

# Limites et adaptations de la méthode du mortier de béton équivalent MBE appliquée aux bétons de granulats recyclés

Braymand Sandrine<sup>1</sup>, Deodonne Kunwufine<sup>1</sup>, Roux Sébastien<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ICUBE, UMR 7357, Université de Strasbourg, CNRS, Illkirch, Cedex, France

<sup>2</sup>IJL, UMR 7198, Université de Lorraine, CNRS, Nancy, France

## RESUME

Le "mortier de béton équivalent" (MBE) est une méthode empirique d'aide à la formulation des bétons adjuvantés conçue, à son origine, pour des bétons de granulats naturels. Son objectif est de reproduire en laboratoire et sur mortier des conditions proches du malaxage du béton sur chantier ou en centrale, tout en diminuant le nombre et le volume des gâchées nécessaires à l'optimisation de l'adjuvant. Basée sur l'hypothèse d'une corrélation entre les propriétés rhéologique d'un béton (affaissement) et celles du mortier qui le compose (étalement), la méthode MBE propose de reconstituer la part de mortier contenue dans le béton initial conditionnant son ouvrabilité. L'étude présentée ici s'intéresse aux limites de cette méthode appliquée aux bétons de granulats recyclés (BGR). Elle concerne les corrélations "béton-mortier équivalent" pour la caractérisation de l'ouvrabilité des bétons, les autres propriétés des bétons ne pouvant être corrélées au MBE selon le principe de cette méthode. Il ressort de cette étude que, au-delà de la nécessaire prise en compte du squelette granulaire complet du BGR dans la formulation du MBE, le MBE de granulats recyclés présente des ouvrabilités supérieures à celles de son béton. Pour corriger ce biais, des adaptations sont proposées, basées, entre autres, sur la caractérisation de la morphologie des granulats recyclés.

**Mots-clés** mortier de béton équivalent, béton de granulats recyclés, morphologie, formulation

## I. INTRODUCTION

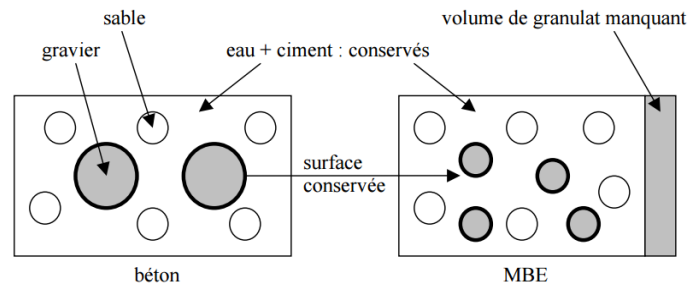
Dans les années 1990, une méthode empirique pour aider à la formulation des bétons adjuvantés a été développée dans le cadre du projet national Calibé (IREX, 2004). Cette méthode vise à reproduire en laboratoire et sur mortier des conditions similaires à celles du malaxage du béton en centrale ou sur chantier, tout en réduisant le nombre de gâchées de béton. L'objectif était d'identifier et d'évaluer l'efficacité des adjuvants, une démarche qui peut s'avérer longue et nécessitant une grande quantité de matériaux.

La méthode repose sur l'idée qu'il existe une corrélation entre les propriétés rhéologiques du béton et celles du mortier qui le compose. Ce "*mortier qui compose le béton*" désigne le matériau frais qui passe au tamis de 5 mm (donc en excluant le mortier qui adhère aux gravillons > 5 mm), et il est appelé Mortier de Béton Équivalent (MBE) différent du mortier déduit directement de la

composition du béton. Dans le cadre du projet Calibé, une méthode a été développée permettant de formuler directement le MBE sans nécessiter de tamisage à 5 mm. Il a ainsi été établi que la composition du MBE pouvait être déterminée à partir de celle du béton de la manière suivante :

- conserver la nature et le dosage en ciment, en additions minérales et en adjuvant ; le rapport Eff/C ; le mode d'introduction des adjuvants ; la nature et dosage en sable du béton.
- ajouter une quantité de sable reproduisant la même surface granulaire (surface spécifique équivalente) que celles des gravillons et graviers (> 5 mm).
- ajouter les particules inférieures à 5 mm contenues dans les gravillons, qui auront été récupérées par tamisage.

Ces deux ajouts de sable permettent de garantir que les surfaces de contact et la quantité de pâte adhérente sont conservées. En effet, les mécanismes de frottement et de prise des hydrates à la surface des grains exercent une influence sur les phénomènes qui interviennent dans la rhéologie des bétons à l'état frais. (Schwartzentruber et Catherine, 2000).



**FIGURE 1.** Passage du béton au MBE selon Dierkens (Dierkens, 2005)

Il a été démontré que l'ouvrabilité des MBE est supérieure à celle des bétons correspondants. Ainsi, la corrélation établie, de type linéaire, relie l'étalement des MBE (mesuré à l'aide d'un mini cône) à l'affaissement des bétons (mesuré au cône d'Abrams). (IREX, 2004), (Dierkens, 2005). Le mini-cône a des dimensions qui sont déduites de celles du cône d'Abrams par un rapport homothétique de deux.

Chaque composition théorique de béton génère une courbe de corrélation spécifique, ce qui rend impossible l'utilisation d'une courbe universelle pour toutes les types de constituants, bien que cette approche soit couramment utilisée dans l'industrie comme première estimation. La droite de corrélation doit être déterminée expérimentalement pour chaque composition, cette droite reste valable pour une famille de bétons où seule l'adjuvantation varie.

Il est important de souligner que les corrélations béton/MBE ne peuvent être établies que pour les essais de caractérisation de l'ouvrabilité. En ce qui concerne les autres grandeurs, les corrélations ne peuvent pas être confirmées. En effet, avec une granulométrie réduite, les distances intergranulaires sont augmentées, ce qui modifie les temps de prise et peut influencer à la fois le maintien de l'ouvrabilité et les résistances mécaniques. De plus, comme l'objectif est d'obtenir une surface de grains équivalente pour le béton et son MBE, le gravier et le gravillon sont remplacés par un volume plus important, et donc une masse de sable également plus importante. Cela entraîne une capacité calorifique du mortier plus faible que celle du béton. Cependant, sa chaleur d'hydratation totale reste identique, car les mêmes quantités d'eau et de ciment sont utilisées, mais sur un volume moindre. Cela conduit à des températures plus élevées à volume équivalent

(puisque le dosage en ciment est plus important), tout comme les résistances mécaniques. (Dierkens, 2005).

