



Projet National de recherche et développement

THEME 2

ÉVALUATION DES METHODES DE CARACTERISATION DES GRANULATS NATURELS APPLIQUEES AUX RECYCLES : MESURES DE MASSES VOLUMIQUES ET D'ABSORPTION D'EAU

Rédigé par

Cléo Laneyrie, Anne-Lise Beaucour, Albert Noumowé
L2MGC – Université de Cergy Pontoise

R/14/RECY/009
LC/12/RECY/08
Septembre 2014



Projet National de recherche et développement

FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : Évaluation des méthodes de caractérisation des granulats naturels appliquées aux recyclés

RAPPORT N° : R/14/RECY/009

DATE D'ÉTABLISSEMENT : Septembre 2014

AUTEUR(S) : C. LANEYRIE, AL. BEAUCOUR, A. NOUMOWE

ORGANISME(S) CHARGE(S) DE L'ACTION : L2MGC

THEME DE RATTACHEMENT : 2

LETTRE DE COMMANDE : LC/12/RECY/08

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

I. Problématique – objectifs de l'étude.....	3
II. Démarche expérimentale.....	3
III. Essais sur gravillons.....	4
1. Masse volumique réelle, norme EN NF 1097-6.....	4
2. Coefficient d'absorption d'eau à 24h.....	6
3. Répétabilité / hétérogénéité du lot.....	7
IV. Essais sur sable recyclé.....	7
1. Séchage jusqu'à l'état saturé surface sèche selon la norme EN 1097-6.....	8
2. Séchage jusqu'à l'état saturé surface sèche sur dispositif Büchner.....	8
3. Comparaison des deux méthodes de séchage du sable.....	9
4. Comparaison des résultats avec et sans fines (méthode Büchner).....	10
V. Cinétique d'absorption.....	10
1. Description des protocoles expérimentaux.....	10
a. Méthode norme EN 1097-6 (granulats naturels).....	10
b. Méthode norme E 1097-6 (granulat légers).....	11
2. Cinétique d'absorption des gravillons recyclés.....	12
a. Résultats de la cinétique à court terme.....	12
b. Résultats de la cinétique à long terme.....	13
3. Cinétique d'absorption du sable recyclé.....	13
VI. Etude de l'ouvrabilité de mortiers.....	15
1. Méthode 1 - immersion 24h.....	16
2. Méthode 2 - ajout de la quantité exacte d'eau d'absorption.....	16
VII. Conclusion.....	18

I. Problématique – objectifs de l'étude

Les granulats recyclés peuvent présenter des caractéristiques un peu moins bonnes que les granulats naturels en termes de porosité, friabilité et variabilité. Il semble donc essentiel, pour pouvoir les utiliser, de déterminer avec précision leur masse volumique, coefficient d'absorption d'eau à 24h. Par ailleurs, l'absorption d'eau n'étant pas instantanée, il est également important d'estimer une cinétique d'absorption pour les granulats recyclés. Il n'existe à ce jour aucune norme spécifique pour la mesure d'absorption d'eau des granulats recyclés. La norme EN 1097-6 [1], qui décrit le protocole de mesure de masse volumique des granulats naturels, présente quelques problèmes lorsqu'on cherche à l'appliquer aux granulats recyclés. En effet, elle ne tient compte ni de la possible influence des fines, ni de la difficulté de détermination de l'état dit « saturé surface sèche ».

A travers cette étude, nous cherchons à évaluer d'une part l'applicabilité de la norme actuelle à l'étude des granulats recyclés et d'autre part à évaluer leur cinétique d'absorption.

