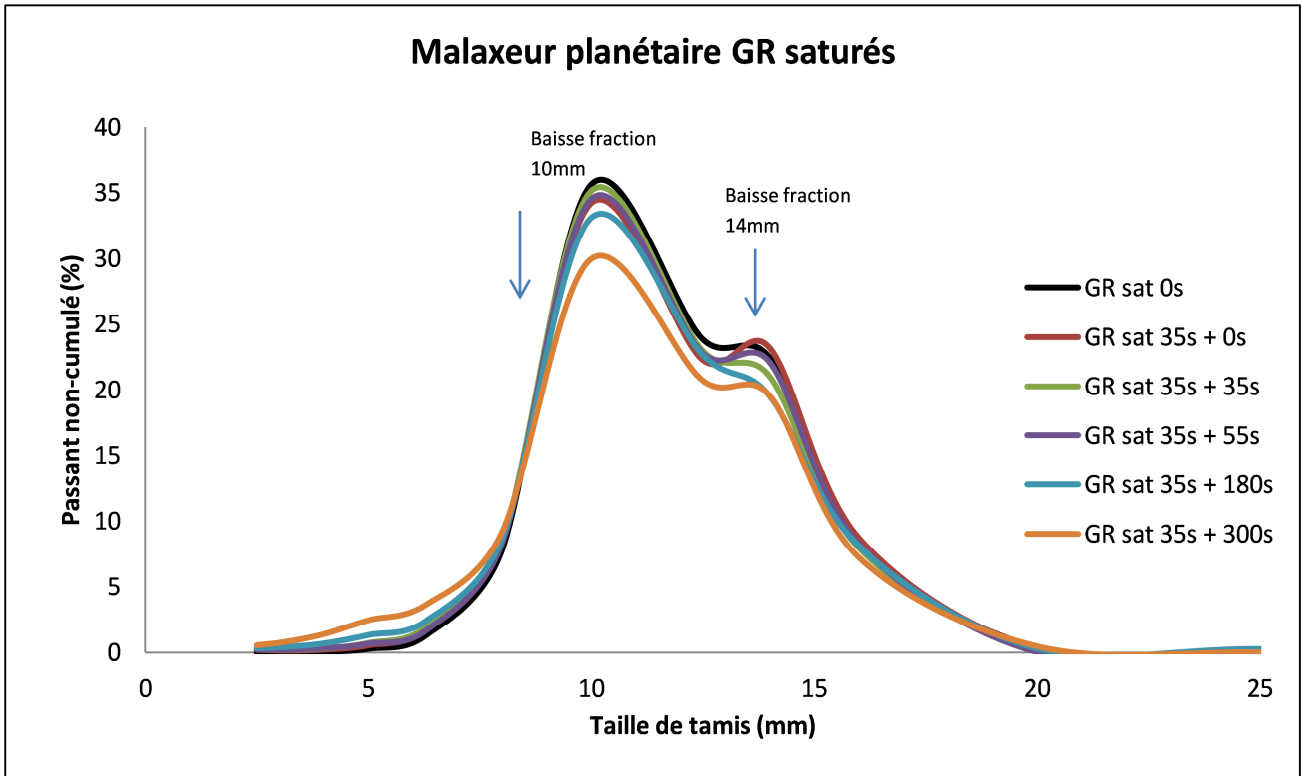


Graphique 19 : Courbes granulométriques des différents échantillons issus du malaxage avec Eirich pour les sables recyclés. A gauche les mesures issues du VDG, à droite les mesures tenant compte des passants à 0,5 mm.