Les corrélations établies entre un béton et son mortier équivalent ont été définies selon la méthode Calibé, pour des granulats naturels, les granulats recyclés ne faisant pas partie des enjeux lors de l'établissement de la méthode.

Au-delà de cette utilisation de la méthode conçue pour comme un outil de formulation des bétons dédiée à leur rhéologie, différents travaux référencés dans la littérature dépassent cet aspect rhéologique et tentent d'élargir le domaine d'usage des MBE en sortant du cadre défini lors du Projet National Calibé. Parfois, la méthode MBE est utilisée comme point de départ pour une composition de référence, les autres compositions de l'étude étant déduites de celle-ci sans recalcul selon le cadre de Calibé. On peut noter, parmi ces travaux, des études sur le lien entre rhéologie et variabilité des sables (Perrot, 2020) ou des sables recyclés (Saad, 2024 ; Gomart, 2013), sur les résistances mécaniques au jeune âge (Haddad, 2012), sur l'étude des propriétés des matériaux à l'état frais et durcis (Ibrahim, 2024), sur la durabilité ou encore sur les propriétés des BRG (Abbas, 2009 ; Kim, 2021).

L'étude présentée ici s'intéresse aux limites de cette méthode MBE lorsqu'elle est appliquée aux Bétons de Granulats Recyclés (BGR). Elle concerne les corrélations "béton-mortier équivalent" pour la caractérisation de l'ouvrabilité des bétons. Après une caractérisation de la morphologie de granulats recyclés de béton, les limites de la validité des corrélations bétons-mortiers équivalents appliquées aux Bétons de Granulats Recyclés sont présentées. Enfin des adaptations de la méthode de formulation MBE basées sur cette différence de morphologie sont proposées.

## II. MATERIAUX ET METHODES

### A. Caractérisation des BGR

Les matériaux utilisés pour cette étude sont :

Un Granulat Naturel Concassé (GNC) constitué d'un sable (0/4 mm) issu de roches alluvionnaires semi-concassé et de gravillons (4/10 mm) et graviers (6,3/20 mm) issus de roches massives concassées.

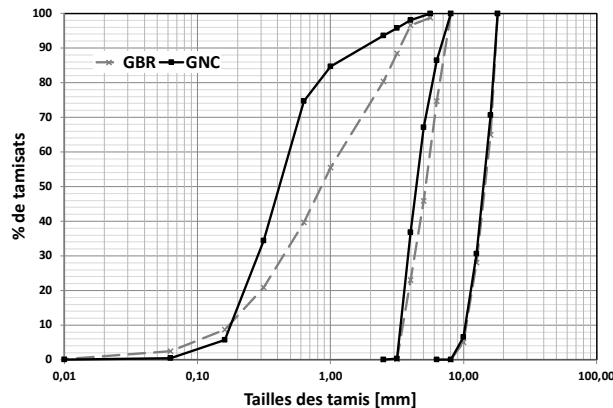
Un Granulat de Bétons Recyclé (GBR) produit sur une plate-forme industrielle de recyclage. Ce granulat est constitué d'un sable (0/4 mm), de gravillons (4/10 mm) et de graviers (10/20 mm).

#### o Analyses granulométriques

L'analyse granulométrique des matériaux (Fig. 2) d'étude a été réalisée par tamisage à sec selon le protocole défini par la norme NF EN 933-1. Le tamisage par voie sèche a été privilégié pour éviter la potentielle réaction des fines du GBR en présence d'eau. Avant essais, les matériaux ont été séchés à  $65 \pm 5^\circ\text{C}$  jusqu'à stabilisation de leur masse.

Les éléments fins des sables ont été séparés par tamisage avant analyse en granulométrie laser en milieu liquide pour les fractions 0/500  $\mu\text{m}$  (Granulomètre TAMAIR) et par voie sèche pour les fractions 0/100  $\mu\text{m}$  (Granulomètre Sympatec) (Tableau 1). Ainsi, les proportions d'éléments fins ( $< 63 \mu\text{m}$ ) contenus dans la fraction de sable 0/4 mm sont en moyenne 4 fois supérieures pour les

granulats recyclés par rapport aux granulats naturels roulés. Les granulats naturels concassés ne contiennent presque plus d'éléments inférieurs à 63  $\mu\text{m}$ .



**FIGURE 2.** Distribution granulairre des GNC et GBR

**TABLEAU 1.** Passants à 63  $\mu\text{m}$  (%) des sables 0/4 mm

	GBR	GNC
Analyses successives (laser - > 100 $\mu\text{m}$ )	10,2%	-
Analyses (laser - > 500 $\mu\text{m}$ )	10,3%	< 0,5%
Analyse par tamisage	2,5%	< 0,5%

Les proportions en éléments fins (< 63  $\mu\text{m}$ ) obtenues à partir des essais aux granulomètres laser sont supérieures à celles obtenues par tamisage. Les résultats obtenus sur les 2 granulomètres laser sur des prélèvements différents sont eux concordants. Les limites de l'analyse granulométrique par tamisage sont ainsi atteintes pour l'utilisation des tamis inférieurs à 300  $\mu\text{m}$  pour les GBR, ces granulats étant potentiellement réactifs à l'eau (formation d'amalgames), une dispersion des grains est nécessaire.

Afin d'étudier l'évolution du squelette granulairre au cours du malaxage (la friabilité du mortier accolé pouvant conduire à une perte de matière accolée aux grains) un essai comparatif de la granulométrie de chacun des 2 granulats a été réalisé avant et après un malaxage de 3 minutes 30 secondes, à sec ou humide, dans le malaxeur utilisé pour la mise en œuvre des bétons.

