



Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE

Thème 6

Méthode de dosage du sable de béton recyclé dans un mélange avec du sable naturel

Auteur(s) :

Trauchessec R., Lecomte A., Ben Aouda Z.

Organisme(s) :

IJL Nancy

R/17/RECY/037
LC/15/RECY/76
Mars 2017

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

RESUME

L'utilisation de mélanges contenant moins de 10% de sables de bétons recyclés avec du sable naturel permettrait de valoriser ces matériaux en atténuant l'effet de leurs propriétés particulières (absorption, etc.). L'objectif de cette étude est de proposer une méthode de dosage permettant un contrôle du pourcentage de sable recyclé directement sur site (carrière, centrale à béton, etc.) avec une précision de 2%.

La séparation physique des sables recyclés et naturels a été écartée car les sables recyclés présentent une hétérogénéité de composition (pâte de ciment, granulats, impuretés) et une variabilité de couleur, de forme et de granulométrie très importantes. Un dosage basé sur des propriétés spécifiques des sables recyclés (absorption, impuretés bitumineuses et teneur en sulfate) a donc été privilégiée. Les essais ont été réalisés sur des mélanges contenant moins de 10% de sable recyclé provenant de trois plateformes avec quatre sables naturels. Ces dosages ont montré que seule la mesure des sulfates solubles dans l'eau, dans des conditions de répétabilité, à la fois sur le sable recyclé, le sable naturel et le mélange, permet un dosage précis à 2%. La détermination précise du pourcentage de sable recyclé étant finalement difficile à atteindre, une solution alternative serait de fixer également pour ces mélanges des valeurs limites de leurs propriétés physiques et chimiques d'usage, qu'il suffirait alors de contrôler.

ABSTRACT

The use of mixtures containing natural sand with less than 10% of recycled concrete aggregate would enhance this materials valorization by mitigating the effect of their special properties (absorption, etc.). The objective of this study is to propose a method for the control of the recycled sand percentage directly on site (quarry, concrete plant, etc.) with an accuracy of 2%.

Physical separation of recycled and natural sands was rejected because the recycled sands present (i) a heterogeneity of composition (cement paste, aggregate, and impurities) and (ii) an important variability of color, shape and granulometry. Therefore, a dosage based on the measurement of recycled sands specific properties (absorption, asphalt impurities and sulphate content) was preferred. Tests were conducted on mixtures containing less than 10% of sand recycled from three platforms with four natural sands. These tests showed that only determination of soluble sulfates in water under conditions of repeatability on the recycled sand, the natural sand and the mixture would allow dosing with 2% of error. The precise determination of the percentage of recycled sand being difficult to achieve, an alternative solution would be to set limits on the physical and chemical properties of the mixtures and control them.

SOMMAIRE

Introduction.....	7
1. Dosage et incertitude	8
1.1. Dosage par séparation des constituants	8
1.2. Dosage par mesure des propriétés	9
1.3. Dosage par mesure sur une fraction granulaire du mélange.....	10
1.4. Incertitude sur une mesure ponctuelle	12
1.5. Incertitude sur le dosage par mesure de propriétés	13
2. Matériaux et mélanges	16
2.1. Présentation des sables	16
2.2. Granulométrie des sables	17
2.3. Les mélanges.....	18
3. Critères de détermination du dosage.....	19
3.1. Absorption et masse volumique	19
3.2. Coloration et impuretés	20
3.3. Sulfates solubles	22
3.4. Autres propriétés.....	23
4. Résultats.....	24
4.1. Absorption.....	24
4.2. Coloration et impuretés	25
4.3. Sulfate soluble dans l'eau	27
Conclusion.....	29
Références	30
Annexes.....	32

Introduction

Contrairement au sable naturel, les sables issus de bétons recyclés contiennent de la pâte de ciment durcie qui augmente la porosité et l'absorption d'eau de ces matériaux. Leur présence dans le squelette granulaire des bétons perturbe alors les propriétés rhéologiques à l'état frais et altère les propriétés mécaniques à l'état durci (Nguyen *et al.*, 2014). L'impact du sable recyclé semble toutefois limité si la proportion employée reste faible (Evangelista et Brito, 2007, Zhao *et al.*, 2015). L'utilisation de mélanges de sables recyclés et de sables naturels semble donc être une alternative prometteuse pour valoriser une part de la fraction fine des granulats de bétons recyclés.

Il importe cependant de disposer d'une méthode de vérification de la proportion de sable de béton recyclé dans un sable recomposé, y compris à faible teneur, afin de permettre aux divers acteurs (carrières, centrales à béton, etc.) d'effectuer leur suivi de production ou leur contrôle de réception.

L'action 6.1, tranche 4, thème 6, du Projet National Recybéton est consacré à la recherche ou à la mise au point d'une telle méthode. Elle a été confiée à l'Equipe Matériaux pour le Génie Civil de l'Institut Jean Lamour UMR 7198 de Nancy.

L'objectif était d'évaluer la faisabilité puis de tester diverses méthodes de dosage d'un sable recyclé dans un sable recomposé. Le cahier des charges demandait de viser une précision de 2% dans des mélanges contenant jusqu'à 10% de sable recyclé, et que le dosage puisse se faire rapidement sur site, sans matériels (investissements) conséquents et sans utilisation de produits dangereux (composés CMR¹, etc.).

Ce rapport s'intéresse tout d'abord aux incertitudes liées aux essais de caractérisation des sables et à leurs conséquences vis-à-vis du cahier des charges. Les matériaux utilisés et les méthodes de dosage sont présentés dans la deuxième et la troisième partie du rapport. La quatrième partie présente les résultats obtenus et les interprétations qui en sont faites.

¹ CMR : Cancérigène, Mutagène et Reprotoxique

1. Dosage et incertitude

Pour connaître la proportion d'un sable recyclé dans un mélange, on peut envisager d'effectuer un dosage en :

- séparant physiquement les deux constituants du mélange,
- mesurant certaines propriétés résultantes sur le mélange,
- mesurant certaines propriétés résultantes sur une fraction du mélange.

Sont présentés ci-après les principes de ces trois dosages (1.1, 1.2 et 1.3), puis les incertitudes associées à une mesure ponctuelle (1.4), puis au dosage lui-même (1.5).

1.1. Dosage par séparation des constituants

Dans la problématique posée, l'idéal serait de pouvoir séparer physiquement le granulat recyclé du granulat naturel, puis de peser/compter/distinguer les deux constituants pour en connaître leur proportion respective. Deux techniques ont été considérées pour séparer les deux types de granulats :

- un tri manuel ou optique basé sur la couleur ou la forme,
- un tri physique basé sur la différence de densité.

L'avantage de ces techniques serait de pouvoir doser le sable recyclé dans le mélange sans connaître l'origine ou les propriétés du sable naturel et du sable recyclé.

Le tri manuel ou optique est déjà une technique retenue pour caractériser les impuretés dans les granulats recyclés (NF EN 933-11) ou pour séparer les granulats recyclés du plâtre (Deboffe, 2015). Les granulats recyclés étant majoritairement recouverts de pâte de ciment, il paraît alors *a priori* loisible de les différencier des grains naturels. De nombreux essais sur des mélanges ont donc été entrepris dans ce sens, mais ils ont été finalement abandonnés. En effet, certains grains du sable recyclé ne sont que partiellement, voire pas du tout recouverts de ciment et, de ce fait, pas clairement différenciables des grains naturels. De plus, selon sa nature, les grains du sable naturel peuvent présenter des formes et des couleurs non uniformes, comme pour le sable recyclé, ce qui réduit le caractère discriminant de la séparation. Les couleurs/teintes/éclats sont aussi atténuées lorsque les grains sont secs. Enfin, le problème majeur du tri concerne les particules les plus fines (inférieures à 500µm par exemple) : ici, l'analyse et le tri d'une quantité suffisamment représentative devient fastidieuse et illusoire, même à l'aide d'une loupe binoculaire ou d'un système automatisé (?).

Si le tri n'est effectué que sur une fraction du sable, par exemple la fraction 2/4, il faut alors connaître précisément la granularité du sable naturel et du sable recyclé pour étendre le pourcentage trouvé à l'ensemble du mélange². Le dosage doit alors être réalisé en connaissant la granulométrie des divers sables. La section 1.3 détaille le calcul permettant de déterminer la proportion d'un des deux constituants d'un mélange à partir de la granulométrie et du dosage de ce constituant dans une fraction du mélange.

Pour un tri basé sur les propriétés physiques, la séparation des grains de densités différentes peut être envisagée avec diverses méthodes (table densimétrique, cyclone, liqueurs denses, etc.). Ces méthodes pourraient sans doute donner des résultats satisfaisants, mais elles ont été écartées dans le cadre de cette étude car elles présentent plusieurs désavantages, tels le recours à un matériel spécifique onéreux (cyclone, etc.) ou l'utilisation de composé dangereux (liqueur dense). De plus, ces méthodes s'appliquent en général sur des coupures élémentaires et non sur la totalité du sable. En effet, l'inertie d'une particule dépend non seulement de sa densité, mais aussi de son volume (cyclone, jet d'air)... Enfin, pour que le dosage soit précis, il faudrait que tous les grains du sable recyclé contiennent de la pâte de ciment et présentent une densité plus faible que le sable naturel, ce qui n'est le cas...

En conclusion, séparer physiquement les sables recyclés et naturels par les méthodes précitées semble difficile car le sable recyclé : i) contient une proportion de sable non ou partiellement recouvert de pâte de ciment ; ii) présente des colorations variables, parfois proches de celle du sable naturel.

1.2. Dosage par mesure des propriétés

Le dosage via la mesure d'une propriété particulière (appelée P) semble donc être plus facilement réalisable. Ce mode de dosage nécessite cependant de connaître cette propriété pour chacun des sables du mélange... Dans le cas général, cette donnée devrait être connue car les sables commercialisés destinés à la construction possèdent *a priori* un marquage CE (et potentiellement NF) ainsi que, classiquement, une fiche technique produit (FTP).

Le dosage d'une faible proportion (moins de 10%) de sable de béton recyclé (SBR) dans un mélange avec un sable naturel (SN) a donc été recherché à partir de la mesure d'une propriété du mélange (taux de fine, absorption, etc.). En première approximation, on considère qu'il n'y a pas d'interactions au sein du mélange qui modifient la propriété considérée des deux sables. On admet aussi que la propriété

² Par exemple, pour un mélange 0/4 contenant (i) 90% de sable naturel ayant un refus de 40% à 2mm et (ii) 10% de sable recyclé présentant un refus de 20% à 2mm, la proportion de sable recyclé dans la fraction 2/4 est de seulement 5,2% et non de 10%.

considérée est la même quelle que soit la classe de taille considérée, ce qui peut être discutable pour des SBR notamment... En d'autres termes, pour la masse volumique réelle par exemple, la valeur (moyenne) mesurée sur le granulat est considérée la même pour toutes les classes de tailles.

La valeur mesurée sur le mélange (notée $P_{\text{mélange}}$) dépend donc directement de la propriété de chacun des sables (P_{SN} et P_{SBR}) et de leurs proportions respectives dans le mélange (%SN et %SBR). La proportion de sable recyclé est alors calculée en supposant l'additivité de la propriété caractérisant le sable naturel et le sable recyclé (équation 1) :

$$P_{\text{mélange}} = P_{\text{SBR}} \times \%SBR + P_{\text{SN}} \times \%SN \quad (\text{Équation 1})$$

Or, comme le mélange n'est formé que du sable naturel et du sable recyclé, la somme de leur proportion est égale à 1 (équation 2).

$$\%SBR + \%SN = 1 \quad (\text{Équation 2})$$

Les équations 1 et 2 permettent alors de déduire directement la proportion de sable recyclé connaissant la valeur d'une propriété mesurée sur le sable naturel (FTP), sur le sable recyclé (FTP) et sur leur mélange.

$$\%SBR = \frac{P_{\text{mélange}} - P_{\text{SN}}}{P_{\text{SBR}} - P_{\text{SN}}} \quad (\text{Équation 3})$$

Notons que si la valeur caractérisant le sable recyclé est largement contrastée par rapport à celle du sable naturel ($P_{\text{SBR}}/P_{\text{SN}} = 1\ 000$ par exemple), alors l'équation 3 peut être simplifiée (équation 4):

$$\%SBR \sim \frac{P_{\text{mélange}}}{P_{\text{SBR}}} \quad (\text{Équation 4})$$

Souvent, les essais de laboratoire sur sables (valeur de bleu, absorption sans les fines, etc.) sont effectués sur une fraction granulaire seulement (d1/d2) et non sur le spectre complet du sable (0/D). Un dosage de sable recyclé obtenu dans cette condition, s'il est pertinent, ne concerne alors que la fraction granulaire testée ($\%SBR_{d1/d2}$), et non pas le sable complet...