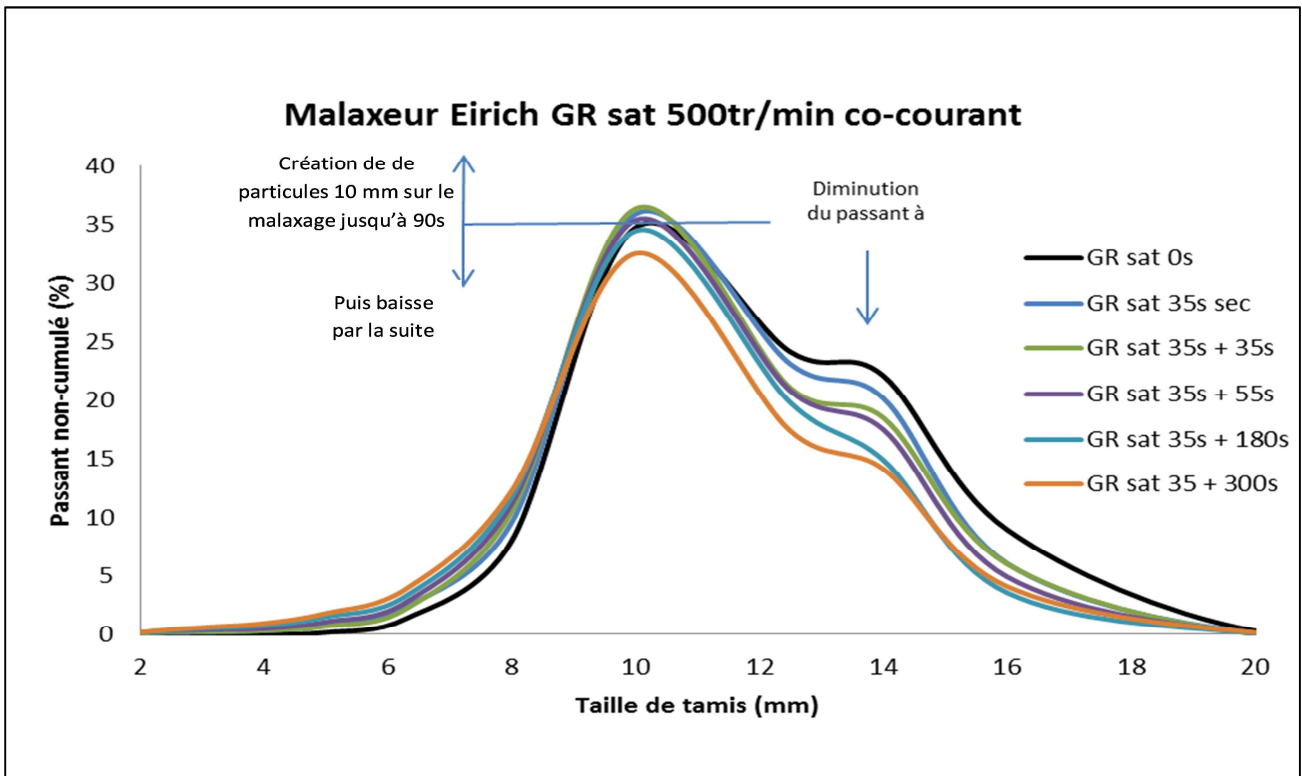
De la même façon que pour les granulats malaxés avec le malaxeur Eirich, on observe une nette augmentation en fonction du temps de malaxage de la fraction granulaire 0/0,5 par rapport à l'échantillon initial sans malaxage. De plus il y a un déplacement dès le fuseau granulométrique d'origine 0,5/4.

4.7.8 Courbes granulométriques passant non-cumulé

Afin d'apporter une meilleure compréhension, nous avons étudié les courbes en passant non-cumulé présentées ci-dessous :



Graphique 20 : évolution du passant non-cumulé au **malaxeur planétaire GR saturés**