#### o Morphologie

L'analyse de la morphologie des échantillons a été effectuée sur les gravillons des GBR et GNC. Au regard de la taille des grains, il n'est pas possible d'envisager l'étude morphologique des sables. Une étude morphologique bi-dimensionnelle a été réalisée par analyse d'images sur des échantillons d'au moins 30 grains pour chacune des classes successives entre 4 et 20 mm, à savoir 4/5, 5/6, 3/6, 3/8, etc.), garantissant un échantillonnage représentatif. Les images des grains, placés sur un fond blanc, ont été obtenues à l'aide d'un appareil photo muni d'un objectif macro et analysés à l'aide du logiciel ImageJ®. Après seuillage et binarisation, les paramètres caractéristiques de la morphologie des granulats retenus lors de l'étude par analyse d'images sont :

- L'aire, qui permet de caractériser la taille d'une particule et qui, à partir d'une image binarisée et connaissant la surface représentée par un pixel, se mesure par comptage du nombre de pixels qui composent chaque grain entièrement visible.

- Le périmètre pour lequel il existe plusieurs méthodes de mesure, programmées directement dans les logiciels d'analyse d'images.
- La convexité qui rend compte de la rugosité extérieure d'une particule. Elle permet de discriminer les particules globalement convexes de celles ayant une forme plus complexe. L'aire convexe correspond à la surface définie par un fil tendu autour du granulat. La convexité est ensuite définie comme le rapport de l'aire de la particule sur l'aire de l'enveloppe convexe. Les particules convexes ou quasi-convexes auront une compacité « apparente » proche de 1, tandis que des particules aux formes complexes verront leur compacité décroître du fait de la présence de « creux » sur leur enveloppe extérieure.
- La circularité qui correspond au rapport de l'aire réelle du granulat et de l'aire du cercle imaginaire correspondant au périmètre réel du granulat. Ce paramètre, qui tend vers 1 quand la projection de la particule tend vers un cercle, peut ainsi s'écrire sous la forme :

$$\text{Circularité} = \frac{4\pi \times \text{Aire}}{\text{Périmètre}^2} \quad \text{EQUATION 1. critère de circularité}$$

- La tortuosité se caractérise par la tendance d'une surface à avoir une forme sinueuse. Ce critère correspond au rapport du diamètre géodésique (représenté Fig. 3 par la ligne brisée bi-terminée par des flèches) et par le diamètre de Feret maximal (longueur du grain). Le critère est égal à 1 pour une forme non tortueuse et augmente en fonction de la sinuosité.

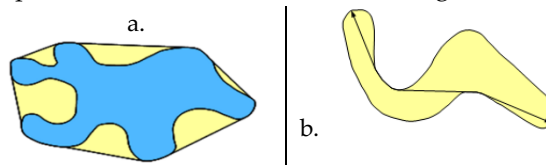


FIGURE 3. Convexité (a) et tortuosité (b) d'un grain

o Caractéristiques physiques

La masse volumique réelle et le coefficient d'absorption ont été déterminés selon la norme NF EN 1097-6 pour les matériaux mis en œuvre dans les bétons et sont données TABLEAU 2

TABLEAU 2. Caractéristiques physiques des granulats

Classe granulaire	Sable		Gravillons		Graviers	
	coef. abs. %	prd kg/m <sup>3</sup>	coef. abs. %	prd kg/m <sup>3</sup>	coef. abs. %	prd kg/m <sup>3</sup>
GBR	10,16 ± 1,80	2,10 ± 0,05	5,89 ± 1,34	2,29 ± 0,08	4,69 ± 1,02	2,27 ± 0,02
GNC	2,00 ± 0,03	2,58 ± 0,02	1,23 ± 0,30	2,73 ± 0,01	0,50 ± 0,04	2,72 ± 0,01

B. Formulation des MBE de l'étude

Le béton de granulats recyclés (BGR) étudié est composé de 100% de granulats recyclés. Les paramètres de compositions sont identiques entre les 2 bétons BGR et BGNC (ciment, eau, proportion volumique totale de granulats). Pour déterminer les proportions massiques respectives de chaque classe granulaire du BGR, un squelette granulaire proche de celui du béton de granulats naturels concassés (BGNC) a été recherché en utilisant la méthode des moindres carrés à partir des courbes granulaires de chacune de ces fractions. L'eau d'absorption et celle contenue dans les

adjuvants sont ajoutées au moment du malaxage. Les compositions des bétons de granulats naturels concassés (BGNC) et de granulats recyclés (BGR) sont présentées tableau 3.

Les mortiers équivalents aux bétons (MBE) présentés tableau 3 ont été formulés en respectant la méthode décrite dans le projet Calibé (IREX, 2004). Les dosages en ciment (260 kg), eau efficace (169 kg) et adjuvant sont conservés pour chaque mortier équivalent à son béton. La teneur en sable des éléments inférieurs à 5mm est ajoutée à la teneur calculée selon la méthode décrite précédemment. Les calculs sont faits sur granulats saturés surface sèche. Les masses équivalentes de sables obtenues pour les MBE sont respectivement de 768 kg pour le MBE naturel et de 713,5 kg pour le MBE recyclé. Le volume de mortier ainsi obtenu est un "extrait" du volume de béton donc inférieur au m<sup>3</sup>. Les compositions de mortier équivalent présentées tableau 3 sont calculées pour 1 m<sup>3</sup>. La différence de propriétés granulométriques et physiques entre les granulats naturels et recyclés conduit à des volumes équivalents de mortiers différents et ainsi à des dosages en ciment et eau (donc en pâte), au m<sup>3</sup>, plus faibles pour le mortier recyclé que pour le mortier naturel. En effet, d'une part le BGR contient moins de sable en masse que le BGNC (afin d'avoir un volume de sable équivalent) et d'autre part les surfaces granulaires des gravillons et graviers varient entre le granulats naturels et le granulats recyclés.

Ainsi, la méthode de calcul conduit à des surfaces spécifiques calculées respectivement de 7,69/0,384/0,184 m<sup>2</sup>/kg (sable/gravillon/gravier) pour le GBR et de 7,098/0,409/0,166 m<sup>2</sup>/kg pour le GNC. C'est la raison pour laquelle la méthode MBE appliquée selon les recommandations du projet Calibé (IREX, 2004) ne doit être utilisée que pour un béton et son mortier équivalent. La comparaison entre compositions n'est pas directement possible.