II. Démarche expérimentale

Le mode opératoire de la norme présente quelques points assez peu adaptés aux granulats recyclés, notamment la partie « séchage des granulats » jusqu'à l'obtention d'un état saturé surface sèche. Non seulement cet état est assez difficile à estimer, mais les granulats recyclés étant plutôt friables, l'action mécanique du chiffon entraîne la perte de fragments difficilement récupérables. Concernant le sable, la norme EN NF 1097-6 prévoit un protocole expérimental présentant quelques difficultés d'application dans la pratique. En effet l'étape de séchage des granulats est prévue à l'aide d'un « faible courant d'air chaud » qui, s'il est efficace quand le sable est encore très mouillé, l'est beaucoup moins quand on s'approche de l'état saturé surface sèche. Cette étape entraîne fréquemment une perte non négligeable de la prise d'essai et compromet la fiabilité des résultats. Nous avons donc ici décidé de comparer le protocole normé avec une technique de séchage sur entonnoir Büchner inspirée de la norme allemande DIN V 18004 pour les sables légers [2].

D'autre part, les grains présentent une porosité importante et l'absorption d'eau n'est pas instantanée. Il est donc primordial, pour pouvoir les utiliser, de tenir compte de leur cinétique d'absorption. Afin d'évaluer cette cinétique, un mode opératoire plus adapté que la méthode normée, et s'inspirant d'un procédé décrit par Tam *et al* [3] est testé. Cette méthode s'approche également de la méthode normée appliquée aux granulats légers [Annexe C EN 1097-6]. Des mesures sont réalisées sur dix minutes, et à long terme. La norme et les travaux de [3] ne concernent que les gravillons légers. La procédure appliquée aux sables reste à évaluer.

	gravillons ([4-10] et [10-20])	sable ([0-4] et [0,063-4])
masse volumique	méthode au pycnomètre norme EN 1097-6	méthode au pycnomètre norme EN 1097-6 / méthode séchage sur Büchner
coefficient d'absorption	méthode au pycnomètre norme EN 1097-6	méthode au pycnomètre norme EN 1097-6 /méthode séchage sur Büchner
cinétique d'absorption	méthode au pycnomètre norme EN 1097-6 / méthode norme granulats légers	Méthode au pycnomètre méthode séchage sur Büchner

Tableau 1. Récapitulatif des essais réalisés

Des essais ont été menés sur plusieurs lots différents, obtenus par quartage de 75 kg de granulats, selon la norme NF EN 932-2 [4]. La répétabilité a été menée sur un même lot, trois fois de suite. La porosité des granulats recyclés étant liée à la fraction volumique de la pâte, elle peut varier selon la classe granulaire des granulats recyclés. Nous réalisons donc la mesure sur différents lots de granulats en distinguant les coupures granulaires suivantes : 0/4 – 4/10 – 10/20.

III. Essais sur gravillons

1. Masse volumique réelle, norme EN 1097-6

Le mode opératoire retenu pour réaliser de telles mesures est la mesure au pycnomètre, décrite dans la norme EN 1097-6 :

- Dans un premier temps, le pycnomètre est rempli entièrement d'eau jusqu'au trait de jauge, et le tout est pesé avec précision, on obtient la masse **M3**
- Les granulats sont introduits dans le pycnomètre, que l'on remplit à nouveau d'eau jusqu'au trait de jauge. Le système est alors pesé avec précision → **M2**
- Les granulats sont ensuite soigneusement séchés à l'aide d'un linge propre, de manière à obtenir des granulats saturés, surface sèche. (La norme précise qu'ils doivent être séchés jusqu'à perdre leur aspect brillant). Ils sont alors pesés et l'on obtient la masse **M1**
- Chaque prise d'essai est ensuite placée à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante, masse que l'on nommera **M4**.

La masse volumique réelle est ensuite donnée par la formule suivante :

$$\rho_{rd} = \frac{M4}{M1 - (M2 - M3)} * \rho_w$$

La masse volumique réelle saturée surface sèche est calculée grâce à la formule suivante :

$$\rho_{ssd} = \frac{M1}{M1 - (M2 - M3)} * \rho_w$$

ρ_w étant la masse volumique de l'eau à la température de l'essai exprimée en kilogramme par mètre cube.

Avant l'essai, les granulats sont pré-séchés à l'étuve à 105°C, et ce jusqu'à masse constante.