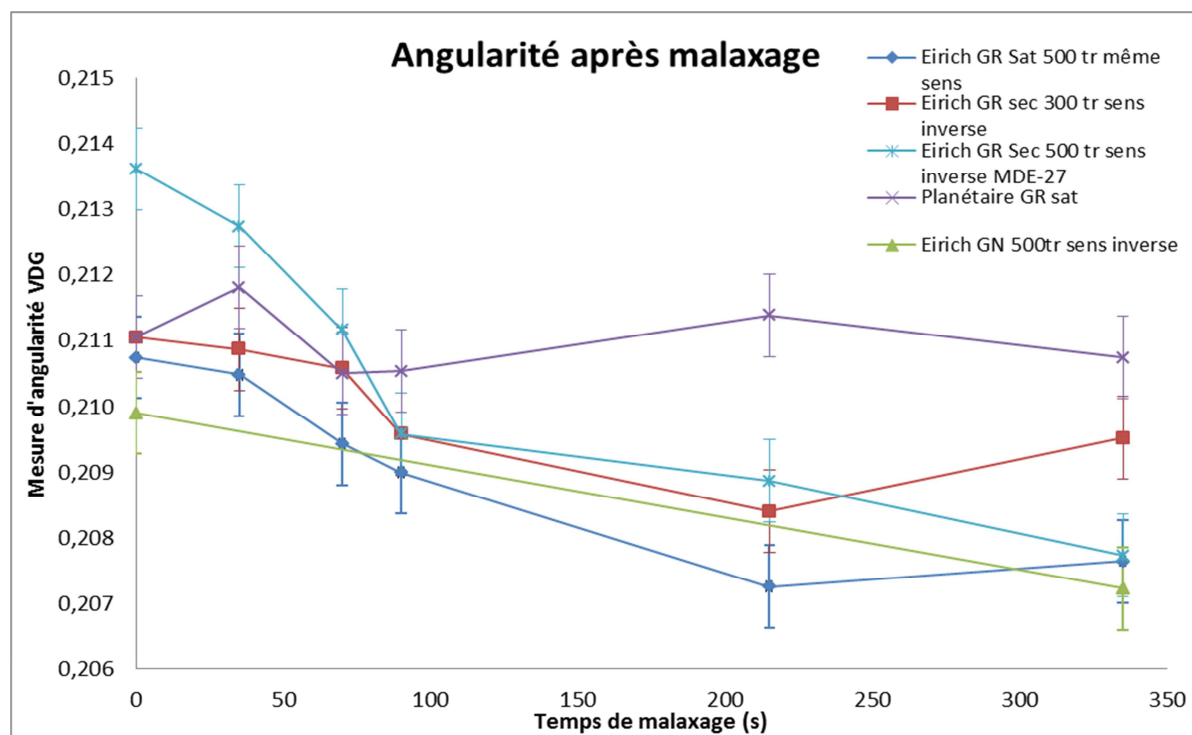


Graphique 21 : évolution du passant non cumulé au **malaxeur Eirich GR saturé 500tr/min co-courant**

Sur ces graphiques apparaissent les différences notoires d'évolution de la granulométrie lors du malaxage. En effet les deux types de malaxeurs ont des méthodes de malaxage différentes. Ceci peut être expliqué par le fait que le malaxeur Eirich introduit une plus faible attrition à l'entrefer pale – cuve que pour le malaxeur planétaire mais augmente par contre l'effet de l'impact du mélange à la paroi. De ce fait, dans le malaxeur Eirich, toutes les dimensions de granulats sont affectées par les efforts dans le malaxeur, au contraire du malaxeur planétaire, où la fragmentation intervient uniquement à l'entrefer pale/cuve pour une taille de granulats bien précise et sinon la réduction granulaire se fait par attrition entre grains, plus légère.

4.7.9 Résultats de l'angularité

En parallèle avec les mesures granulométriques, le videgranulomètre permet de réaliser des mesures d'angularité sur les échantillons de granulats étudiés. La valeur d'angularité est donnée par la valeur moyenne des angles les plus prononcés exprimée par un nombre adimensionnel entre 0 (granulat arrondi) et 1 (granulat anguleux) [18]. Des procédés énergétiques comme le malaxage peuvent entraîner l'abrasion et le polissage des granulats qui ont comme conséquence que la surface des agrégats devienne lisse et leurs bords plus arrondis. L'évolution de l'angularité peut donc être mise en relation avec les données de perte de masse et d'évolution granulométrique étudiées dans les chapitres précédents.