**TABLEAU 3. Composition des bétons et mortiers équivalents**

Composition massique au m <sup>3</sup>	BGNC	BGR	MBEGNC	MBEGR
Ciment	260	260	471	426
Eau efficace	169	169	306	277
Adjuvant	0 ou 0,8%	0 ou 1,2%	0 ou 0,8%	0 ou 1,2%
E <sub>eff</sub> /C (sans unité)	0,65	0,65	0,65	0,65
Sable 0/4 mm	724	689	1392	1168
Gravillon 4/10 mm	172	76	/	/
Gravier 6,3/20 mm (GNC) 10/20 mm (GBR)	1010	762	/	/
Eau d'absorption ajoutée	21,6	110,2	27,8	118,7

Les bétons et mortiers équivalents ont été formulés avec l'objectif d'avoir un béton destiné à être transporté (Béton Prêt l'Emploi – BPE) qui conserve une ouvrabilité S3/S4 entre 30 et 90 minutes. L'étude porte donc principalement sur des bétons et leurs mortiers équivalents adjuvés. L'adjuvant utilisé est un adjuvant superplastifiant, fort réducteur d'eau à maintien d'ouvrabilité.

Les granulats recyclés des bétons et mortiers correspondants ont été pré-humidifiés (eau absorption) dans le malaxeur (malaxeur zyklos, puissance 2,2 kW, vitesse train de malaxage 71 tr/min) pendant 30 secondes puis laissés au repos 5 minutes avant que les autres constituants ne soient ajoutés. L'adjuvant est ajouté à l'eau de malaxage. La durée totale de malaxage était de 3 minutes 30 secondes. Des mesures de l'affaissement (bétons) et de l'étalement (mortier) sont

effectués aux échéances de 5, 30, 60, 90 et 120 minutes après le début du malaxage. Entre chaque échéance, un malaxage lent est appliqué.

Dans un deuxième temps des modifications dans l'ordre d'incorporation de l'adjuvant au cours du malaxage sont proposées pour les études sur bétons et mortiers adjuvantés.

### III. RÉSULTATS DES CORRÉLATIONS BÉTON-MBE À L'ÉTAT FRAIS

#### A. Caractérisations des granulats

- Évolution squelette au cours du malaxage

Les résultats ci-dessous (Fig. 4) montrent une évolution du squelette granulaire suite à un malaxage de 3 minutes 30 secondes pour le granulat recyclé (GBR) alors que granulat naturel concassé (GNC) n'est pas influencé par ce malaxage.

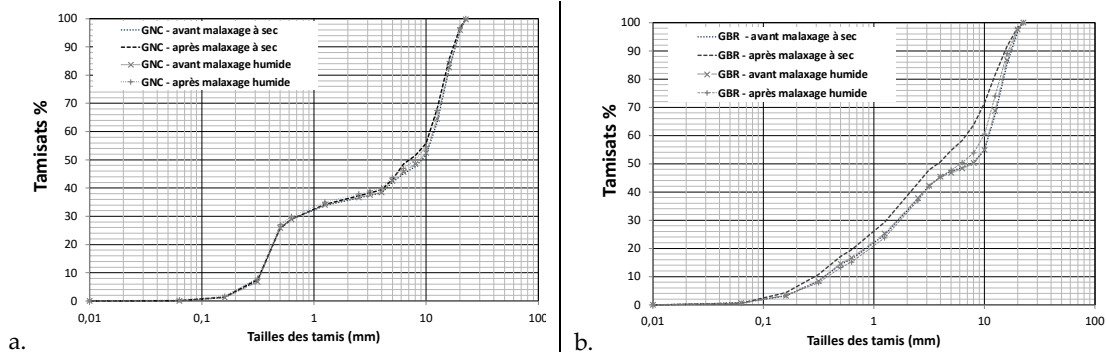


FIGURE 4. Évolution de la distribution granulaire des GNC (a) et GBR (b) suite au malaxage

- Analyse morphologique

TABLEAU 4. Analyse morphologique des granulats

	Aire		Périmètre		Circularité		Convexité		Tortuosité	
	[mm <sup>2</sup> ]		[mm]		Sans Unité		Sans Unité		Sans Unité	
<b>4/10 mm</b>	<b>GNC</b>	<b>GBR</b>	<b>GNC</b>	<b>GBR</b>	<b>GNC</b>	<b>GBR</b>	<b>GNC</b>	<b>GBR</b>	<b>GNC</b>	<b>GBR</b>
<b>Moyenne</b>	54,89	55,16	29,14	30,52	0,77	0,71	0,97	0,95	1,032	1,017
<b>Écart type</b>	33,21*	27,51*	9,42*	7,76*	0,08	0,07	0,02	0,02	0,189	0,028
<b>Médiane</b>	44,02	46,00	26,94	28,87	0,78	0,72	0,97	0,95	1,023	1,025
<b>Max</b>	175,03	140,04	57,65	51,79	0,89	0,82	0,99	0,98	2,036	1,062
<b>Min</b>	16,62	17,83	15,68	17,04	0,49	0,43	0,86	0,87	0,554	0,906
<b>10/20 mm</b>	<b>GNC</b>	<b>GBR</b>	<b>GNC</b>	<b>GBR</b>	<b>GNC</b>	<b>GBR</b>	<b>GNC</b>	<b>GBR</b>	<b>GNC</b>	<b>GBR</b>
<b>Moyenne</b>	196,35	264,27	55,10	65,74	0,76	0,74	0,97	0,96	1,02	1,02
<b>Écart type</b>	111,37*	109,08*	15,03*	14,17*	0,05	0,05	0,01	0,02	0,02	0,03
<b>Médiane</b>	164,02	243,59	52,55	64,12	0,77	0,75	0,98	0,96	1,03	1,03
<b>Max</b>	644,64	568,15	103,98	101,76	0,86	0,84	0,99	0,98	1,05	1,06
<b>Min</b>	52,70	77,47	29,71	36,52	0,57	0,60	0,91	0,88	0,95	0,94

\* il est normal de trouver des valeurs élevées de cet écart type puisque cela couvre la classe granulaire 4/10 mm.

Pour la classe granulaire 4/10, on observe un écart entre le GBNC et le GBR de 4,7 % sur le périmètre, de 7,8 % sur la circularité et de 2% sur la tortuosité respectivement. L'écart sur l'aire est négligeable (< 0,05%), la tortuosité est plus élevée de 1,5 % pour le GBNC.