1.3. Dosage par mesure sur une fraction granulaire du mélange

Si le dosage est réalisé sur une fraction d1/d2 du sable recomposé, alors il faut considérer la granulométrie 0/D du sable recyclé et du sable naturel pour déterminer la teneur en sable recyclé dans le sable complet (mélange) 0/D.

Par définition, le pourcentage massique du sable recyclé dans la fraction d1/d2 correspond au ratio de la masse de sable recyclé dans cette fraction par la masse totale (sable naturel + sable recyclé) de cette fraction (équation 5) :

$$\% SBR_{d1/d2} = \frac{\text{Masse SBR}_{d1/d2}}{\text{Masse SN}_{d1/d2} + \text{Masse SBR}_{d1/d2}} \quad (\text{Équation 5})$$

Or, la masse de sable recyclé dans la fraction d1/d2 ($\text{Masse SBR}_{d1/d2}$) est aussi égale au pourcentage de ce sable dans le mélange ($\%SBR_{\text{mélange}}$) multiplié par la proportion massique que représente la fraction d1/d2 dans le sable considéré, de spectre 0/D ($\%SBR_{d1/d2 | 0/D}$). Idem pour le sable naturel. L'équation 5 s'écrit alors :

$$\% SBR_{d1/d2} = \frac{\% SBR_{\text{mélange}} \times \% SBR_{d1/d2 | 0/D}}{\% SN_{\text{mélange}} \times \% SN_{d1/d2 | 0/D} + \% SBR_{\text{mélange}} \times \% SBR_{d1/d2 | 0/D}} \quad (\text{Équation 6})$$

De plus, comme le mélange ne contient que du sable naturel et du sable recyclé (voir équation 2), on écrit alors :

$$\% SBR_{d1/d2} = \frac{\% SBR_{\text{mélange}} \times \% SBR_{d1/d2 | 0/D}}{(1 - \% SBR_{\text{mélange}}) \times \% SN_{d1/d2 | 0/D} + \% SBR_{\text{mélange}} \times \% SBR_{d1/d2 | 0/D}} \quad (\text{Équation 7})$$

Ainsi, la proportion de SBR et de SN présente sur la fraction d1/d2 permet de déterminer la proportion de SBR ($\%SBR_{\text{mélange}}$) dans le mélange complet (seule inconnue dans l'équation 7) :

$$\% SBR_{\text{mélange}} = \frac{\% SBR_{d1/d2} \times \% SN_{d1/d2 | 0/D}}{\% SBR_{d1/d2} (\% SN_{d1/d2 | 0/D} - \% SBR_{d1/d2 | 0/D}) + \% SBR_{d1/d2 | 0/D}} \quad (\text{Équation 8})$$

La figure 1 illustre ces calculs, à titre d'exemple. Elle présente les courbes granulométriques d'un SN (SN_{cal}) et d'un SBR (SBR_{Li}), matériaux utilisés plus loin, et la courbe de leur mélange constitué respectivement de 90% de SN et 10% de SBR (en pratique, ces pourcentages sont inconnus). Supposons que la mesure d'une propriété particulière soit effectuée sur deux fractions d1/d2 du mélange, respectivement 0,315/1 et 2/3,15.

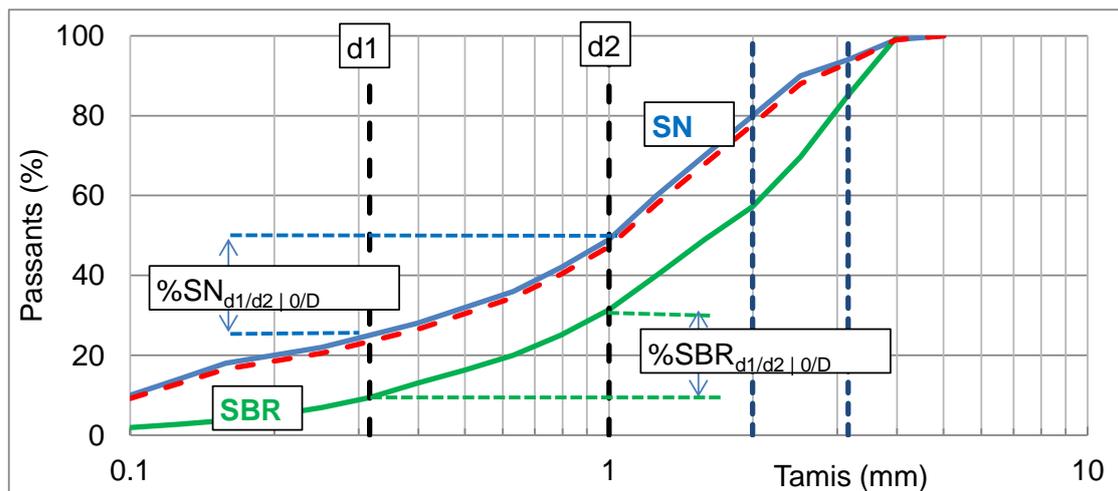


Figure 1 : illustration du calcul du pourcentage de SBR dans une fraction granulaire

En théorie et en vertu des considérations précédentes, la propriété du mélange est alors proportionnelle, dans chaque fraction, à la part respective des deux granulats d'origine dans le mélange, qui sont $\%SN_{d1/d2 | 0/D}$ et $\%SBR_{d1/d2 | 0/D}$, d'après la notation adoptée. Le pourcentage de $SBR_{d1/d2}$, dans la fraction d1/d2 serait alors :

$$\% SBR_{d1/d2} = \frac{0,1 \times \%SBR_{d1/d2 | 0/D}}{0,1 \times \%SBR_{d1/d2 | 0/D} + 0,9 \times \%SN_{d1/d2 | 0/D}} \quad (\text{Équation 9})$$

Le tableau 1 ci-dessous donne les applications numériques.

Tableau 1 : calcul des proportions théoriques de SBR dans deux tranches granulaires d1/d2 pour un mélange à 90% de SN et 10% de SBR.

d1/d2	%SN _{0/D}	%SBR _{0/D}	%SN _{d1/d2 0/D}	%SBR _{d1/d2 0/D}	%SBR _{d1/d2}
0,315/1	90	10	24	22	9,2
2/3,15			14	28	18,1

On constate que le pourcentage de SBR_{d1/d2} présent sur chacune des fractions diffère sensiblement du pourcentage réel du mélange (%SBR_{0/D}=10%)...

Dans la pratique, le pourcentage de SBR mesuré sur une fraction d1/d2 est obtenu par l'équation 3, à partir de la mesure de la propriété considérée. Dans l'exemple précédent, si ce pourcentage est 9,2% pour 0,315/1, ou 18,1% pour 2/3,15, alors la relation 8 permet de remonter au pourcentage réel de SBR dans le mélange, c'est-à-dire %SBR_{0/D}=10%. Par exemple, pour la fraction 2/3,15, le calcul est le suivant :

$$\% SBR_{0/D} = \frac{0,181 \times 14}{0,181 \times (14 - 28) + 28} = 0,1 = 10\%$$

Ces dosages sont toujours basés sur des mesures induisant une incertitude de mesure.

1.4. Incertitude sur une mesure ponctuelle

À chaque essai de laboratoire est rattachée une incertitude de mesure. Elle est liée à l'opérateur, à l'échantillonnage, aux appareils utilisés, etc. Les normes actuelles définissent généralement pour les essais sur granulats une répétabilité (notée : r, définie à partir d'essais réalisés dans un temps court, par un même opérateur, avec le même matériel), une reproductibilité (notée R, définie à partir d'essais réalisés dans différents laboratoires) et une incertitude u (basée sur la reproductibilité et la répétabilité).

À partir d'essais au sein d'un même laboratoire et dans plusieurs laboratoires (essais intra et inter laboratoire), des écarts types de répétabilité et de reproductibilité sont calculés. Si la valeur associée à la propriété mesurée suit une loi normale, de moyenne (μ), alors l'écart type (σ) représente un intervalle de confiance ($\mu \pm \sigma$) autour de la moyenne contenant 68% des valeurs (figure 2).

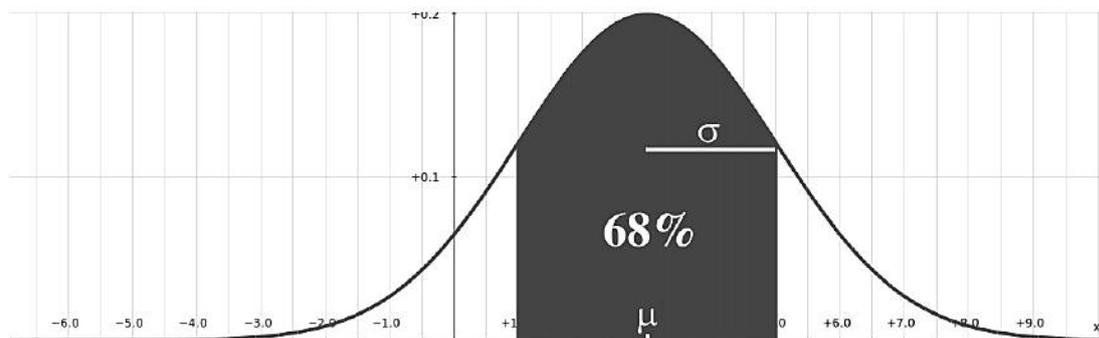


Figure 2 : représentation de l'écart type pour une loi normale (Rouaud, 2013)

Pour calculer la reproductibilité et la répétabilité, les écarts types sont multipliés par un facteur (généralement 2,0 ou 2,6) permettant d'augmenter le niveau de confiance (à respectivement 95 ou 99%).

L'incertitude (u), calculée à partir de la répétabilité et de la reproductibilité, attribuée aux principaux essais sur sables est fournie en annexe n°1.

Par exemple, pour des sables ayant une valeur d'absorption d'eau sans fines (WA₂₄) supérieure à 1%, les données ci-dessous sont disponibles (tableau 2) :

Tableau 2 : données concernant la fidélité des mesures d'absorption (WA, %)

Référence	Données	Valeur
NF 18-545	Incertitude (u)	0,5%
NF EN 1097-6	Répétabilité (r)	0,5%
	Reproductibilité (R)	1,2%
Mishellany <i>et al.</i> (1988)	Répétabilité (r)	$r = 0,12 + 0,039 X^*$
	Reproductibilité (R)	$R = 0,22 + 0,116 X$
	Incertitude (u)	0,3%
Jezequel (2014b) : essais sur sable recyclé	Répétabilité (r)	1%
	Reproductibilité (R)	1%

* X = WA en %

Ces données correspondent aux incertitudes attendues pour une mesure ponctuelle d'absorption. Si la mesure est effectuée plusieurs fois par des essais indépendants (n mesures), alors l'incertitude sur la moyenne des mesures (U) correspond au rapport de l'incertitude pour une mesure ponctuelle sur la racine carrée du nombre d'essai :

$$U_{\text{sur la moyenne de } n \text{ mesure}} = \frac{u_{\text{incertitude sur une mesure ponctuelle}}}{\sqrt{n \text{ (nombre d'essai)}}} \quad (\text{Équation 10})$$

1.5. Incertitude sur le dosage par mesure de propriétés

Lors du dosage, le pourcentage de granulat recyclé est déterminé à partir d'une propriété donnée (équation 3). L'incertitude relative sur le dosage ($\Delta\%_{\text{SBR}} / \%_{\text{SBR}}$), correspond au rapport de l'incertitude absolue ($\Delta\%_{\text{SBR}}$) par le pourcentage de SBR ($\%_{\text{SBR}}$).

L'incertitude absolue sur le pourcentage de sable recyclé ($\Delta\%_{SBR}$) dépend donc de la mesure effectuée et de son incertitude, pour le sable naturel (P_{SN} et ΔP_{SN}), le sable recyclé (P_{SBR} et ΔP_{SBR}), et pour le mélange des deux ($P_{mélange}$ et $\Delta P_{mélange}$). L'incertitude sur le dosage peut être calculée à partir de l'équation 3, en sommant les dérivées partielles (équation 11).

$$\Delta\%_{SBR} = \left| \frac{1}{P_{SBR} - P_{SN}} \right| \times \Delta P_{mélange} + \left| \frac{P_{mélange} - P_{SBR}}{(P_{SBR} - P_{SN})^2} \right| \times \Delta P_{SN} + \left| \frac{P_{SN} - P_{mélange}}{(P_{SBR} - P_{SN})^2} \right| \times \Delta P_{SBR} \quad (\text{Équation 11})$$

L'équation 11 montre clairement que la précision du dosage dépendra directement de l'incertitude de chaque essai ($\Delta P_{mélange}$, ΔP_{SN} , ΔP_{SBR}) mais également de la différence entre propriété du sable recyclé et naturel ($P_{SBR} - P_{SN}$). Par conséquent, il faut étudier des propriétés qui sont particulièrement contrastées pour pouvoir atteindre la meilleure précision possible.