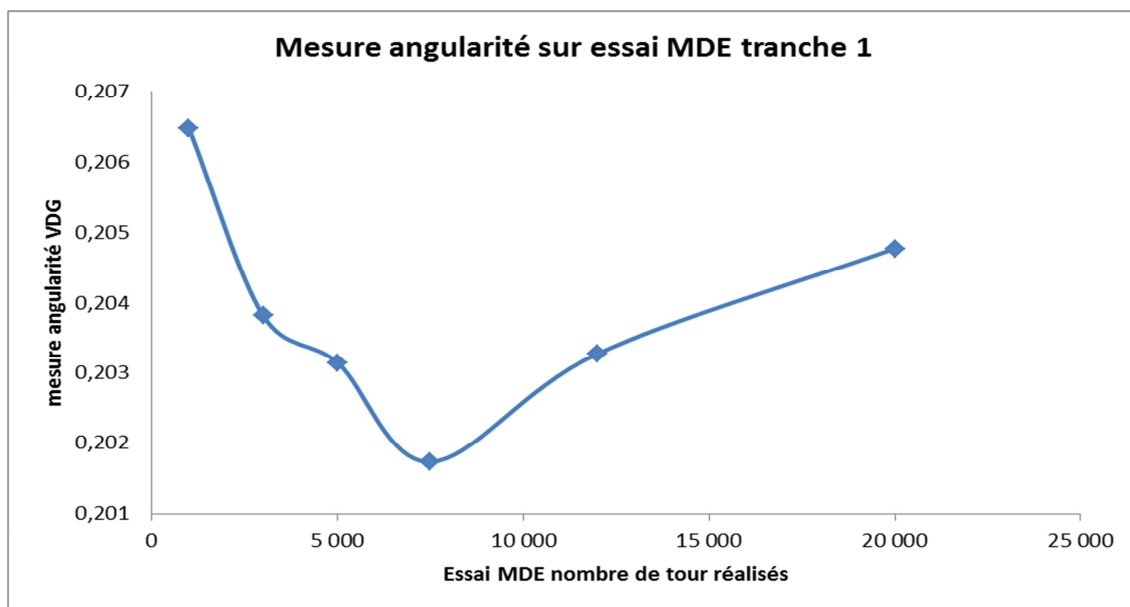
Graphique 22 : tableau de synthèse résultats angularité

Afin d'expliquer ces résultats nous pouvons affirmer que :

- Le malaxeur planétaire n'a pas d'influence notable sur l'angularité des granulats car la sollicitation des grains est modérée
- Le granulat naturel subit une diminution constante de son angularité
- Pour le malaxeur Eirich avec le GR MDE normal l'angularité baisse jusqu'à 180s de malaxage puis augmente à 300s, tandis que pour le GR mauvais MDE l'angularité diminue de manière constante même jusqu'à 300s. Ceci s'explique par le fait que les granulats mauvais MDE,

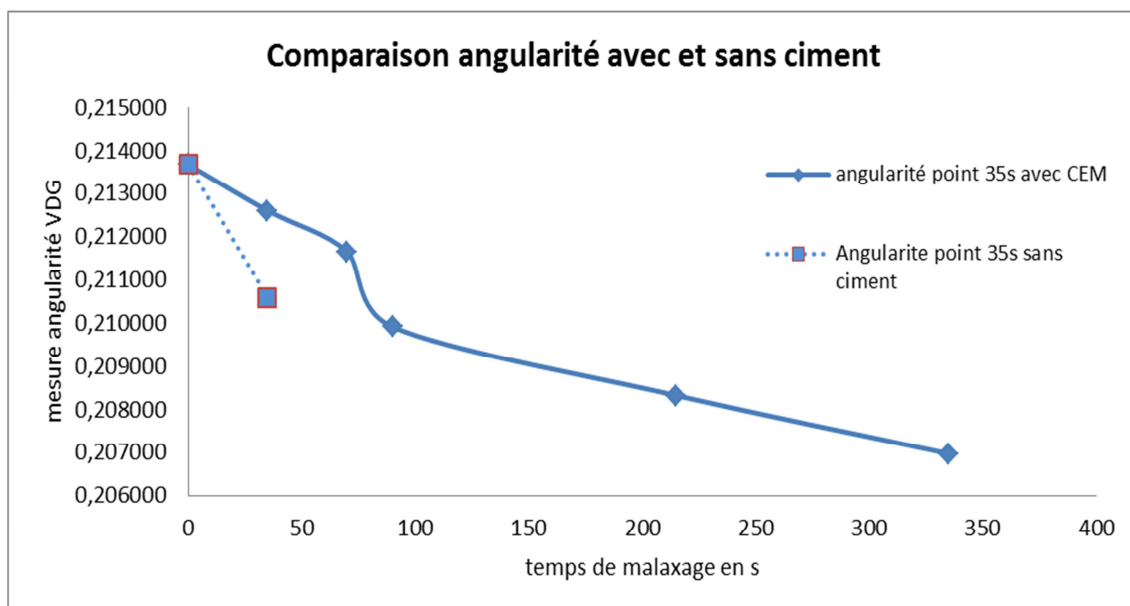
essentiellement composés de mortier adhérent vont s'arrondir de manière continue alors que le granulats MDE normal va s'arrondir au départ en perdant son mortier adhérent puis la pâte cimentaire va se creuser et laisser saillant le granulats naturel présent dans le GR et donc faire ré-augmenter l'angularité.