Pour la classe granulaire 10/20, on observe un écart entre le GBNC et le GBR de 34,7 % sur l'aire, de 19,3 % sur le périmètre, de 2,6 % sur la circularité et de 1 % sur la convexité. Il n'y a pas d'écart sur la sinuosité observé.

Cet écart sur le périmètre et le critère de circularité pourrait entraîner une sous-estimation de la surface spécifique des gravillons prise en compte dans la méthode MBE.

### B. Affaissement des bétons et mortiers équivalents

Le BGR (non adjuvanté) présente des affaissements très inférieurs à ceux des BGNC et une perte d'ouvrabilité importante au cours du temps. Le BGNC adjuvanté conserve bien une classe de consistance S4 à 90 minutes, pour une consistance initiale à 5 minutes de S4/S5). A l'inverse, le BGR initialement de consistance S4 se raffermi avec le temps, il est de classe S3 60 minutes après son gâchage et S2 après 60 minutes.

En comparant les évolutions d'affaissement au cours du temps des bétons et de leurs mortiers équivalents, on constate qu'avec une utilisation de GBR, le mortier équivalent présente, à toutes les échéances, des ouvrabilités élevées, voire très élevées pour le mortier adjuvanté, par rapport à celles de son béton équivalent. Ce constat se retrouve notamment aux valeurs élevées d'ouvrabilité (à jeune âge). Par ailleurs, l'importante perte d'ouvrabilité dans le temps observée sur le BGR (adjuvanté ou non) ne se retrouve pas sur son mortier équivalent. (Fig. 5)

Ainsi, à un BGR adjuvanté de classe de consistance S4 (160-210 mm) correspond un étalement pour le MBEGBR de 350 mm, valeur très au-delà des valeurs admissibles (< 330 mm) ce qui conduit à un mortier trop liquide qui présente une ségrégation quasi instantanée. A l'inverse on observe une perte d'ouvrabilité plus importante (pour le béton que pour son mortier), entre les 2 premières échéances de mesure dans le cas de l'utilisation de GNC.

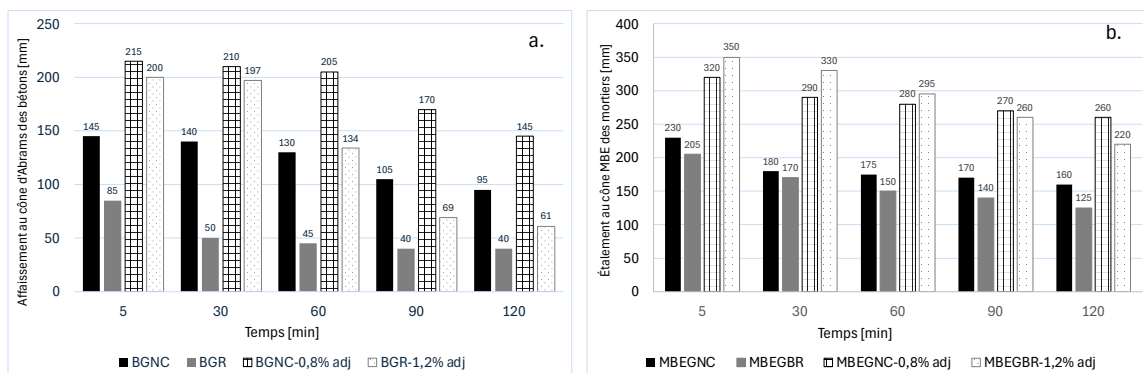


FIGURE 5. Ouvrabilité des bétons (a) et mortiers (b) au cours du temps

### C. Corrélations bétons et mortiers équivalents

Une étude des corrélations béton/mortier équivalent permet d'approfondir les premières observations. Elles sont présentées Fig. 6.

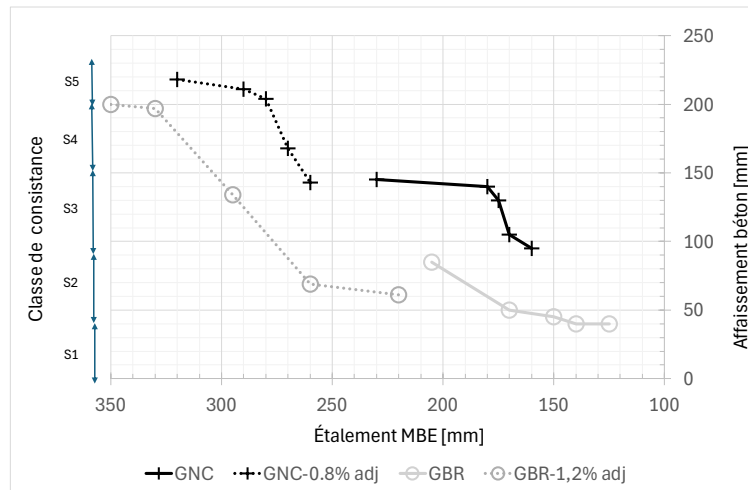


FIGURE 6. Corrélations bétons/MBE

Le mortier équivalent au BGR est plus fluide que le béton qu'il représente par rapport au mortier équivalent représentant le BGNC. La position de la courbe B/MBE de GBR décalée à gauche indique que pour une même valeur de l'affaissement du béton, l'étalement du MBE est plus important pour le GBR que le GNC. Ainsi la mise en œuvre du MBE de GBR ne permet pas d'estimer de façon satisfaisante la classe de consistance attendue sur le béton qu'il représente.