Les granulats sont alors immergés dans l'eau pendant 24h à 20 +/- 1°C jusqu'à conduction de l'essai.

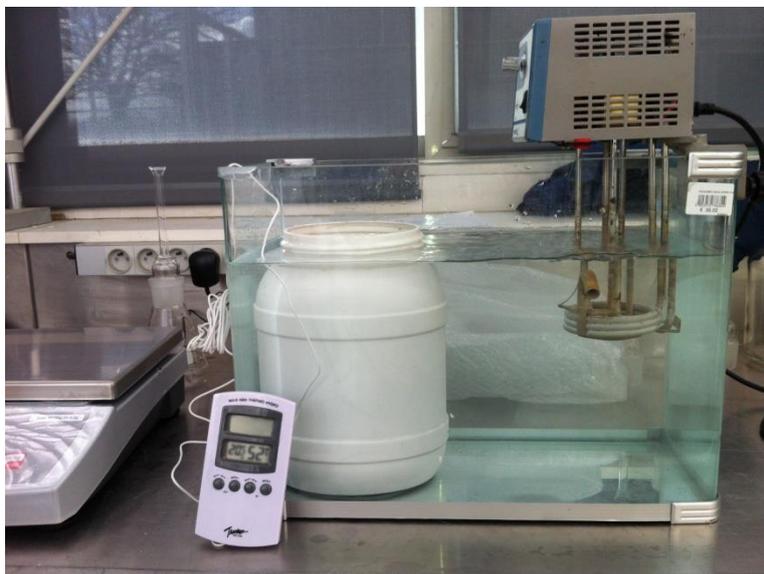


Figure 1. Conservation des granulats dans un bain thermostaté

Après 24h, une prise d'essai représentative est placée dans un pycnomètre, et le tout est pesé afin de mesurer avec exactitude la masse volumique de l'échantillon (figure 2).

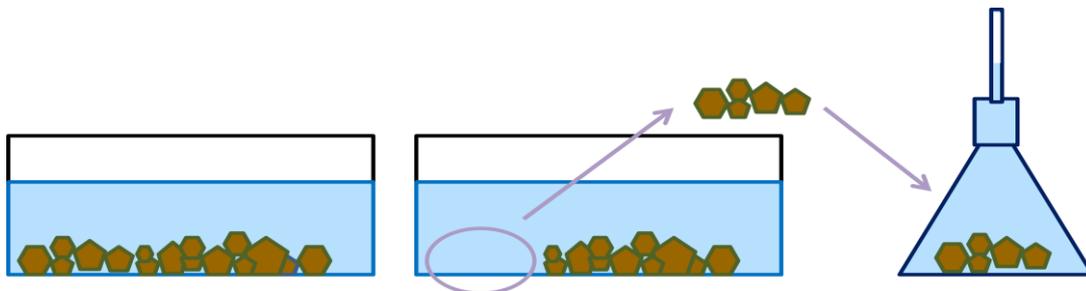


Figure 2. Schéma explicatif de la méthode de mesure de masse volumique selon la norme EN 1097-6

La suite de la manipulation se fait dans les conditions de la norme, citées plus haut.

Afin de tester la répétabilité de la mesure, une même prise d'essai à été testée trois fois de suite dans les mêmes conditions, pour chaque granulométrie (tableau 2).

Granulométrie	nb d'essais	ρ_{rd} (g.L ⁻¹)	écart type (g.L ⁻¹)	écart type relatif (%)
[4-10]	3	2,27	0,003	0,13
[10-20]	3	2,24	0,006	0,27
[4-20]	3	2,22	0,004	0,18

Tableau 2. Récapitulatif des mesures de masses volumiques ρ_{rd} obtenues avec la méthode normée pour une prise d'essai unique

Par la suite, 5 prises d'essais différentes pour chaque coupure granulaire ont été testées. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3 ci-dessous.