Ces résultats sont en concordance avec ceux obtenus sur lors de la tranche 1 du PN recybéton [1], concernant l'étude de la validité de la norme MDE (NF EN 1097-1) [19] et présentés ci-dessous :



Graphique 23 : confirmation des résultats obtenus avec comparaison essai tranche1

De plus nous avons pu observer un autre phénomène :



Graphique 24 : Malaxage mauvais MDE Eirich, comparaison angularité avec et sans ciment

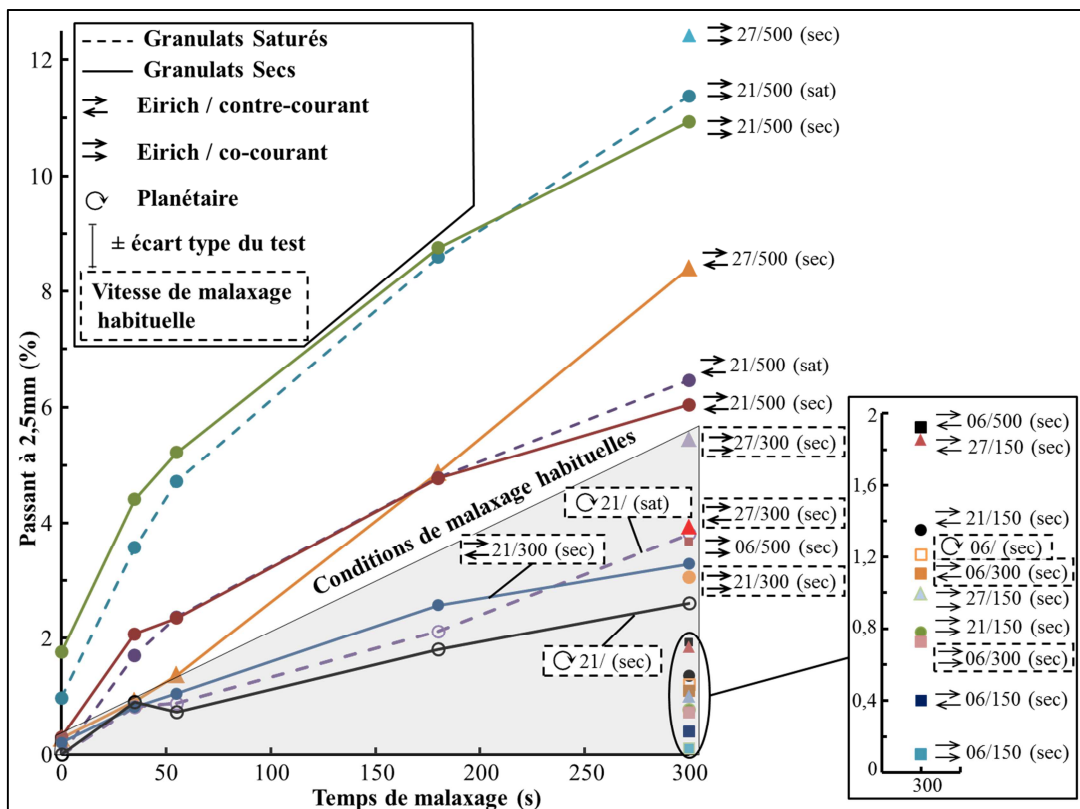
Grâce aux essais réalisés 35s malaxage à sec **avec ciment et sans ciment** pour le granulats mauvais MDE il est possible d'observer que le ciment même en malaxage à sec va protéger le granulats car l'angularité obtenue sur le test sans ciment est inférieure à celle obtenue avec ciment.

5 Conclusions

A travers ce rapport nous avons étudié les réductions granulaires des granulats recyclés, lors du malaxage d'un béton recyclé. Dans un premier temps nous avons déterminé le passant à 2,5 mm créé lors du malaxage par un granulat recyclé 10/14, ainsi que le passant à 0,5 mm créé lors du malaxage par un sable recyclé 0/4mm. Un granulat naturel 10/14 est également analysé pour référence. Nous analysons ensuite l'évolution de la courbe granulométrique au cours du malaxage, puis les variations d'angularité des granulats d'origine.