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer les différences entre les courbes de corrélation pour les GBR et GBNC :

1. En tout premier lieu, il faut se rappeler qu'une courbe de corrélation n'est valable que pour un béton donné et son mortier équivalent. Cependant, les squelettes granulaires du BGNC et du BGBR ayant été rapprochés (reconstitution du squelette granulaire du BGR par la méthode des moindres carrés), et tout autre paramètre étant égal par ailleurs, l'effet de cette différence de granulats devrait être réduit, selon les recommandations de la méthode.
2. Comme il a été relevé précédemment, la quantité de pâte au  $m^3$  diffère entre le MBEGNC et le MBEGBR en raison de la méthode de formulation MBE. Cependant cette différence devrait conduire à un MBEGBR moins fluide que le MBEGNC comparativement puisque, pour une même quantité de pâte dans les bétons, c'est le MBEGNC qui contient plus de pâte que le MBEGBR (voir le tableau de composition des bétons et mortiers, tableau 3). L'explication sur la fluidité excessive du MBEGBR est donc à chercher ailleurs.
3. Les différences étant observées principalement pour les bétons et mortiers adjuvés, la présence de fines dans les GBR peut intervenir dans les résultats. En effet, il a été identifié une présence de fines non négligeable (autour de 10%) pour les BGR. Cette quantité importante de fines ayant été identifiée par granulométrie laser, soit sur matériau défloculé, elle est à rapprocher des résultats sur bétons et mortiers de GBR adjuvés (contrairement aux résultats sur bétons et mortiers non adjuvés pour lesquels les fines restent agglomérées et pour lesquels la valeur de 2,5% obtenue par tamisage est à considérer). Le dosage en adjuvant est exprimé en proportion du dosage en ciment, cependant il est certain qu'une partie de cet adjuvant agit sur les fines de granulats recyclés. Ainsi il est nécessaire de vérifier que la quantité d'adjuvant disponible reste la même pour le béton et son mortier équivalent.

Le tableau 5 représente pour le BGR et le MBEGBR la teneur en fines au m<sup>3</sup>, le rapport fines/ciment et le dosage en adjuvant calculé par rapport au total "ciment + fines". Ce calcul n'est pas présenté pour les BGNC et MBEGNC puisque la teneur en fine des GNC est inférieure à 0,5%.

**TABLEAU 5. Proportions de fines dans les bétons et mortiers**

	teneur en fines au m <sup>3</sup>	rapport fines/ciment	dosage en adjuvant / ciment+fines
<b>BGR</b>	70,28 kg	0,27	0,94%
<b>MBEGBR</b>	119,14 kg	0,28	0,94%

Comme ces résultats le montrent, l'explication ne vient pas de là : il ne peut être considéré que le MBE ait un dosage en adjuvant différent de celui de son béton. Cependant cette présence de fines défloculées en quantité importante pour le BGR et son mortier peuvent expliquer en partie le fait que, aux jeunes échéances, les écarts entre BGR et BGNC sont moindres que pour les matériaux non adjuvantés. En effet, les fines lorsqu'elles sont défloculées peuvent jouer le rôle de "roulement à bille" et améliorer ainsi la rhéologie du matériau mis en œuvre. Au contraire lorsqu'elles sont agglomérées, elles ont tendance à rigidifier le matériau en raison de l'eau adsorbée à leur surface.

- La méthode de formulation MBE est basée sur un calcul de surface spécifique s'appuyant sur une hypothèse de particules sphériques et calculée à partir des diamètres issus de l'analyse granulométrique par tamisage. Les résultats présentés précédemment indiquent que le GBR a des propriétés morphologiques de circularité et de convexité différentes de celles du GNC, plus éloignées d'une forme sphérique. On peut donc raisonnablement émettre l'hypothèse que la surface spécifique calculée par la méthode MBE est sous-estimée. Ainsi les compositions de mortiers équivalents obtenus ne contiendraient pas assez de sable.
- Enfin, la production de fines au cours du malaxage identifiée et présentée Fig. 4 peut conduire à une sous présence de fines et dans le béton et dans le mortier. Cependant, les granulats de notre étude étant mélangés dans un état humide, cette influence est réduite.

Afin d'illustrer ces résultats de corrélation non optimale béton/mortier équivalent dans le cas des BGR, les courbes de corrélations ont été représentées en superposition d'une courbe dite "de référence" utilisée par le fournisseur de l'adjuvant de l'étude, cette courbe était habituellement utilisée pour un béton C25/30-CEM I avec granulats naturels. Ce travail ayant pour but d'étudier des BGR adjuvantés, seuls les résultats sur les matériaux adjuvantés sont présentés par la suite.

Il peut être considéré que la corrélation béton-mortier équivalent est correcte tant qu'elle se situe dans le fuseau défini par les angles supérieurs droits d'une part et inférieurs gauches d'autre part des zones rectangulaires présentées. Une corrélation entre béton et mortier équivalent est ainsi proposée pour les classes de consistance. La Fig. 7 confirme que pour le BGNC la corrélation béton-mortier équivalent est satisfaisante : les essais sur mortier permettent de prédire les résultats sur le béton qu'il représente. En revanche en ce qui concerne le BGR, les classes de consistance ne correspondent pas.

Les limites de la méthode MBE ont ainsi été identifiées dans le cas d'une application à des bétons de granulats recyclés

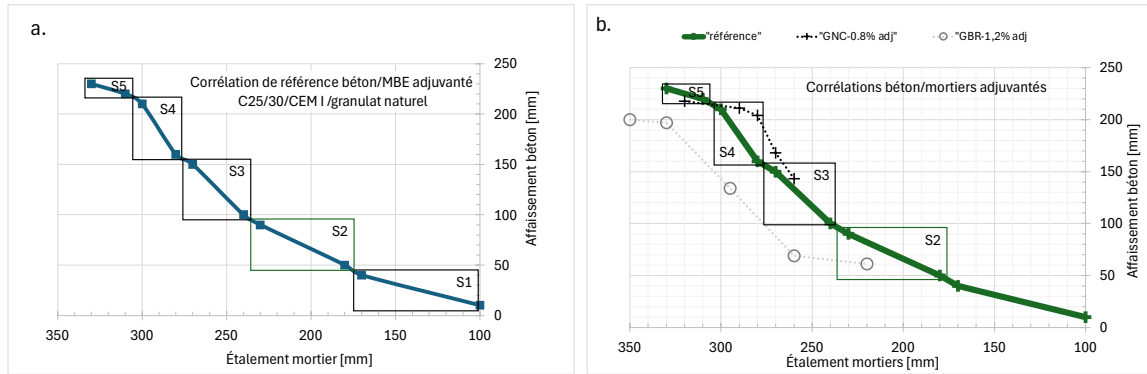


FIGURE 7. Corrélations bétons/MBE de référence (a) et adjuvés (b)

#### IV. PROPOSITIONS DE MODIFICATIONS DE LA METHODE DE FORMULATION MBE APPLIQUEES AUX BGR

##### A. Proposition d'une correction de formulation des MBE recyclés

Nous partons de l'hypothèse qu'une correction en sable liée à la sous-estimation de la surface spécifique, est nécessaire car elle est confirmée par les mesures de convexité et surtout de périmètre et de circularité issus de l'analyse morphologique. Il faut cependant noter que l'effet de ce manque de sable qui conduit à un MBE "trop fluide" est en partie compensé par le fait que le MBEGBR contient plus de pâte que le MBEGNC. La méthode choisie ici pour déterminer la quantité de sable additionnelle a été de chercher à se rapprocher de la courbe de référence. Ainsi, les MBE ont été additionnés avec des dosages additionnels de sable de 1 et 2% pour le sable GNC et de 12 à 17% pour le GBR.