Rappelons que le cahier des charges de l'étude vise à déterminer à 2% près le pourcentage de sable recyclé ($\Delta\%_{SR}=2\%$) dans un mélange. Connaissant l'incertitude sur les divers essais usuels ainsi que les propriétés des sables, il est alors possible de prévoir si un essai donné peut conduire à un dosage ayant une précision de 2% ou moins.

À titre d'exemple, pour :

- un mélange contenant 10% de sable recyclé,
- une erreur de 2% sur le dosage ($\Delta\%_{SBR}$),
- une mesure particulièrement précise avec une erreur relative de 5% seulement ($\Delta P/P=0,05$),

alors, l'équation 11 indique que la valeur attribuée à la propriété du sable recyclé doit être 11 fois supérieure (ou inférieure) à celle du sable naturel. Le tableau ci-dessous (tableau 3) reprend les mêmes calculs pour diverses proportions de SBR dans le mélange, comprises entre 2,5 et 10%. Avec une mesure précise à 5% ($\Delta P/P=5\%$), il est donc possible de déterminer le pourcentage de granulat recyclé à 2% près si la valeur de la propriété considérée est 7 à 11 fois contrastée (entre sable naturel et sable recyclé).

Tableau 3 : Contrastes nécessaires entre les propriétés des sables naturel et recyclé pour avoir une précision de 2% sur le dosage, avec une incertitude de mesure de 5%

Incertitude relative sur la mesure	5%			
Incertitude absolue sur le dosage	2%			
Proportion de granulat recyclé	2,5%	5%	7,5%	10%
Contraste nécessaire entre la propriété du sable naturel et du sable recyclé	6,7	7,7	9	11

Pour une incertitude de mesure relative plus traditionnelle mais encore faible (15% d'incertitude relative), il n'est pas possible d'atteindre une valeur de 2% pour les mélanges à plus de 5% de sable recyclé (tableau 3). Pour 2,5% et 5%, les propriétés doivent être très contrastées (25 à 61 fois, tableau 4) !

Tableau 4 : Contrastes nécessaires entre les propriétés des sables naturel et recyclé pour avoir une précision de 2% sur le dosage, avec une incertitude de mesure de 15%

Incertitude relative sur la mesure	15%			
Incertitude absolue sur le dosage	2%			
Proportion de granulats recyclés	2,5%	5%	7,5%	10%
Contraste nécessaire entre la propriété du sable naturel et du sable recyclé	25	61	/	/

On remarquera que, dans l'hypothèse où la valeur associée à la propriété du sable recyclé est bien plus élevée pour le sable naturel (équation 4), ou inversement, l'incertitude est bien plus simple à calculer (équation 11) :

$$\Delta\%_{SBR} = \left| \frac{1}{P_{SBR}} \right| \times \Delta P_{mélange} + \left| \frac{P_{mélange}}{P_{SBR}^2} \right| \times \Delta P_{SBR} \quad (\text{Équation 12})$$

2. Matériaux et mélanges

Cette partie du rapport présente les sables utilisés (2.1), leur granulométrie (2.2) puis la composition des mélanges réalisés (2.3).

2.1. Présentation des sables

Lors de l'étude, quatre sables naturels (SN) fournis par l'UNPG (Union National des Producteurs de Granulats) ont été utilisés. Ils ont été sélectionnés pour être représentatifs des sables utilisés pour la production de béton en France. La fiche technique produit (FTP) de ces quatre sables est donnée annexe n°2. La granularité de ces sables a été (re)mesurée (voir ci-après) et utilisée pour la réalisation des essais et des calculs. Pour chaque sable, elle s'inscrit bien dans le fuseau de production de la FTP.

Tableau 5 : présentation des sables utilisés durant l'étude

Notation	0/D	Nature	Producteur	Photographie (sable lavée)
SN _{Cal}	0/4	Calcaire	Lafarge	
SN _{Cal/lavé}	0/4	Calcaire lavé	CEMEX	
SN _{Allu}	0/4	Alluvionnaire siliceux roulé lavé	GSM	
SN _{Ortho}	0/4	Orthogneiss	Carrières Lannurien	
SBR _{Pa}	0/4	Recyclé	DLB à Gonesse	
SBR _{Li}	0/4	Recyclé	Recyclage Matériaux du Nord à Fretin	
SBR _{Ly}	0/4	Recyclé	Vicat l'Armaillier	

Pour la réalisation des mélanges, trois sables recyclés (SBR) ont été utilisés. Ils sont issus des plateformes de Gonesse (Paris, SBR_{Pa}), de Fretin (Lille, SBR_{Li}) et de l'Armaillier (Lyon, SBR_{Ly}). Les sables de Lille et Lyon sont des sable 0/6. Afin qu'ils aient le même spectre que les autres, ils ont été tamisés à 4 mm. Le tableau 5 précise la nature et la provenance de ces granulats, et en présente une photographie.

2.2. Granulométrie des sables

Les figures ci-dessous présentent la granulométrie mesurée des sables recyclés (figure 3) et des sables naturels (figure 4) utilisés. Elles sont assez différentes. Pour les sables naturels, le passant à 1 mm par exemple varie entre 30 et 65%. Les coupures lavées (SN_{Cal/lavé} et SN_{allu}) contiennent (logiquement) peu de fines. Leur FTP indique, outre l'incertitude de mesure, que les productions varient de façon significative. Effectuer un dosage à partir d'un essai n'utilisant pas toute la fraction du sable et sans connaître la granularité réelle du sable est donc problématique ...

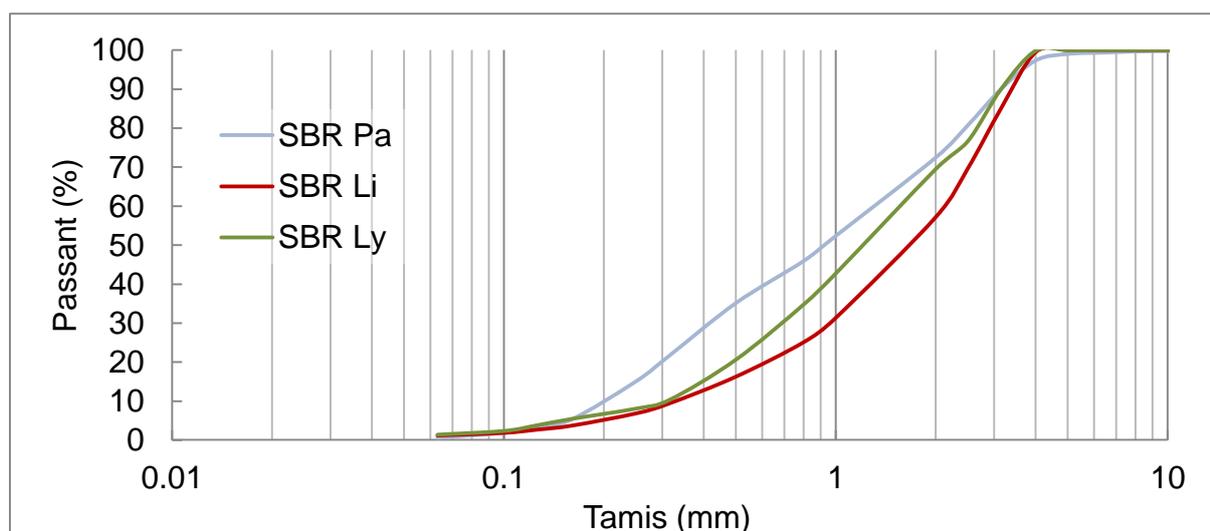


Figure 3 : analyse granulométrique des sables recyclés

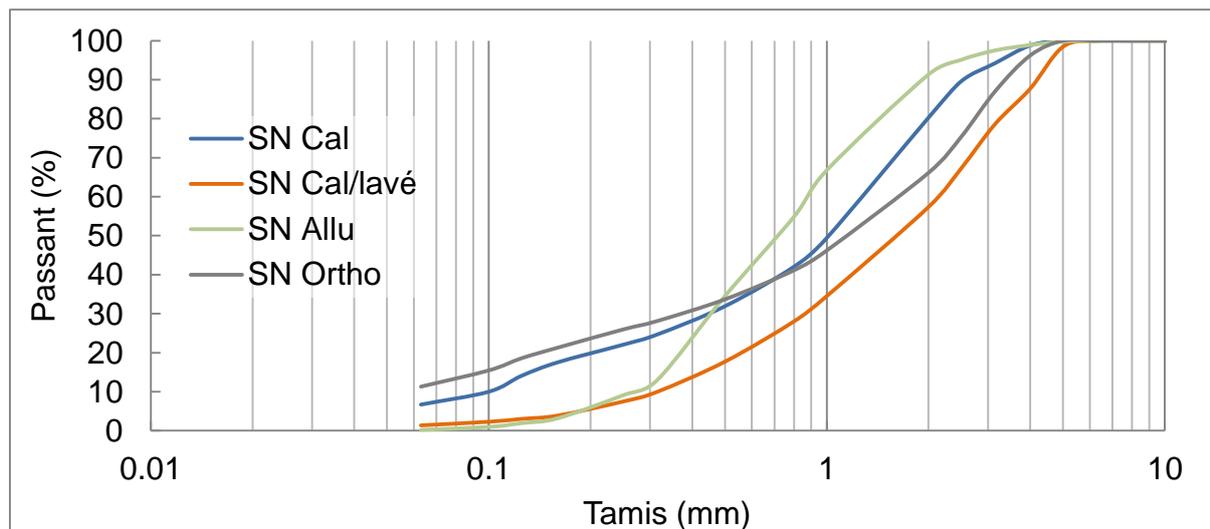


Figure 4 : analyse granulométrique des sables naturels

2.3. Les mélanges

Pour apprécier la faisabilité du dosage sur des mélanges ayant jusqu'à 10% de recyclé, les quatre sables naturels ont été mélangés à 2,5%, 5%, 7,5% et 10% de sable recyclé SBR_{Pa} (16 mélanges).

D'autre part, pour étudier l'impact de la nature du sable recyclé, les quatre sables naturels ont été mélangés à 7,5% des deux autres sables recyclés (8 mélanges).

Il s'agit de mélanges pondéraux sur granulats secs. Le tableau 6 présente l'ensemble des mélanges réalisés.

Tableau 6 : mélanges réalisés

	SN_{Cal}	$SN_{Cal/lavé}$	SN_{Allu}	SN_{Ortho}
2,5%	SBR_{Pa}	SBR_{Pa}	SBR_{Pa}	SBR_{Pa}
5%	SBR_{Pa}	SBR_{Pa}	SBR_{Pa}	SBR_{Pa}
7,5%	$SBR_{Pa} + SBR_{Ly} + SBR_{Li}$			
10%	SBR_{Pa}	SBR_{Pa}	SBR_{Pa}	SBR_{Pa}

Afin de produire des mélanges homogènes, les sables (présentant des teneurs en eau différentes) ont été séchés 24h à 105°C. Ensuite, des mélanges de 10kg ont été réalisés dans un conteneur cylindrique de diamètre 400mm placé sur un agitateur à rouleau durant 5 minutes (délai jugé suffisant pour atteindre l'homogénéité attendue, sans entraîner d'attrition particulière).

3. Critères de détermination du dosage

Cette partie décrit les raisons pour lesquelles l'absorption (3.1), le nombre de particules bitumineuses (3.2) et les sulfates solubles (3.3) ont été choisis comme propriétés repères pour effectuer le dosage. On présente également les mesures réalisées sur les sables recyclés et naturels seuls.