Ces aspects ont été étudiés en modifiant le type de malaxeur, sa vitesse et configuration de malaxage, le temps de malaxage, l'état hydrique initial du granulat (sec/saturé), les propriétés d'usure du granulat recyclé (MDE 21 et 27). Une comparaison est donnée avec des essais réalisés lors de la tranche 1 du PN [1], avec agitation des granulats en l'absence de la pâte de ciment. Enfin, des essais d'affaissement ont été réalisés pour une partie des bétons fabriqués.

Dans tous les essais, un malaxage à sec de 35 secondes a été suivi par un malaxage humide dont la durée varie entre 0 et 300 secondes. Le temps de malaxage de 5 minutes est représentatif d'un temps de malaxage en laboratoire, les temps plus courts étant plus facilement transposables à un malaxage de centrale réelle. Pour le malaxeur Eirich nous avons utilisé les configurations co-courant et contre-courant pour l'agitation de la cuve et 300 et 500 tr/min pour l'agitation de l'outil. Ces vitesses étant difficilement comparables avec un procédé industriel.



Graphique 25 : Comparaison de l'évolution du passant à 2,5 mm sur les configurations de malaxage étudiées, pour les 3 types de granulats 10/14 (désignés par la valeur MDE, c'est-à-dire 06 pour les granulats naturels, 21 pour les granulats recyclés de meilleure qualité, 27 pour les granulats recyclés de plus faible densité) et pour les différentes vitesses de malaxage dans le malaxeur Eirich (designées par la vitesse en rotation par minutes, c'est-à-dire 150, 300 ou 500)

Un graphique récapitulatif de l'ensemble des résultats concernant la création des « fines » (particules dont la taille est inférieure à 2,5 mm) est donné dans le Graphique 25. Ce graphique reprend également quelques essais réalisés par l'IFSTTAR après la fin du projet, destinés à mieux comprendre certaines évolutions.

Au cours de la fabrication du béton en laboratoire avec le système Eirich, la vitesse de mélange est généralement réglée entre 150 et 300 tours par minute. Nous pouvons observer que, pour ces vitesses de mélange dans le malaxeur Eirich, la perte de masse pendant plusieurs minutes de mélange a été inférieure à 1% pour les granulats naturels et inférieure à 3% pour les bétons recyclés avec une MDE de 21. Des tendances similaires ont été observées pour le malaxeur planétaire dans sa configuration de laboratoire habituelle. Les résultats correspondant à ces conditions de mélange fréquentes sont mis en évidence sur le Graphique 25. Toutefois, pour ces mêmes conditions usuelles de fabrication, le granulat recyclé de qualité inférieure (MDE 27) a produit des niveaux de dégradation supérieurs, allant jusqu'à environ 5% de perte de masse.

Dans des malaxeurs à l'échelle industrielle, on peut supposer une dégradation nettement inférieure. En effet, le temps de malaxage est significativement plus faible dans des malaxeurs à haute capacité, et le cisaillement est généralement plus faible (voir par exemple [20]). Il est donc à prévoir que la fracturation du granulat recyclé contribue aux difficultés de mise à l'échelle de la recette du béton contenant des granulats recyclés entre le malaxage en laboratoire et en centrale à béton.

Les résultats font apparaître plusieurs autres constats :

- Tout d'abord la création de passant à 2,5mm est fortement dépendante du type de malaxeur et de la nature de l'agitation utilisés. Le taux de création de passant à 2.5 mm est de **0,5 à 0,8 %/min** pour le malaxeur planétaire. Pour le malaxeur Eirich les taux de création sont présentés dans le tableau ci-dessous en fonction de la configuration :

GR sat co-courant 500tr	2,1
GR sec co-courant 500tr	1,8
GR sec contre-courant 500tr	1,5
GR sat contre-courant 500tr	1,3
GR sec contre-courant 300tr	0,8
GN co-courant 500tr	0,7
GN contre-courant 500tr	0,3
GN contre-courant 300tr	0,2
GR sec Mauvais MDE contre-courant 500tr	1,6