Granulométrie	nb d'essais	ρ_{rd} (g.L ⁻¹)	écart type (g.L ⁻¹)	écart type relatif (%)
[4-10]	5	2,26	0,03	1,33
[10-20]	5	2,24	0,01	0,45
[4-20]	5	2,24	0,05	2,25

Tableau 3. Récapitulatif des mesures de masses volumiques ρ_{rd} obtenues avec la méthode normée

On constate qu'avec une prise d'essai unique, l'écart type est bon, mais que dès lors qu'on étudie des prises d'essai différentes, la mesure perd en précision, due à l'hétérogénéité des prises d'essai prélevées. On observe une légère influence de la granulométrie, mais la différence reste très modeste (dans l'écart type).

2. Coefficient d'absorption à 24h

L'essai de mesure de masse volumique selon la norme EN 1097-6 permet de déterminer par calcul, et donc sans manipulation supplémentaire, le coefficient d'absorption des granulats étudiés

De la même manière que précédemment, on a pu évaluer la répétabilité de la mesure en testant la même prise d'essai 3 fois de suite (tableau 5) :

Granulométrie	nb d'essais	WA 24 (%)	écart type (%)	écart type relatif (%)
[4-10]	3	6,16	0,26	4,22
[10-20]	3	5,83	0,10	1,72
[4-20]	3	6,69	0,12	1,79

Tableau 4. Récapitulatif des mesures de coefficient d'absorption d'eau obtenues avec la méthode normée pour une prise d'essai unique

Par la suite, 5 prises d'essais différentes pour chaque coupure granulaire ont été testées. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 5 ci-dessous.

Granulométrie	nb d'essais	WA 24 (%)	écart type (%)	écart type relatif (%)
[4-10]	5	6,16	0,70	11,36
[10-20]	5	5,84	0,55	9,42
[4-20]	5	6,49	1,26	19,41

Tableau 5. Récapitulatif des mesures de coefficient d'absorption d'eau obtenues avec la méthode normée

Les mesures de répétabilité présentent un écart type correct, mais un peu plus élevé pour la fraction [0-4]

Concernant les mesures réalisées sur différents lots, on constate ici aussi un écart type très élevé dû à une hétérogénéité des prises d'essais, mais également à une manipulation trop importante des granulats notamment lors de l'étape de séchage. Les granulats de petit diamètre sont les plus affectés, car dans leur cas, une quantité de matière plus importante est perdue lors de l'étape de séchage.

On observe une très légère influence de la granulométrie sur les valeurs d'absorption, mais ici encore, cette différence entre dans l'écart type et pourrait être imputée au manque de précision de la mesure.

3. Répétabilité / hétérogénéité du lot

Les essais de répétabilité donnent un faible écart type relatif pour les mesures de volumique (<0,3%), mais beaucoup plus important pour les mesures de coefficient d'absorption d'eau (>5%).

Les résultats sont particulièrement variables pour les plus petites fractions granulaires, plus friables que les [10-20].

On constate en revanche que lorsque les mesures sont réalisées sur des prises d'essai différentes, l'écart type augmente considérablement. Il est de plus de 2.3% pour les mesures de masses volumiques, et supérieur à 10% pour les mesures de coefficients d'absorption d'eau. Ces écarts sont essentiellement dus à l'hétérogénéité des prises d'essais, et ici la fraction granulaire n'a pas d'influence significative.

IV. Essais sur sable recyclé

La norme EN NF 1097-6 prévoit pour le sable un protocole expérimental présentant quelques difficultés d'application dans la pratique. En effet l'étape de séchage des granulats est prévue à l'aide d'un « faible courant d'air chaud » qui, s'il est efficace quand le sable est encore très mouillé, se révèle beaucoup plus délicat quand on s'approche de l'état saturé surface sèche. Cette étape entraîne fréquemment une perte significative de la prise d'essai et met en péril la fiabilité des résultats.

Nous avons donc ici décidé de comparer le protocole de la norme avec une technique de séchage sur entonnoir Büchner. Les procédures d'essai des deux protocoles sont décrites puis les résultats et la représentativité des valeurs obtenues par les deux procédés sont comparés. Enfin, l'influence des fines [0-0,063] sur les résultats est étudiée.