3.1. Absorption et masse volumique

Une caractéristique majeure des granulats recyclés est leur plus forte porosité et absorption d'eau, en lien avec la présence de pâte de ciment durci et de mortier, notamment dans les sables. La porosité des granulats recyclés induit également une masse volumique plus faible. Des mesures réalisées selon la norme NF EN 1097-6, dans le cadre du projet national Recybéton (Jezequel, 2014a) 16 sables recyclés issus de 13 plateformes ont attesté de ces propriétés :

- une absorption sans fine (WA_{24}) de $5,7 \pm 2,0$ % (figure 4),
- une absorption (Ab) de $6,4 \pm 2,0$ %,
- une masse volumique réelle ($\rho_{réelle}$) de $2,26 \pm 0,12$ %,

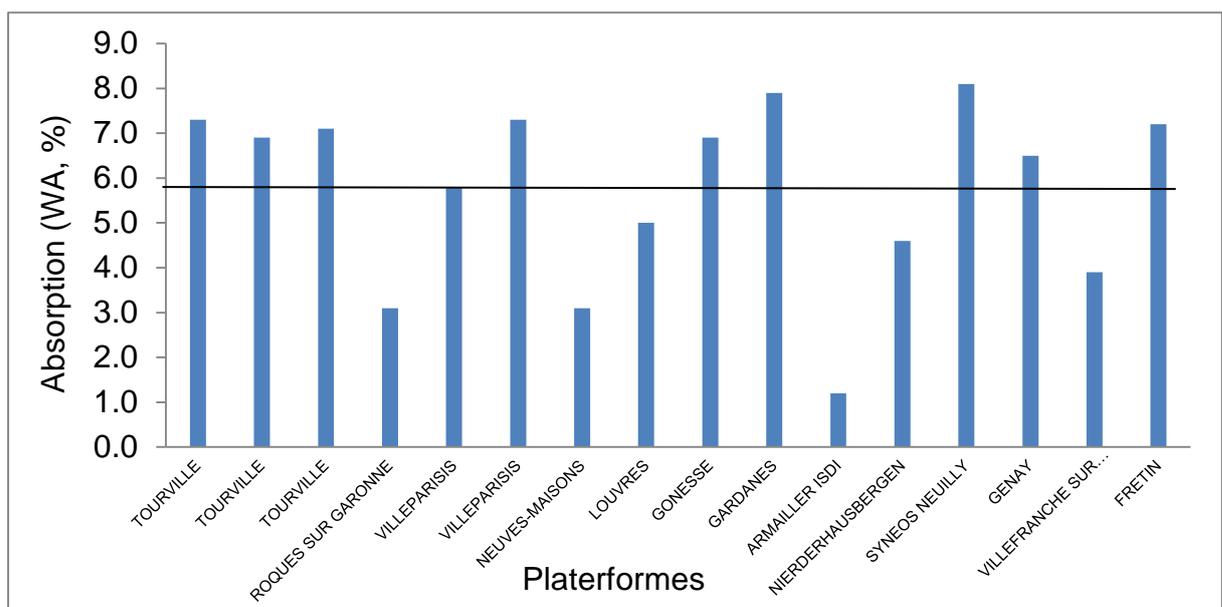


Figure 5 : Résultat des essais d'absorption d'eau des sables recyclés (NF EN 1097-6) réalisés dans le cadre de la tranche 1 de Recybéton sur 13 plateformes et 16 sables

Le tableau 7 présente les absorptions et les masses volumiques des sables naturels et des sables de bétons recyclés de la présente étude. Les quatre sables naturels ont des absorptions similaires et faibles (1,0 à 2,3%) ainsi que des masses volumiques réelles plutôt élevées et variant relativement peu (2,51 - 2,59 t/m³). La présence de pâte de ciment dans les sables recyclés augmente fortement l'absorption (6,3 à 8,6%) et réduit la masse volumique (2,10 - 2,25 t/m³). En moyenne, l'absorption des sables recyclés (7,7%) est 5,9 fois plus élevée que celle des sables naturels (1,3%) tandis que la masse volumique des sables naturels est

1,2 fois supérieures à celle des sables recyclés ($\text{prd}_{\text{SN}} = 2,55 \text{ t/m}^3$ et $\text{prd}_{\text{SBR}} = 2,17 \text{ t/m}^3$).

Tableau 7 : absorption et masse volumique réelle des sables utilisés

		WA ₂₄ (%)	Moyenne WA ₂₄ (%)	prd (t/m ³)	Moyenne prd (t/m ³)
Sable naturel	SN _{Cal}	1,04	1,34	2,59	2,55
	SN _{Cal/lavé}	2,29		2,51	
	SN _{Allu}	0,99		2,55	
	SN _{Orhto}	1,03		2,55	
Sable recyclé	SBR Pa	8,59	7,66	2,10	2,17
	SBR Li	8,12		2,16	
	SBR Ly	6,27		2,25	

Sur la base de ces mesures, on peut considérer alors qu'un mélange « type » à 10% présente une absorption de 1,97% et une masse volumique de 2,51 t/m³. Même si l'incertitude absolue sur ces valeurs est relativement faible ($\pm 0,3\%$ et $\pm 0,02 \text{ t/m}^3$), l'incertitude absolue sur le dosage (équation 11) est forte. Elle est en effet de 9,5% pour l'absorption et de 10,5% pour la masse volumique. Ces valeurs sont bien supérieures aux 2% de précision escomptés. Cependant, l'absorption d'eau a été retenue à ce stade car c'est une mesure classiquement réalisée.

Remarque : l'incertitude sur un dosage basé sur la masse volumique est légèrement plus élevée que l'incertitude basée sur l'absorption d'eau, alors que l'incertitude relative sur une mesure d'absorption ($0,3/1,97=15,2\%$) est près de 20 fois supérieure à celle sur la masse volumique ($0,02/2,51=0,8\%$). L'incertitude élevée pour le dosage à partir de la masse volumique est due à la faible variation occasionnée par la présence de sable recyclé (1,6% de diminution) contre une augmentation de 50% pour l'absorption (de 1,3 à 2,0%). C'est ce qui justifie le choix précédent (dosage à partir de la mesure de l'absorption d'eau).

3.2. Coloration et impuretés

Étant donnée la différence de coloration des sables recyclés et naturels (tableau 3), une séparation manuelle du sable recyclé dans la fraction 1/4 du mélange, après lavage, a été tenté. Des essais sur plusieurs mélanges ont montré que cette méthode n'était pas fiable car le sable recyclé contient des grains sans ou partiellement recouverts de pâte de ciment qu'il est difficile de distinguer de façon univoque des grains du sable naturel.

Les sables recyclés de cette étude contiennent toutefois des particules noires, absentes des sables naturels et facilement identifiable dans le sable recyclé et les mélanges. Ces particules noires correspondent à de l'enrobé ou à des grains recouverts de bitume. Ces grains ramollissent lors d'un chauffage à l'étuve ou se dissolvent dans un solvant organique.

Il n'est pas étonnant de trouver des matériaux bitumineux dans ces sables recyclés. En effet, l'essai normalisé (NF EN 933-11) réalisé sur 17 coupures 8/D de gravillons de diverses plateformes (Jezequel, 2014a) (figure 6) montre que les granulats recyclés contiennent couramment une faible quantité de ce type "d'impureté" ($R_a \approx 1,5\%$).

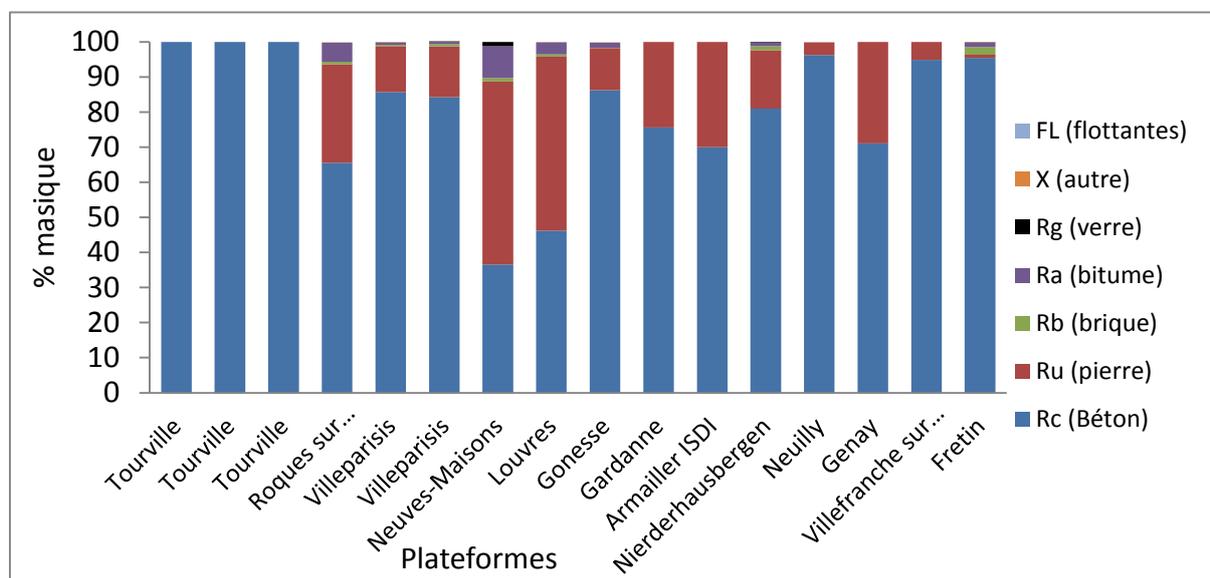


Figure 6 : Résultats des essais de propreté des granulats recyclés (NF EN 933-11) sur 17 coupures 8/D provenant de 13 plateformes (données issues de Jezequel, 2014a)

Pour déterminer la proportion de ces particules dans le sable, seules les fractions 1/2, 2/2,5 et 2,5/4 ont été étudiées car les particules plus fines sont difficiles à traiter. Les sables ont été lavés sous eau sur des tamis de 2,5, 2 et 1mm puis séchée à 105°C durant 8h. Chaque fraction a ensuite été étalée sur une feuille de papier format A3. Pour chaque fraction, la masse utilisée a été adaptée pour limiter le nombre de particules à séparer. Il faut un nombre suffisant de grains pour que l'essai soit représentatif, mais toutefois pas trop élevé pour que le dosage ne soit pas trop fastidieux. Un nombre d'environ 2200 particules a été estimé statistiquement comme suffisant. Les masses correspondantes de chaque coupure sont alors de 10g, 33g et 100g environ pour les fractions 1/2, 2/2,5 et 2,5/4 respectivement. Le nombre de gains « bitumineux » compté dans chaque fraction des trois sables recyclés est présenté dans le tableau 8.

Tableau 8 : nombre de grains bitumineux sur les différentes fractions granulaires

Fraction granulaire	Nombre de particules noires pour environ 2200 grains						
	Sables naturels				Sables recyclés		
	SN _{Cal}	SN _{Cal/lavé}	SN _{Allu}	SBR Ly	SBR-Pa	SBR-Li	SBR-Ly
2,5/4 (sur 100g)	0	0	0	0	144	160	136
2/2,5 (sur 33,18g)	0	0	0	0	140	141	118
1/2 (sur 9,83g)	0	0	0	0	145	92	100

Les sables recyclés ne contiennent pas une proportion importante de particules noires ($\approx 0,5\%$) mais elles sont facilement identifiables, et donc "triables"...

Comme précédemment, on peut considérer un mélange type formé de 90 % d'un sable naturel sans particules foncées et 10% d'un sable recyclé (comptant 140 particules foncées en moyenne). Basé sur la répétabilité obtenue lors de l'étude, si ces mesures sont réalisées avec une incertitude relative de 20% pour le mélange et de 10% pour le sable recyclé, alors l'incertitude absolue sur le dosage (équation 11) est de 12%. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle de l'absorption (9,5%), pour la coupure considérée. Il faut alors tenir compte de la granulométrie des sables pour trouver le dosage du mélange (voir 1.5.). Le dosage par cet essai a cependant été testé car il est basé sur une méthode particulièrement rapide et simple, ne demandant pas d'investissement particulier.

3.3. Sulfates solubles

Des mesures réalisées selon la norme NF EN 1744-1, §10 (figure 7) sur 16 sables recyclés provenant de 13 plateformes (Jezequel, 2014a) ont mis en évidence que les sables issus de bétons recyclés contiennent une proportion singulière de sulfates solubles dans l'eau ($0,23 \pm 0,12$ %). Ces sulfates sont issus de la pâte de ciment durcie ou de plâtres de déconstruction. Dans l'acide, la proportion de sulfates solubles atteint même $0,79 \pm 0,42$ %.