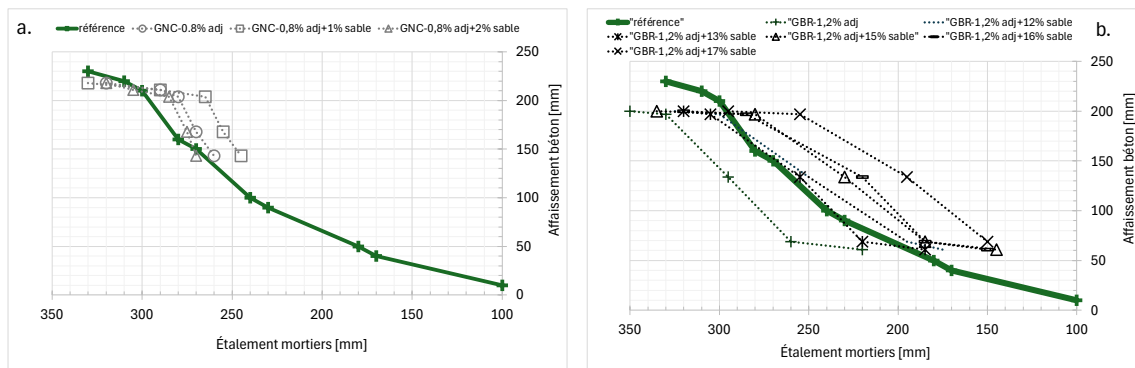


FIGURE 8. Corrélations bétons/MBE adjuvés corrigés en sable – GNC (a) et GBR (b)

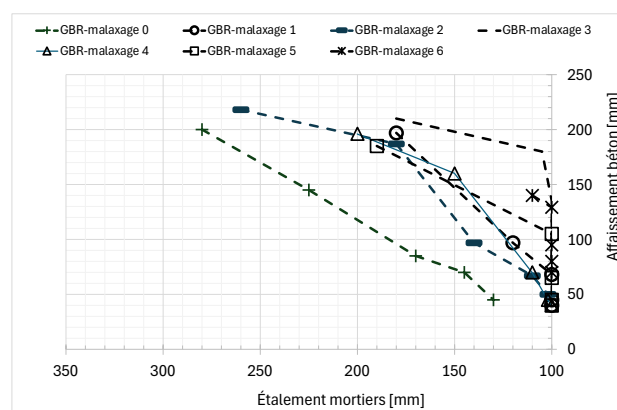
Les résultats (Fig. 8) confirment qu'une correction en sable permet d'améliorer la corrélation béton-mortier équivalent pour le BGR, une correction à 12 ou 13% permet d'améliorer significativement la corrélation : le mortier est plus représentatif de la consistance de son béton et ce à toutes les échéances. De plus cette correction permet de supprimer l'effet de ségrégation observé aux jeunes échéances en raison d'un MBE beaucoup trop fluide. Dans le cas du BGNC, l'effet est moins marqué.

### B. Influence de l'ordre d'incorporation de l'adjuvant

L'influence de la pré-saturation des GBR sur les propriétés à l'état frais des bétons a fait l'objet de plusieurs études reportées dans l'ouvrage de référence du projet national recybéton (IREX PN Recybéton, 2019). L'ordre d'incorporation de l'adjuvant au cours du malaxage peut aussi être un paramètre d'ajustement de la mise en œuvre. Dans le but de vérifier si les corrélations béton-mortier équivalent étaient en mesure de prendre en compte ces paramètres d'ajustement, des bétons et mortiers équivalents ont été mis en œuvre en modifiant les paramètres suivant pour la mise en œuvre du béton et de son mortier équivalent :

- malaxage 0 : les GBR sont pré-humidifiés avec l'eau d'absorption et l'adjuvant est ajouté à l'eau de gâchage : voir la description dans la partie "matériaux et méthodes".
- malaxage 1 : l'adjuvant est ajouté à l'eau de pré-humidification
- malaxage 2 : l'adjuvant est ajouté seul, 2 minutes avant la fin du malaxage
- malaxage 3 : l'adjuvant est mélangé à l'eau de gâchage, mais l'eau et le ciment sont incorporés en premier, les granulats pré-humidifiés sont ajoutés en dernier.
- malaxage 4 : l'adjuvant est mélangé à l'eau de gâchage et d'absorption, mais l'eau et le ciment sont incorporés en premier, les granulats secs sont ajoutés en dernier.
- malaxage 5 : l'adjuvant est mélangé à l'eau de gâchage, l'ordre d'incorporation est conservé mais les GBR sont pré-humidifiés 24 h avant le malaxage
- malaxage 6 : l'adjuvant est mélangé à l'eau de pré-humidification, l'ordre d'incorporation est conservé mais les GBR sont pré-humidifiés 24 h avant le malaxage

Pour cette série d'expérience (Fig. 9), un adjuvant différent mais de même fonction (fort réducteur d'eau et maintien d'ouvrabilité) a été utilisé. Pour cet adjuvant, le dosage nécessaire était de 0,9 % en raison de sa composition de son efficacité différents (testés sur béton).



**FIGURE 9.** Corrélations bétons/MBE avec modification des paramètres de mise en œuvre

Les résultats présentés indiquent que la méthode MBE appliquée aux GBR ne permet pas de faire une étude sur MBE dans le but d'optimiser l'ordre d'incorporation des adjuvants. Les corrélations béton-mortier équivalent ne sont plus valides. En effet pour des bétons qui présentent un affaissement initial plus important que pour la méthode d'incorporation initiale, cette amélioration de se retrouve pas sur le mortier correspondant. (exemple du malaxage 2 ou du malaxage 3 comparé au malaxage 0). D'une façon générale, les mortiers se rigidifient beaucoup plus

vite que leurs bétons lorsque l'ordre d'incorporation de l'adjuvant et ou la pré-humidification des granulats est modifiée. Les résultats d'étalement sont fortement dépendant de ces choix beaucoup plus que les bétons qu'ils sont censés représenter.