1. Séchage jusqu'à l'état saturé surface sèche selon la norme EN1097-6

La norme préconise pour le sable un essai au pycnomètre, qui se différencie de celui appliqué pour les gravillons par un protocole de séchage différent. En effet dans le cas des granulats [0,063-4], une fois la mesure au pycnomètre réalisée, celui-ci est vidé dans sur un plateau. La prise d'essai imbibée doit être étalée de manière à obtenir une couche régulière au fond du plateau. Le sable est alors exposé à un courant d'air chaud afin d'évaporer l'humidité en surface. Pour s'assurer que l'état saturé surface sèche est atteint, on utilise la technique du moule tronconique et du pilon.

La norme ne considère pas la fraction [0-0,063] qui doit être préalablement retirée de l'échantillon. Pour cette étude, nous avons cependant choisi de conserver cette fraction. Les difficultés de mise en œuvre de cette procédure pour les sables légers sont notamment liées à la perte des fines lors du séchage des grains sous courant d'air chaud, mais également au contrôle de l'énergie de compactage de l'échantillon dans le moule tronconique. Selon la norme EN 1097-6, cette procédure n'est pas applicable aux sables légers dont la problématique peut être comparable à celle des sables recyclés.

2. Séchage jusqu'à l'état saturé surface sèche sur dispositif Büchner

Cette méthode consiste à verser le contenu du pycnomètre (sable + eau) dans un entonnoir Büchner de 170mm fixé sur une fiole reliée à une pompe à membrane. Un papier filtre saturé est placé sur le fond de l'entonnoir. L'activation de la pompe entraîne l'élimination de l'eau vers la fiole, et approche le sable de l'état saturé surface sèche. Cet état est généralement atteint après 10 minutes de pompage à un débit de 12 L.min⁻¹.

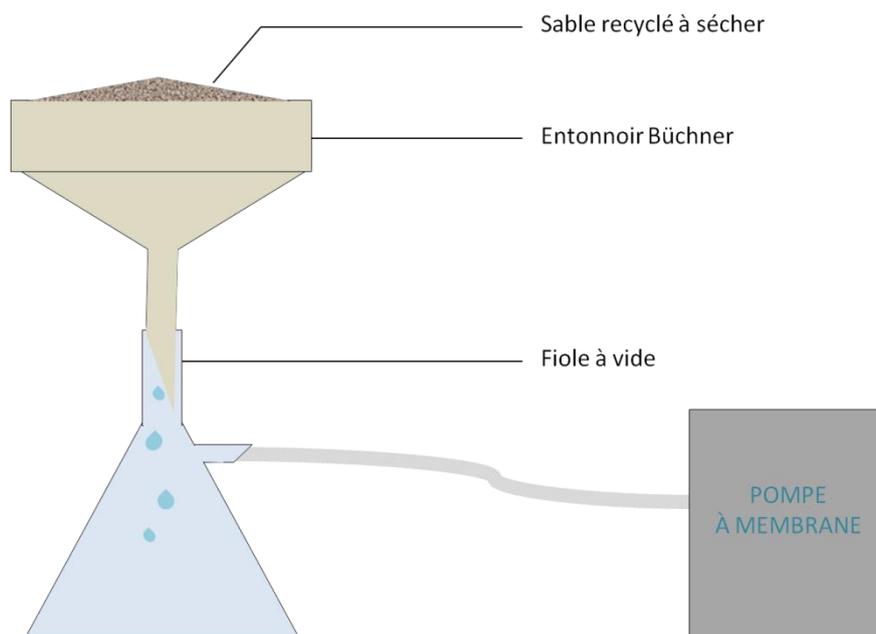


Figure 3. Schéma du montage expérimental de séchage sur Büchner



Figure 4. Photographies montrant l'évolution de l'état hydrique du sable

Afin de s'assurer de l'état d'humidité du sable, on réalise le test préconisé dans la norme, à l'aide du moule tronconique et du pilon.