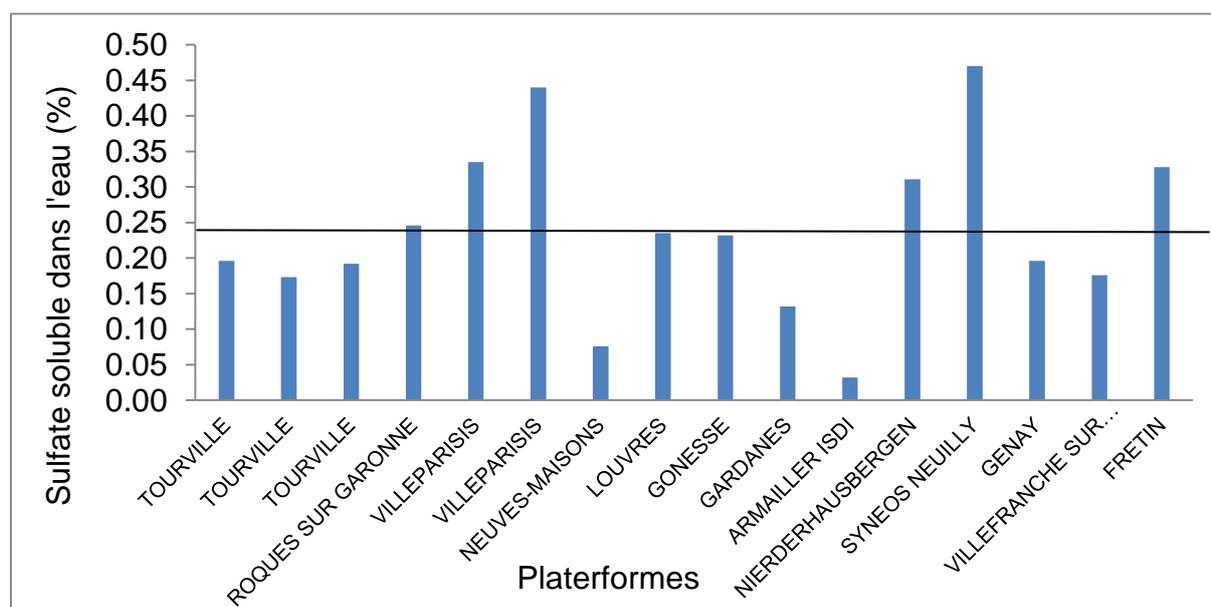


Figure 7 : Résultat des essais de sulfates solubles dans l'eau des sables recyclés (NF EN 1744-1, §10) sur 16 sables issus de 13 plateformes (données issues de Jezequel, 2014a)

La mesure des sulfates solubles dans l'eau selon la norme consiste à mettre 25g de sable (0/4) dans 1 litre d'eau à 60°C durant 15 minutes sous agitation puis à mesurer (après filtration sur Büchner) la quantité de sulfate libérée avec un spectrophotomètre. Cet essai a été réalisé pour les divers sables de l'étude (tableau 7). Pour les sables naturels, compte tenu de leur faible titrage en sulfates solubles, il a été nécessaire de réduire la quantité d'eau (500g) et d'augmenter la proportion de sable (300g) pour atteindre une concentration en sulfate détectable par le spectrophotomètre (20-200mg/L). Les mesures (tableau 9) montrent que la quantité de sulfates est particulièrement faible pour les sables naturels (moins de 0,03%)

tandis qu'elle est bien plus élevée pour les sables recyclés (entre 0,09 et 0,22%). Pour deux sables naturels, la proportion de sulfate soluble est même inférieure à 0,003%. Comparativement à ces sables naturels, les sables recyclés libèrent donc au moins 30 fois plus de sulfates...

Tableau 9 : sulfate soluble dans l'eau des sables utilisés

	Sable naturel				Sable recyclé		
	SN Cal	SN Cal/lavé	SN Allu	SN Ortho	SBR Pa	SBR Li	SBR Ly
Masse d'eau (g)	500	500	500	500	1000	1000	1000
Masse de sable (g)	300	300	300	300	25	25	25
Sulfate soluble (%)	< 0,003	0,028	< 0,003	0,028	0,196	0,220	0,088

Remarque : il est logique de mesurer des valeurs très faibles pour les sables naturels SN_{Cal} et SN_{Allu} puisque leur FTP (annexe 2) indique que la quantité de soufre total est de 0,003% et 0,01% respectivement. Pour les calculs lors des dosages, la quantité de soufre soluble n'ayant pu être mesurée, elle a été considérée comme nulle (équation 4).

Comme précédemment, un calcul d'incertitude peut être réalisé sur la base d'un mélange à 90% de sable naturel et 10% d'un sable recyclé, libérant respectivement 0,030%, 0,014% et 0,17% de sulfate. Si ces mesures sont effectuées avec une incertitude relative de 15%, alors l'incertitude absolue sur le dosage (équation 9) est de 5,7%. Cette valeur est la plus faible de toutes les propriétés envisagées (pour rappel, l'incertitude sur l'absorption est de 9,5%).

3.4. Autres propriétés

Les autres propriétés normatives des sables n'ont pas été retenues pour doser le sable de béton recyclé dans les mélanges. La raison principale provient du trop faible contraste de valeurs qui existe entre sable naturel et sable recyclé, du fuseau de fabrication variable et/ou des incertitudes trop élevées sur les mesures. C'est le cas notamment de la friabilité des sables, de la teneur en chlorure, de l'équivalent de sable, ou encore de la valeur de bleu, de la teneur en fines et du module de finesse.

De même, d'autres propriétés envisagées initialement ont été écartées. C'est le cas du pH, assujéti au degré de carbonatation des sables de béton recyclé, qui diminue rapidement dès que les bétons concassés sont exposés à l'air... C'est le cas aussi de la teneur en pâte de ciment durci, dont la détermination nécessite *a priori* l'utilisation de composés chimiques particuliers (méthanol, acide salicylique, etc.) ou d'autres méthodes nécessitant des moyens de caractérisation sophistiqués (DRX, ATG, etc.).

4. Résultats

Cette dernière partie du rapport présente les résultats du calcul du dosage en sables de bétons recyclés des 24 mélanges dédiés aux trois méthodes sélectionnées : absorption (4.1), impuretés (4.2) et sulfates solubles (4.3).

4.1. Absorption

La figure 8 présente le pourcentage de sable recyclé calculé à partir de la mesure de l'absorption d'eau pour les mélanges des quatre sables naturels avec 2,5, 5, 7,5 et 10% de sable recyclé SBR_{Pa}. La figure 9 présente les résultats pour les mélanges à 7,5% des trois sables recyclés avec les quatre sables naturels.

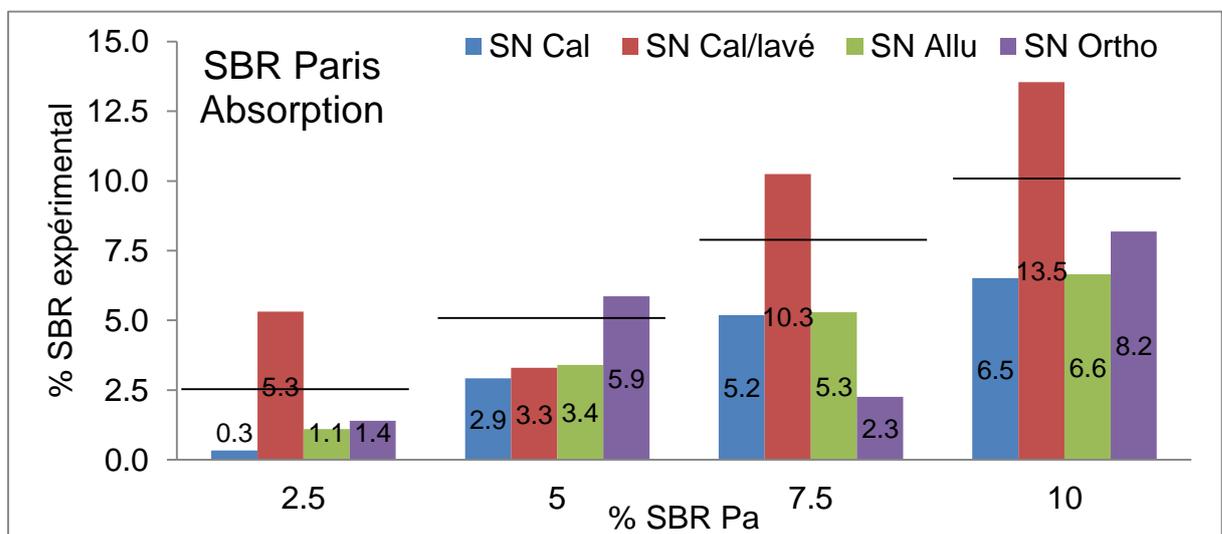


Figure 8 : Dosage par la mesure de l'absorption pour les quatre sables naturels et différentes proportions du sable recyclés de Paris

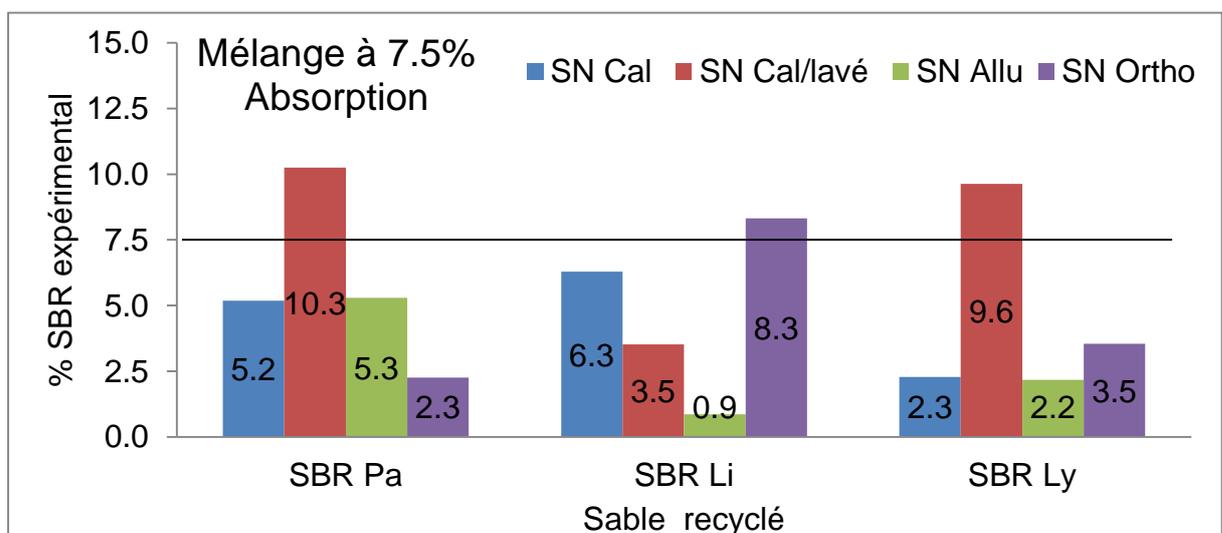


Figure 9 : Dosage par la mesure de l'absorption des mélanges à 7,5% pour les quatre sables naturels et les différents sables recyclés

Globalement, le pourcentage mesuré augmente bien avec le pourcentage effectif de granulats recyclés (figure 8), mais les dosages trouvés sont généralement plus faibles que ceux réalisés. Les différences pourraient s'expliquer par une sur-estimation de l'absorption d'eau du sable recyclé. Notons cependant que les essais d'absorption d'eau ont été réalisés par un même opérateur avec le même matériel, tant sur les matériaux seuls que sur les mélanges. L'écart moyen du dosage sur les 24 mélanges (figure 8) est de 2,8% avec une valeur maximale de 6,6%. L'incertitude réelle est donc plus faible que l'incertitude théorique (9,5%) calculée dans le paragraphe 3.1 pour un mélange type à 10%. Mais elle reste encore trop forte pour retrouver avec la précision requise les dosages réels des mélanges.

Pour un même mélange ($SN_{cal/lavé}-SBR_{Pa}-7,5\%$), le dosage a été réalisé cinq fois. Le tableau 10 présente le résultat de ces essais et montre qu'un faible écart (0,5%) sur la mesure de l'absorption d'eau (2,4 - 2,9%), modifie fortement le pourcentage de sable recyclé trouvé (2,6% - 10,3%). On notera cependant que la réalisation de cinq essais permet d'obtenir une moyenne (6,5%) proche de la valeur réelle (7,5%). La réalisation de plusieurs mesures sur un mélange permettrait d'effectuer un dosage plus précis, mais nécessite un temps d'essais bien trop long. Il est souhaitable aussi que l'absorption d'eau du sable recyclé et du sable naturel soit mesurée avec la plus grande précision possible (plusieurs essais).