## V. CONCLUSION et PERSPECTIVES

Il ressort de cette étude axée sur l'utilisation de la méthode MBE pour l'analyse de l'ouvrabilité et de son maintien au cours de temps d'un béton à 100% de granulats recyclés que :

1. Le MBE de granulats recyclés, contrairement au MBE de granulats naturels, présente des ouvrabilités non corrélables à celles du béton qu'il représente notamment dans les valeurs élevées d'ouvrabilité. Les pertes d'ouvrabilité au cours du temps sont également moindres.
2. La mise en œuvre du MBE de GBR formulé selon les recommandations de la méthode ne permet pas d'estimer de façon satisfaisante la classe de consistance attendue sur le béton.
3. Les hypothèses émises pour expliquer cette mauvaise estimation reposent sur la morphologie particulière des GBR, la présence importante de fines dans les GBR et l'évolution du squelette granulaire du béton et mortier recyclé au cours du malaxage.
4. L'analyse des fines doit être complétée par une granulométrie laser pour estimer la quantité de fines incorporées au béton lors de la mise en œuvre de GBR adjuvants.
5. La caractérisation de la morphologie des granulats recyclés ayant mis évidence que les GBR ont une forme qui s'éloigne d'une sphère de façon plus marquée que les GNC, il est supposé que la méthode de formulation d'un MBE sous-estime la surface spécifique des gravillons et graviers recyclés et conduit ainsi à une sous-évaluation de la quantité de sable à ajouter dans la composition du MBE.
6. L'ajout de sable aux MBE proposé pour corriger cette sous-estimation a donné des résultats satisfaisants permettant d'effectuer la corrélation béton/mortier équivalent.
7. La méthode MBE appliquée aux GBR ne permet pas de faire une étude sur MBE dans le but d'optimiser l'ordre d'incorporation des adjuvants. Les résultats d'étalement sont fortement dépendant de ces choix beaucoup plus que les bétons qu'ils sont censés représenter.

Au-delà d'une confirmation par des études sur d'autres GBR et d'autres formulations de bétons (par exemple pour des rapport E/C différents), ce travail ouvre les perspectives suivantes :

La proposition de correction en sable de cette étude est basée sur une méthode empirique, un approfondissement de l'analyse de la morphologie des GBR permettrait de quantifier leur surface spécifique réelle et ainsi de proposer une formulation du MBE plus ajustée. Une corrélation des propriétés morphologiques avec l'absorption déterminée par classe granulaire réduite permettrait aussi d'améliorer l'utilisation de la méthode MBE.

L'étude proposée ici a été faite avec un taux de remplacement des GN par des GBR de 100% (sables et gravillons), il serait intéressant d'étudier la validité de la méthode pour des taux plus faibles mais également pour des compositions sans sable recyclé, dans ce cas la formulation des MBE prendrait en compte la surface des GBR appliquée à un dosage en sable naturel.

Enfin, le projet national Fastcarb (IREX PN FastCarb) ayant montré que la carbonatation accélérée des GBR conduit à une modification des propriétés des GBR notamment leur absorption,

l'influence de cette carbonatation accélérée des GBR sur l'évolution des propriétés morphologiques et donc sur la validité de la méthode MBE serait intéressante à étudier.

## REFERENCES

IREX- Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil - (2004) *Projet National Calibé, Résultats et recommandations du projet national Calibé - La maîtrise de la qualité du béton*, ed. J.M. Geoffroy, Presses des Ponts et Chaussées, Paris, France, 452p.

Schwartzentruber, A., Catherine, C. (2000), La méthode du mortier de béton équivalent (MBE)- Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés. *Matériaux et Construction*. 33, 475–482. <https://doi.org/10.1007/BF02480524>

Dierkens, M. (2005), *Mesures rhéologiques et modélisation de matériaux en cours de prise*, Thèse de Doctorat de Génie Civil, INSA de Lyon, 281p.

Arnaud Perrot, A., Ahmat, A.S., Rangeard, D. (2020), Impact des caractéristiques du sable concassé sur la consistance de MBE, *Academic Journal of Civil Engineering* 30(1), 161-164, <https://doi.org/10.26168/ajce.38.1.39>

Saad L., Nouri, M., Tahlaoui, M., Khelidj A. (2024), Analyse de l'influence des caractéristiques du sable recycle sur les propriétés rhéologiques du béton autoplaçant par la méthode du mortier de béton équivalent, *Academic Journal of Civil Engineering* 42(1), 593-606, <https://doi.org/10.26168/ajce.42.1.52>

Gomart H., Ghorbel E., Wardeh, G. (2013), Étude de l'ouvrabilité et des propriétés mécaniques de mortiers à base de sable recyclé, *31<sup>èmes</sup> Rencontres universitaires de l'AUGC*, Cachan, France, 29-31 mai 2013

Haddad, O., Aggoun, S., Waller, V., Nachbaur L. (2012), Estimation de la résistance au jeune âge du BAP à partir d'essais sur MBE : une nouvelle approche de la maturométrie, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 16(10), 1202-1215, <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.688614>

Ibrahim H., Wardeh G., Fares, H. and Ghorbel, E. (2024), Effectiveness of the concrete equivalent mortar method for the prediction of fresh and hardened properties of concrete, *Buildings* 14(6), 1-20, <https://doi.org/10.3390/buildings14061610>

Abbas, A., Fathifazl, G., Isgor, O.B., Razaqpur, A.G., Fournier, B., Foo, S. (2009), Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method, *Cement & Concrete Composites* 31, 555-563, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.02.012>

Kim, J. (2021), Properties of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume mix design, *Construction and Building Materials* 301, 124091, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124091>

IREX PN Recybéton (2019), *Concrete Recycling Research and Practice*, e.d de Larrard F. et Colina H., CRC Press, Boca Raton FL., Etats-Unis, 658p

IREX PN FastCarb (2024), *Stockage de CO2 dans les Granulats de Béton Recyclé - Recommandations du PN FastCarb*. Les publications IREX. Paris, France. <https://fastcarb.fr/>