L'appréciation de l'état saturé surface sèche reste aussi subjectif que dans la méthode de la norme, mais on s'affranchit ici de toute perte de matière due au courant d'air chaud ou à l'utilisation d'un papier absorbant.

3. Comparaison des deux méthodes de séchage du sable

Le tableau 6 présente les valeurs d'absorption et de masse volumique obtenues sur trois échantillons de fraction [0-4].

méthode	nb d'essais	Masse vol. (kg/L)	Coeff abs (%)	écart type (%)	écart type relatif (%)
norme	3	2.17	7.8	0.72	9.23
Büchner	3	2.07	12.75	0.35	2.75

Tableau 6. Comparaison des valeurs de masse volumique et coefficient d'absorption d'eau obtenues pour le sable recyclé avec la méthode normée et la méthode Büchner

La méthode de séchage sur Büchner entraîne très clairement une dispersion des résultats plus faible que dans le cas de la méthode préconisée par la norme pour le sable naturel. On note également des résultats d'absorption très différents selon la méthode utilisée : les valeurs obtenues par la méthode normée sont bien inférieures à celles issues de l'essai Büchner. La forme anguleuse du sable et la présence de fines induisent une cohésion supplémentaire qui s'oppose au glissement du sable, même lorsque la surface est sèche. Le séchage excessif du sable entraîne une sous estimation du coefficient d'absorption, d'autant plus importante que le sable est riche en fines.

En ce qui concerne le dispositif Büchner, une surestimation de l'absorption pourrait éventuellement s'expliquer par de fortes tensions superficielles à la surface des fines, supérieures à la dépression

appliquée par la pompe. Des essais d'ouvrabilité de mortiers sont menés et décrits au paragraphe VI afin d'analyser la validité des valeurs obtenues.

4. Comparaison des résultats avec et sans fines (méthode Büchner)

fines	nb d'essais	Masse vol. (kg/L)	Coeff abs (%)	écart type (%)	écart type relatif (%)
sans	3	2.07	11.24	0.31	2.76
avec	3	2.07	12.75	0.35	2.75

Tableau 7. Comparaison des valeurs de masse volumique et coefficient d'absorption d'eau obtenues pour le sable recyclé avec et sans fines

Les résultats vont dans le sens attendu : la présence de fines entraîne une augmentation du coefficient d'absorption d'eau d'un peu plus de 1%.

V. Cinétique d'absorption

On cherche à déterminer la cinétique d'absorption des granulats afin d'évaluer en combien de temps la majeure partie de l'absorption se fait, soit le temps que les granulats mettront à atteindre leur état « inerte » vis-à-vis de l'eau du milieu.

La cinétique a été évaluée dans un premier temps à court terme, sur les dix premières minutes, avec une mesure réalisée toutes les minutes. Nous avons ensuite effectué une mesure de cinétique à long terme, sur 30 jours.

Nous comparerons ici deux méthodes expérimentales : la méthode décrite par la norme NF EN 1097-6 pour les granulats naturels, et la méthode adaptée aux granulats légers, qui peut sembler plus pertinente dans le cas des granulats recyclés. L'état saturé surface sèche est obtenu pour les gravillons selon la procédure de la norme et avec le dispositif Büchner pour les sables.

1. Description des protocoles expérimentaux

a- Méthode norme EN 1097-6 (granulats naturels)

La norme prévoit le protocole expérimental suivant :

1. A $t = 0$, les granulats sont immergés dans un bain thermostaté
2. A $t =$ temps choisi pour la première mesure, une prise d'essai représentative est retirée du bain thermostaté et testée à la méthode du pycnomètre
3. La prise d'essai testée est séchée selon la norme, afin de mesurer sa masse saturée surface sèche, puis mise à l'étuve jusqu'à masse constante afin d'obtenir la masse sèche
4. Les étapes 2 et 3 sont répétées autant de fois que le nombre de points désirés, et avec autant de prises d'essai différentes.