Tableau 10 : répétabilité du dosage basé sur l'absorption

	Absorption $SN_{cal/lavé}-BR_{Pa} 7,5\%$					Moyenne	Écart maximal avec la moyenne
	WA24 (%)	2,94	2,76	2,47	2,81		
WA24 (%)	2,94	2,76	2,47	2,81	2,55	2,7	0,3
% SRB	10,3	7,4	2,6	8,3	4,0	6,5	4,5

4.2. Coloration et impuretés

Le tri manuel des particules bitumineuses a permis de déterminer le pourcentage de sable recyclé dans les mélanges constitués des quatre sables naturels et :

- d'une quantité croissante (2,5, 5, 7,5, 10%) de sable recyclé SBR_{Pa} (figure 10),
- de 7,5% de sable recyclé provenant des trois plateformes (figure 11).

Pour les mélanges contenant des proportions variables de SBR_{Pa} (figure 10), l'erreur sur le dosage est relativement faible (1,2% en moyenne) avec un maximum à 3,5%. À titre d'exemple, pour les mélanges de SN_{Cal} et SN_{Allu} à 2,5% et 10% de SBR_{Pa} , des photographies en annexe n°3 montrent l'augmentation du nombre de particules foncées (bitumineuses) dans la fraction 2,5/4. Pour les essais réalisés avec le sable recyclé de Lille (SRB_{Li}), l'erreur est légèrement plus élevée (figure 11). Pour ceux réalisés avec le sable de Lyon (SRB_{Ly}), la proportion de sable recyclé est largement surestimée (8% en moyenne !). Pour ce sable, la discrimination des particules bitumineuses a été difficile car des grains (naturels) sont partiellement

recouverts de bitume (contamination de grains non bitumineux par les grains bitumineux au moment du séchage à 105°C ?).

Comme précédemment, le comptage de grain a été réalisé cinq fois (tableau 11) sur un mélange SN_{cal}-SBR_{Pa}-7,5%. Sur les trois fractions 1/2, 2/2,5 et 2,5/4, de 5 à 22 particules foncées sont présentes. En moyenne, 38 particules sont comptées à chaque essai, avec un écart-type de 7. La proportion de sable recyclé ainsi calculée est de 8,6% avec une erreur lors du dosage de 2,7% au maximum (%SBR = 10,2%, essai n°1). Même en caractérisant (granulométrie et particules foncées) en condition de répétabilité le sable naturel, le sable recyclé et le mélange, le dosage par cette méthode n'est donc pas assez précis (erreur supérieure à 2%).

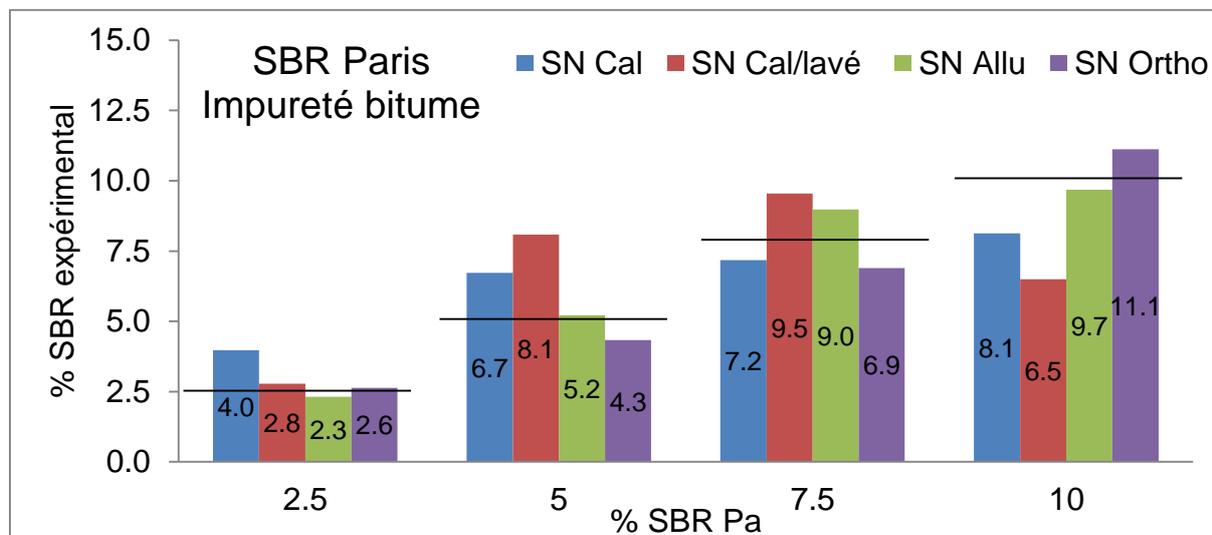


Figure 10 : Dosage par la méthode des impuretés pour les quatre sables naturels et différentes proportions du sable recyclés du bassin Parisien

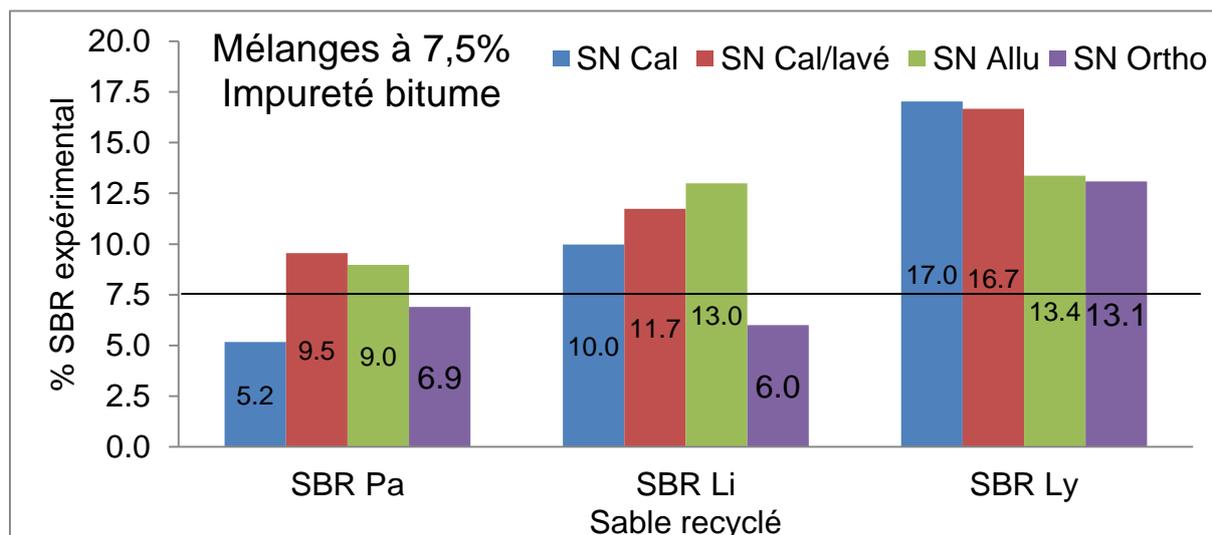


Figure 21 : Dosage par la méthode des impuretés des mélanges à 7,5% pour les quatre sables naturels et les trois sables recyclés

Tableau 11 : Répétabilité essai de comptage

	Fractions	SNcal - SBR Paris 7.5%					Moyenne	Écart-type
Nombre de particules noir	2,5/4 (sur 100g)	20	15	17	22	16	18	3
	2/2,5 (sur 33.18g)	13	8	12	9	5	9	3
	1/2 (sur 9.83g)	12	8	9	14	11	11	2
	Somme	45	31	38	45	32	38	7
% SBR		10,2	6,8	8,5	10,1	7,2	8,6	2,1
Erreur		2,7	0,7	1,0	2,6	0,3	1,1	

4.3. Sulfate soluble dans l'eau

Les dosages effectués à partir de la teneur de sulfate soluble dans l'eau dans les sables naturels, recyclés et le mélange sont particulièrement précis (erreur maximale de 1,8%) pour toutes les proportions (figure 12). Pour les mélanges contenant 7,5% de chacun des trois granulats recyclés, l'erreur est également inférieure à 2% (figure 13).

Sur les 24 essais, l'erreur obtenue lors du dosage est en moyenne de 1,0 % (avec un écart type de 0,4% et une erreur maximale de 1,9%). Cette méthode de dosage est non seulement rapide (1h pour un essai), mais elle est aussi la plus précise. Ce résultat provient notamment du fort contraste entre la quantité de sulfate soluble dans le granulat naturel et dans le granulat recyclé.

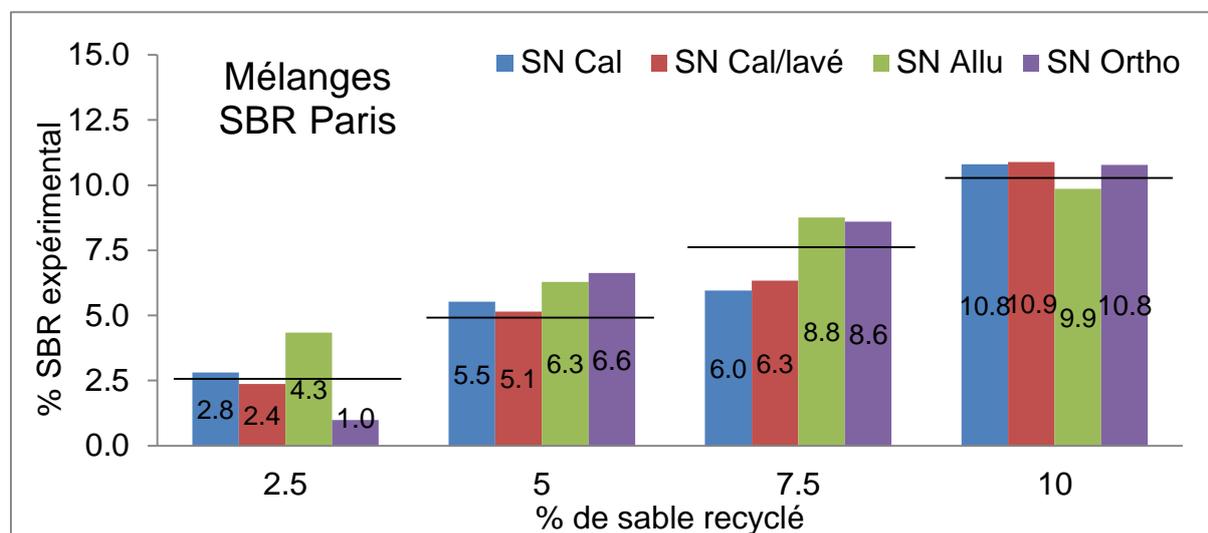


Figure 12 : Dosage par la méthode des sulfates solubles dans l'eau pour les quatre sables naturels et différentes proportions du sable recyclés de Paris

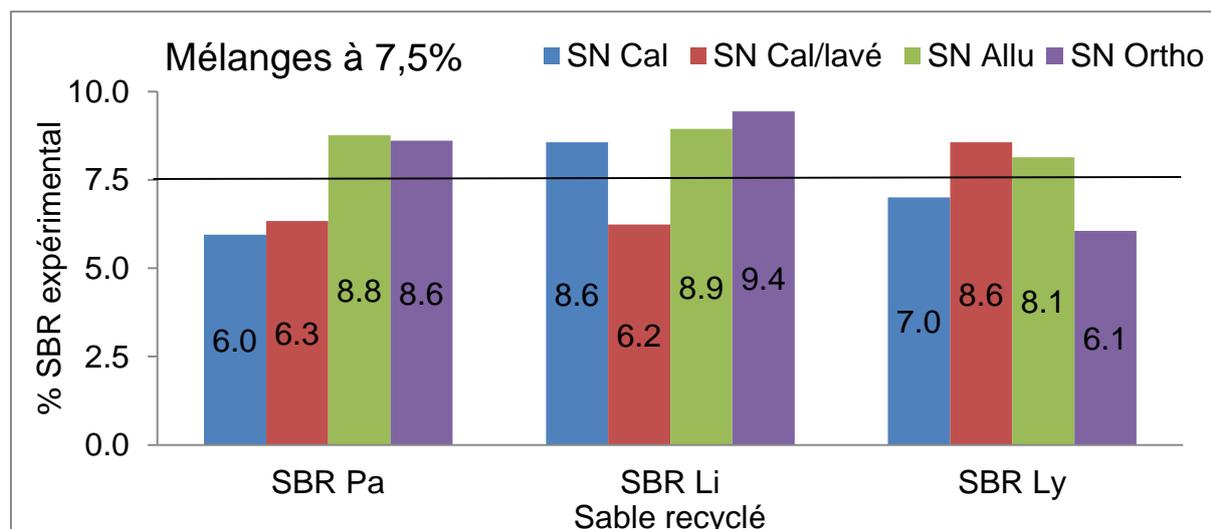


Figure 13 : Dosage par la méthode des sulfates solubles dans l'eau des mélanges à 7,5% pour les quatre sables naturels et les trois sables recyclés

Un essai de sulfate soluble a été réalisé sept fois sur un même mélange (7,5% SBR-Pa avec SNcal, tableau 12). L'écart maximum avec la moyenne des concentrations mesurées est de 16 mg/L. Cet écart correspond à une erreur relative de 15% sur la teneur en sulfate soluble. A l'issue des sept essais, la moyenne des dosages est de 7,3% et un écart maximum de 1,5% (erreur faible).