- Pour le sable recyclé, le taux de passant à 0,5 mm est de **5,9 %/min**, lors du malaxage dans le malaxeur Eirich configuration 500tr/min, contre-courant.
- Les résultats issus de la **tranche 1** sont intermédiaires aux résultats provenant du malaxeur planétaire et du malaxeur Eirich de la présente étude, ce qui confirme l'étendue des variations pouvant intervenir au cours du malaxage. Il faut noter également que les résultats de la tranche 1 sont supérieurs en terme de création de passant lorsque l'on compare les résultats du malaxeur planétaire tranche 1/tranche 2. Ceci peut s'expliquer par le fait que malaxer dans une pâte cimentaire protègerait le granulat.
- La réduction granulométrique au cours du malaxage a une influence sur la **maniabilité** du béton produit, avec une augmentation de la maniabilité dans un premier temps, suivie par une diminution.
- La réduction de taille observée semble provenir à la fois d'**une attrition** et d'**une fragmentation**, en des proportions différentes suivant la configuration de malaxage. Les essais granulométriques et d'angularités réalisés au VDG permettent de confirmer ces phénomènes.

- **L'angularité** des granulats recyclés baisse en début de malaxage lorsque le granulat perd son mortier adhérent. Elle augmente par la suite, lorsqu'on fait ressortir le granulat naturel présent dans le granulat recyclé. En ce qui concerne le granulat recyclé avec un « mauvais » MDE, ce phénomène n'apparaît pas car le grain est composé en moindre mesure de granulat naturel.
- La création de passant à 2,5 mm lors du malaxage du granulat recyclé ayant un « **mauvais** » **MDE 27** est supérieure à un granulat avec un MDE 21. L'évolution du passant en fonction du temps de malaxage est cependant plus linéaire que pour le granulat recyclé avec un MDE 21. En effet, le granulat avec un « bon MDE » ayant une interface mortier/granulat naturel plus friable va perdre plus facilement le mortier adhérent en début de malaxage puis la vitesse va diminuer en présence d'une plus forte proportion de granulats naturels, pour un malaxage plus long. A différentes échéances la création des fines provient du granulat naturel d'origine ou du mortier adhérent. Le granulat ayant un « mauvais MDE » contient plus de mortier adhérent qui est fragmenté sur toute la durée du malaxage, d'où la linéarité du phénomène.

Liste bibliographique

- [1] Hamard E, Cazacliu B, Laboratoire GPEM-IFSTTAR. Etude de la validité des normes d'essai mécaniques pour les granulats recyclés. Projet National de recherche et développement RECYBETON 2013; Tranche 1:Thème 2.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Abbas A, Fathifazl G, Fournier B, Isgor O.B., Zavadil R, Razaqpur A.G., Foo S. Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis. *Materials characterization* 60 (2009) 716-728.
- [5] De Juan MS, Gutiérrez PA. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials* 2009;23:872–7.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Shima H, Tateyashiki H, Matsushashi 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Kim KH, Cho HC, Ahn JW. Breakage of waste concrete for liberation using autogenous mill. *Minerals Engineering* 2012;35:43–5.
- [13] BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières). Une nouvelle technologie de fragmentation des bétons en vue de leur recyclage. ANR Cofrage 2013,
- [14] AFNOR. (2012). Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement. NF EN 12350-2, AFNOR, Saint-Denis La Plaine, France

- [15] AFNOR. (2002). Granulats – Analyse granulométrique, aplatissement, allongement – Essai à l'aide d'un appareil d'ombroscopie (Indice de classement : P18-566). XP P 18-566, AFNOR, Saint-Denis La Plaine, France
- [16] AFNOR. (2012). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 3 : détermination de la forme des granulats - Coefficient d'aplatissement . NF EN 933-3, AFNOR, Saint-Denis La Plaine, France
- [17] AFNOR. (2012). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage. NF EN 933-1, AFNOR, Saint-Denis La Plaine, France
- [18] A.M. Pham, Y. Descantes, F. De Larrard, Determination of sieve grading curves using an optical device, *Mechatronics*. 2011; 21:298–309.
- [19] AFNOR. (2011). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval) . NF EN 1097-1, AFNOR, Saint-Denis La Plaine, France
- [20] Chopin D., Cazacliu B., de Larrard F., Schell R. (2007) Monitoring of Concrete homogenisation with the power consumption curve, *Materials and Structures*, RILEM, Vol. 40(9):897-907