Tableau 2 : répétabilité de la mesure des sulfates soluble dans l'eau

Essais	1	2	3	4	5	6	7	Moyenne	Écart maximum
Résultat mesuré (mg/l)	94	85	76	95	91	93	70	86	16
Tso ₄ (%)	0,016	0,014	0,013	0,016	0,015	0,016	0,012	0,014	0,003
% SBR	8,0	7,2	6,5	8,1	7,7	7,9	6,0	7,3	1,5

Cette précision n'est pas en accord avec l'incertitude ($U=0,1\%$) fournie dans la norme. En effet, celle-ci correspondrait à une incertitude relative de 50% alors que nous observons une incertitude de 15% seulement. Des essais inter laboratoire seraient donc nécessaires pour confirmer la précision de cette méthode de dosage.

Les inconvénients de cette méthode résident dans l'achat d'un spectrophotomètre et dans la nécessité de connaître l'origine des sables et leur teneur en sulfates solubles. Notons cependant qu'un spectrophotomètre coûte près de 1200 euros et que la teneur en sulfate soluble des granulats recyclés produit sera très probablement contrôlée régulièrement (risque de RSI).

Remarque : un contrôle rapide sur site par utilisation de kit (colorimétrie) permet également une mesure sans spectrophotomètre mais elle est semi-quantitative (Paulus et al. 2016). Elle ne permettrait *a priori* donc pas un dosage précis.

Conclusion

Le mélange d'un sable naturel avec une faible proportion ($\leq 10\%$) de sable recyclé modifie sensiblement les propriétés du sable naturel. Ces modifications sont liées aux propriétés particulières des sables recyclés. Le sable recyclé, même présent à moins de 10% est détectable. En effet, cette étude sur des mélanges réalisés avec trois sables recyclés et quatre sables naturels a montré que l'absorption d'eau, la présence de bitume et la proportion de sulfate soluble dans l'eau sont des propriétés sensiblement impactées par la présence du sable recyclé. Par exemple, l'absorption d'eau augmente, passant de 1,0% pour le sable naturel à 1,5% pour le mélange, la quantité de sulfate soluble peut doubler, passant de 0,02% à 0,04%, et la présence de plusieurs dizaines de particules bitumineuses peuvent être observée sur la fraction 1/4 (par exemple).

Le dosage du sable recyclé dans le mélange, en lien avec ces variations, n'est cependant pas aisé. En effet, même si les variations induites sont importantes en termes relatifs (valeurs doublées), le dosage repose obligatoirement sur les propriétés mesurées sur le mélange, mais également sur celles connues (FTP) ou mesurées sur le sable recyclé et le sable naturel. Il faudrait que ces essais soient précis à 5-10% en erreur relative pour pouvoir déterminer la proportion de sable recyclé à 2% près, avec les méthodes sélectionnées.

Le dosage par mesure des sulfates solubles dans l'eau apparaît être la méthode la plus efficace, l'erreur sur le dosage étant inférieure à 2% (lors de nos tests). Les essais (sables naturel, recyclé et mélange) ayant été tous réalisés dans le même laboratoire, par le même opérateur, il faudrait prendre en compte l'incertitude réelle liée à la reproductibilité des essais et à la variabilité de la production. Des essais inter laboratoires seraient donc nécessaires pour confirmer l'intérêt de cette méthode.

Concrètement, ce type de dosage sera complexe à mettre en œuvre car il faudrait un contrôle régulier de la teneur en sulfate des sables recyclé, naturel et du mélange ainsi que l'achat du spectrophotomètre et de kit. Au-delà du pourcentage exact de sable recyclé, la limitation des propriétés physico-chimiques du mélange (absorption, sulfate soluble, impuretés), au regard des spécifications requises par l'usage, permettraient également de s'assurer de la qualité du mélange.

Références

Normatives :

AFNOR, NF EN 1097-6 (2014). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau.

AFNOR, NF EN 933-11 (2009). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 11 : essai de classification des constituants de gravillons recyclés.

AFNOR, NF EN 1744-1+A1 (2010). Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats - Partie 1 : Analyse chimique.

AFNOR, NF P18-545 (2011). Granulats Éléments de définition, conformité et codification.

Bibliographiques :

Nguyen, VN., Cassagnabere, Mouret, M., F., Cyr, M. (2014). Évolution de la rhéologie du béton recyclé frais. Projet national de recherche et développement recybéton. Rapport R/14/RECY/12, 42 pages.

Deboffet, C. (2015). Technologie de tri sélectif des granulats béton concassé. Projet national de recherche et développement recybéton. Rapport R/15/RECY/027, 33 pages.

Evangelista, L., de Brito J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. Cement and concrete composites, 29, 397– 401.

Jezequel, F (2014a). Étude de variabilité des caractéristiques de granulats recyclés issus de diverses sources et suivi. Partie 1 – variabilité géographique. Projet national de recherche et développement recybéton. Rapport R/14/RECY/013, 38 pages.

Jezequel, F. (2014b). Incertitude de mesure et pertinence des essais de masse volumique et absorption d'eau sur les granulats recyclés. Projet national de recherche et développement recybéton. Rapport R/14/RECY/014, 10 pages.

Mishellany, A., Delalande, G., Tourenq, C. (1998). La normalisation des granulats et l'Europe. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 216, 67-77.

Paulus, H., Jagueneau, M., Lafon, R., Waterblez, O. Dosage rapide sur site des sulfates dans les granulats recyclés issus du BTP (2016). Déchets Sciences et Techniques n°71.

Rouaud M. (2013). Calcul d'incertitudes. 220 pages. ISBN 978-2-9549309-0-9

Zhao, Z., Remond, S., Damidot, D., Xu, W. (2015). Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 81, 179–186.

Annexes

Annexe 1 : Incertitudes des essais sur sables

Les incertitudes ci-dessous sont issues du tableau 5 de la norme NF P18-545 (2011-09-01) : Granulats - Éléments de définition, conformité et codification.

Caractéristiques géométriques				
Norme	Caractéristique	Symbole	Unité	u
NF EN 933-1	Granularité des sables et graves (1)		% en masse	
	1,4D			1
	D			2
	Autres tamis:			
	passant ≤ 5 %			1
	passant > 5 et ≤ 20 %			2
	passant > 20 et ≤ 66 %			4
	passant > 66 %			3
	Module de finesse	FM	sans unité	0,15
NF NF EN 933-6	Écoulement des sables	ECS	secondes	2

Caractéristiques mécaniques				
P 18-576	Friabilité des sables	FS	%	5

Caractéristiques chimiques				
Norme	Caractéristique	Symbole	Unité	u
NF EN 1744-1	Teneur en chlorures	C	%	0,003
	Teneur en sulfates solubles dans l'acide	AS		0,15 si ≤ 0,5
				0,5 si > 0,5
	Teneur en soufre total	S		0,1
	Teneur en sulfates solubles dans l'eau			0,1

Caractéristiques physiques				
Norme	Caractéristique	Symbole	Unité	u
NF EN 1097-6	Coefficient d'absorption d'eau des sables	WA ₂₄	%	0,5
				0,3 si ≤ 1

Propreté des sables et graves				
Norme	Caractéristique	Symbole	Unité	u
prNF EN 933-8	Équivalent de sable	SE(10)	%	5
NF EN 933-9	Essai au bleu de méthylène			
	Essai sur 0/2 mm	MB	g,bleu/1 kg 0/2	0,5
	Essai sur 0/D mm	MB _{0/D}	g,bleu/1kg de 0/D	0,15
	Essai sur < 0,125mm	MB _F	g,bleu/1 kg de fines	2

Annexe 2 : Fiche Techniques Produits (FTP) des sables naturels,

Sable n°1 : SN_{Cal}



Lafarge Granulats France - Signes
Lieu-dit de Croquefigues
83870 Signes
Tel:0494108100

Fiche Technique de Produit

Engagement du 01/07/2015 au 31/12/2015

Page 1/1, Imprimé le mercredi 8 juillet 2015

Granulats : SG0030 : 0/4 Cal C SIG Béton
Péetrographie : Calcaire
Elaboration : Concassé

Partie contractuelle

Valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage

Classe granulaire

0	4
---	---

Norme

Norme NF P 18-545 Article 10

Catégorie

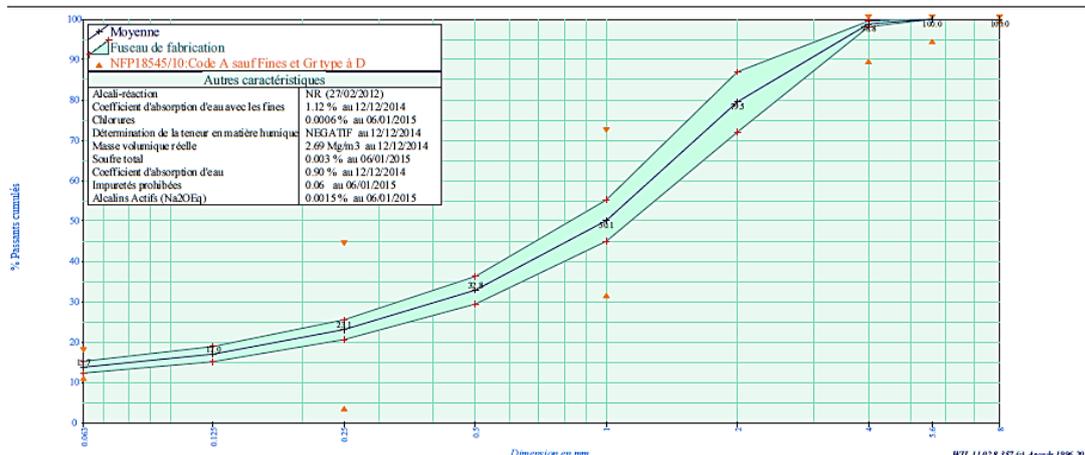
Code A sauf Fines et Gr type à D

	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	5.6	8	f	FM	MB	W
Etendue e	6		40		40		10			6	0.6		
Incertitude U	2		1		4		2	1	0	2	0.15	0.5	
V.S.S.+U	19.5		45		76		100	100		19.5	3.35	2.00	
V.S.S.	17.5		44		72		100	100		17.5	3.20	1.50	
V.S.I.	11.5		4		32		90	95	100	11.5	2.60	0.00	
V.S.I.-U	9.5		3		28		88	94	100	9.5	2.45	0.00	

Partie informative

Résultats de production

	du 06/01/15 au 30/06/15												
	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	5.6	8	f	FM	MB	W
Maximum	15.6	20	27	38	57	88	100	100	100	15.6	3.29	1.10	0.7
Xf+1.25xEcart-types	15.2	19	26	36	55	87	100	100	100	14.8	3.19	0.85	0.5
Moyenne Xf	13.7	17	23	33	50	79	99	100	100	13.4	2.99	0.69	0.3
Xf-1.25xEcart-types	12.3	15	21	29	45	72	98	100	100	12.1	2.78	0.54	0.1
Minimum	11.4	14	19	28	43	68	98	100	100	10.9	2.72	0.30	0.2
Ecart-type	1.16	1.5	2.0	2.7	4.1	6.0	0.6	0.0	0.0	1.10	0.160	0.120	0.10
Nombre de résultats	23	23	23	23	23	23	23	23	23	122	23	134	23



Marcel Garcia

Sable n°2 : SN_{Cal/lavé}



Carrière de GUDMONT
CEMEX GRANULATS Carrière de GUDMONT
52320 GUDMONT

**Fiche
Technique Produit**
Engagement du 24/01/2015 au 23/07/2015

Page 1/1, imprimé le vendredi 23 janvier 2015

0/4 lavé

Pétrographie : CALCAIRE
Elaboration : CONCASSE LAVE

Partie normative
Valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage

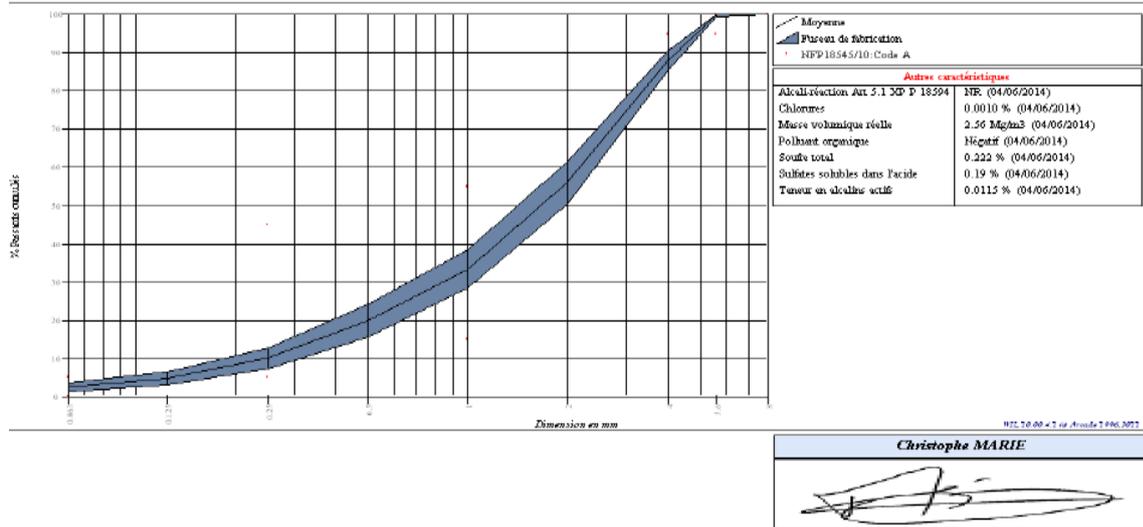
Classe granulaire	Norme	Catégorie
0 4	Norme NF P 18-545 Article 10	Code A

	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	D	1.4D	2D	FM	MB	WA24
Etendue ø			40		40		4	5.6	8	0.6		
V.S.S.+U	6.0		47		59		97			4.35	2.00	3.00
V.S.S.	5.0		45		55		95			4.20	1.50	2.50
V.S.I.			5		15		85	95	100	3.60		
V.S.I.-U			3		11		83	94		3.45		

Partie informative
Résultats de production

du 30/07/14 au 15/12/14

	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	5.6	8	FM	MB	WA24
Maximum	4.5	8	16	30	42	65	92	100	100	4.10	0.80	
95-125BarkApp	3.7	7	13	24	36	62	91	100	100	4.06		
Moyenne Xf	2.5	5	10	20	33	56	88	100	100	3.87	0.58	2.00
95-125BarkApp	1.3	3	7	16	28	50	86	100	100	3.69		
Minimum	1.1	3	8	14	25	50	85	99	100	3.50	0.40	
Ecart-type	0.95	1.4	2.1	3.5	4.0	4.5	2.0	0.2	0.0	0.150	0.107	
Nombre de tests	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	12	1



Sable n°3 : SN_{Allu}



GSM
Italcementi Group

SECTEUR PAYS DE LA LOIRE

3 rue Charron
CS 90412
44804 St Herblain Cedex

Fiche Technique de Produit

Engagement du 05/09/2015 au 04/03/2016

Page 1/1, imprimé le vendredi 4 septembre 2015

Producteur : MISSILLAC
Granulats : 0/4 Roulé type (0/2.5) NFC
Pétrographie : Alluvionnaire siliceux Pliocène
Elaboration : Roulé lavé

Utilisateur : MISSILLAC

Partie contractuelle

Valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage

Classe granulaire	Norme													Code
	0	4	Norme NF P 18-545 Article 10 - EN 12620 et EN 13139											

	0.063	0.125	0.25	0.315	0.4	0.5	1	2	2.5	3.15	4	5.6	8	EN_f	SE(10)	MFe
V.S.S.+U	4.0		42				98		100		100	100	100	4.00		3.35
V.S.S.	3.0		40				95		99		100	100	100	3.00		3.20
V.S.I.	0.0		0				55		89		90	95	100	0.00	65	2.60
V.S.I.-U	0.0		0				52		87		88	94	100	0.00	60	2.45
Ecart-type max			12.12				12.12									0.18

Partie informative

Résultats de production

du 06/03/15 au 02/09/15

	0.063	0.125	0.25	0.315	0.4	0.5	1	2	2.5	3.15	4	5.6	8	EN_f	SE(10)	MFe
Maximum	1.1	4	10	14	26	38	75	97	98	99	99	100	100	1.10	91	3.21
Xf+1.25xEcart-types	0.8	3	8	12	22	33	71	93	96	98	99	100	100	0.81	91	3.11
Moyenne Xf	0.5	2	7	11	19	30	67	91	95	97	99	100	100	0.53	87	3.04
Xf-1.25xEcart-types	0.3	2	6	9	16	26	64	89	93	96	99	100	100	0.25	82	2.97
Minimum	0.1	1	5	8	14	24	60	88	93	96	98	100	100	0.10	75	2.89
Ecart-type	0.22	0.5	0.9	1.2	2.2	3.0	2.7	1.5	1.0	0.6	0.3	0.0	0.0	0.222	3.0	0.050
Nombre de résultats	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51

Autres caractéristiques

Na2OEq 0.0060 % (01/04/2015)

ImP 0.00 % (01/04/2015)

S 0.010 % (01/04/2015)

PO Absence (01/04/2015)

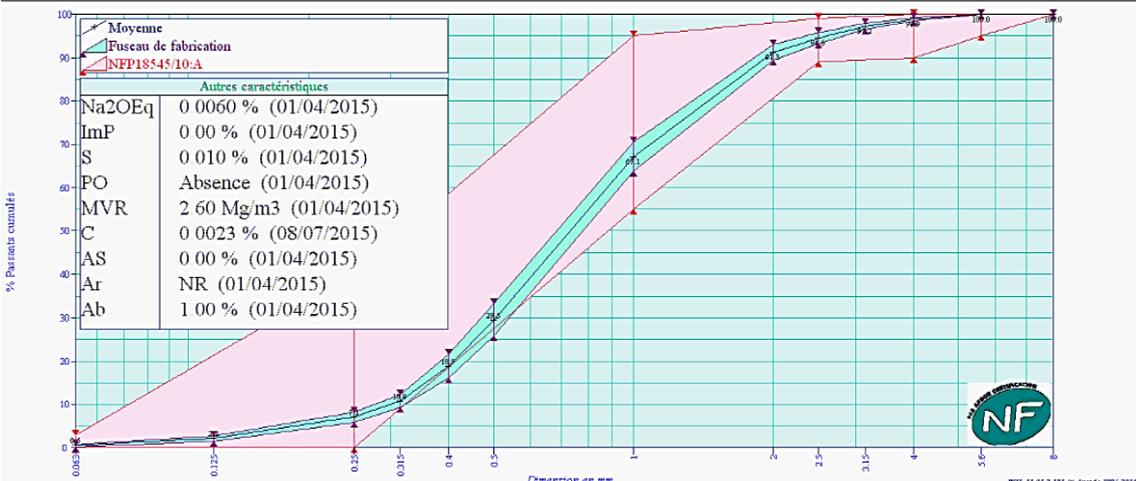
MVR 2.60 Mg/m3 (01/04/2015)

C 0.0023 % (08/07/2015)

AS 0.00 % (01/04/2015)

Ar NR (01/04/2015)

Ab 1.00 % (01/04/2015)



A. Qualité

AFNOR Certification
11 Rue Francis de Pressensé 93371 La Plaine St. Denis Cedex

Sable n°4 : SN_{Ortho}



CARRIERE LANNURIEN
Neiz Vran
29170 SAINT EVARZEC

**Fiche Technique
de Produit**

Engagement du 15/10/2015 au 14/04/2016
Page 1/1, imprimé le mercredi 14 octobre 2015

0/4

PETROGRAPHIE : ORTHO GNEISS

Partie contractuelle

Valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage

Classe granulaire

0	4
---	---

Norme

Norme NF P 18-545 Article 8 - EN 13043

Code

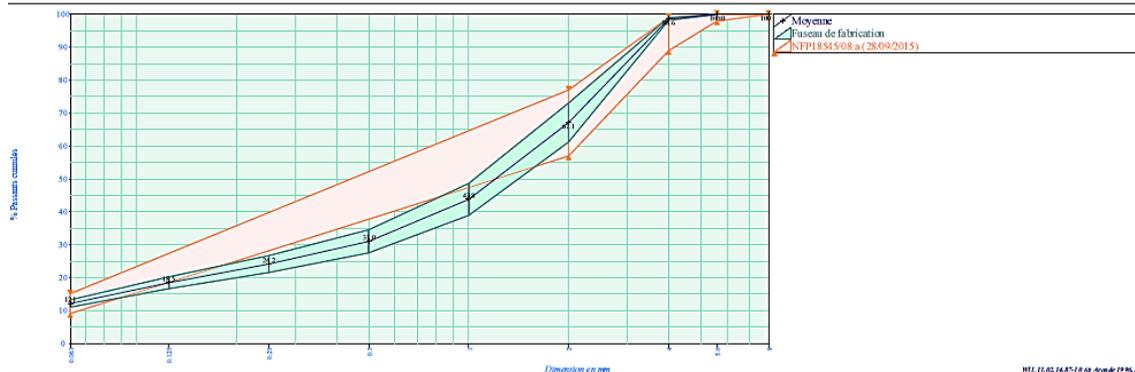
a (28/09/2015)

	0.063	0.125	0.25	0.5	1	D/2 2	D 4	1.4D 5.6	2D 8	f	MB 1999	MVR
Etendue e	6					20	10					
Incertitude U	2					3	2	1	0		0.5	
V.S.S.+U	17.1					80	100				2.5	
V.S.S.	15.1					77	99			15.1	2.0	
V.S.I.	9.1					57	89	98	100	9.1		
V.S.I.-U	7.1					54	87	97	100			
Ecart-type max	1.82					6.06						
Valeur Type	12.1	18	24	31	44	67	99	100	100	12.1	1.3	2.65

Partie informative

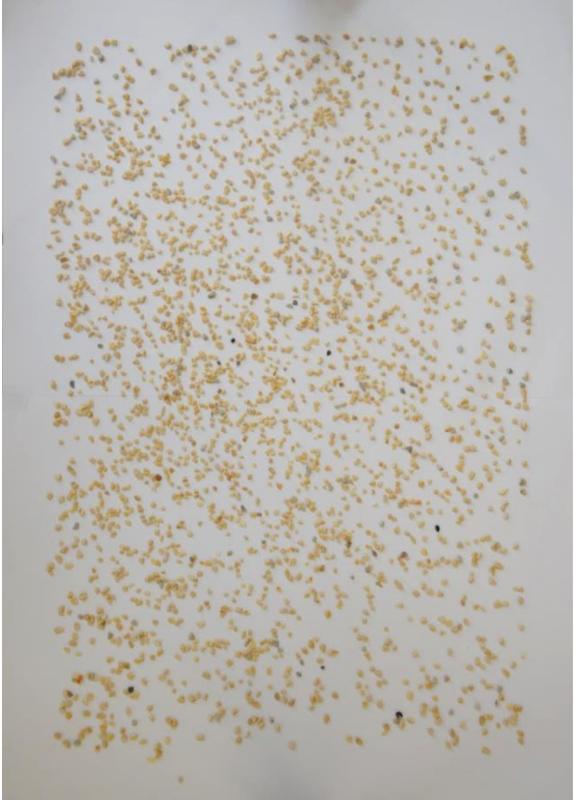
Résultats de production

	du 08/07/15 au 28/09/15											
	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	5.6	8	f	MB 1999	MVR
Maximum	13.4	20	26	34	49	74	99	100	100	13.4	1.8	
Moyenne Xf	12.1	18	24	31	44	67	99	100	100	12.1	1.3	2.65
Minimum	10.8	16	20	25	35	56	98	100	100	10.8	1.0	
Ecart-type	0.87	1.4	2.1	2.8	3.9	4.8	0.3	0.0	0.0	0.90	0.30	
Nombre de résultats	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	1
Etendue	2.6	4	6	9	14	18	1	0	0	2.6	0.8	0.00



Christophe GOREL

Annexe 3 : Photographies après tamisage sous eau et séchage 24h à l'étude.

Mélanges SN _{Cal} – SBR _{Par} / fraction 2,5/4	
2,5% - 6 particules foncées bitumineuses 	10% - 18 particules bitumineuses 
Mélanges SN _{Cal} – SBR _{Par} / fraction 2,5/4	
2,5% - 16 particules bitumineuses 	10% - 44 particules bitumineuses 