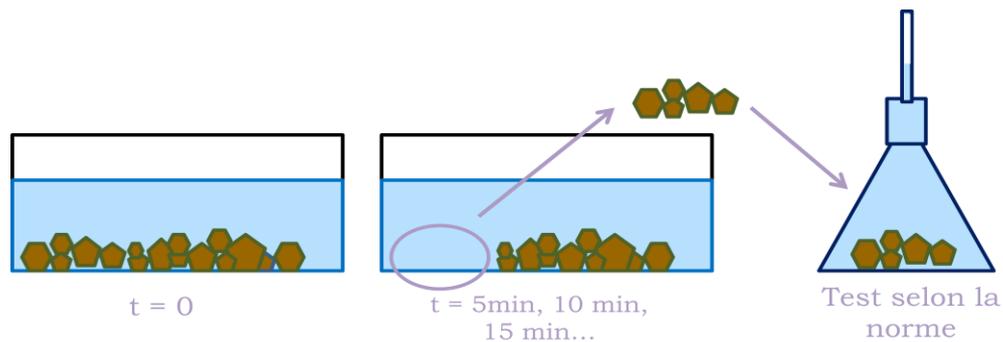


Figure 5. Schéma explicatif de la méthode de mesure de cinétique selon la norme EN 1097-6

Pour chaque granulométrie d'étude, dix cinétiques d'absorption ont été réalisées. Cependant, l'hétérogénéité des prises d'essai entraîne une dispersion des résultats trop importante pour permettre une exploitation satisfaisante des résultats.

b- Méthode norme EN 1097-6 (granulat légers)

Cette méthode alternative, qui s'approche de celle décrite dans la norme NF EN 1097-6, granulats légers, annexe C, consiste à pré-sécher les granulats à l'étuve, à les insérer dans le pycnomètre. A $t=0$, l'eau est ajoutée au pycnomètre, qui est complété jusqu'au trait de jauge à la première échéance, soit une minute. Le niveau de l'eau sera alors réajusté jusqu'au trait à chaque temps t de mesure choisi. L'étape de séchage et l'erreur qu'elle entraîne est alors minimisée puisque réalisée une seule fois, au lieu de une fois par temps de mesure comme le préconise la norme.

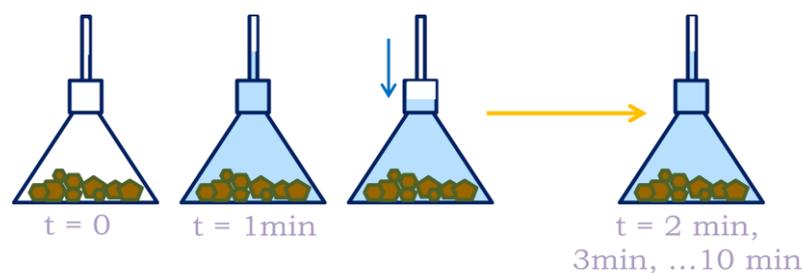


Figure 6. Schéma explicatif de la méthode de mesure de cinétique décrite par Tam et al. [2]

Le calcul afin d'obtenir le coefficient d'absorption d'eau à chaque t donné est le suivant :

$$W_{Ai} = W_{Af} - \frac{(M_f - M_i)}{m \text{ (prise d'essai sèche)}} * 100$$

- M_f = masse pycnomètre + masse granulats + eau finale
- M_i = masse pycnomètre + masse granulat + eau à $t = t_i$

- Waf = coefficient d'absorption mesuré à la dernière échéance

L'intérêt principal de cette méthode sur la première est le fait que l'on utilise une unique prise d'essai pour les différents temps testés. On s'affranchit donc de la variabilité induite par l'hétérogénéité des lots de granulats prélevés.

2. Cinétique d'absorption des gravillons recyclés

a- Résultats de la cinétique à court terme

Les résultats obtenus sont résumés dans la figure 7 ci-après :

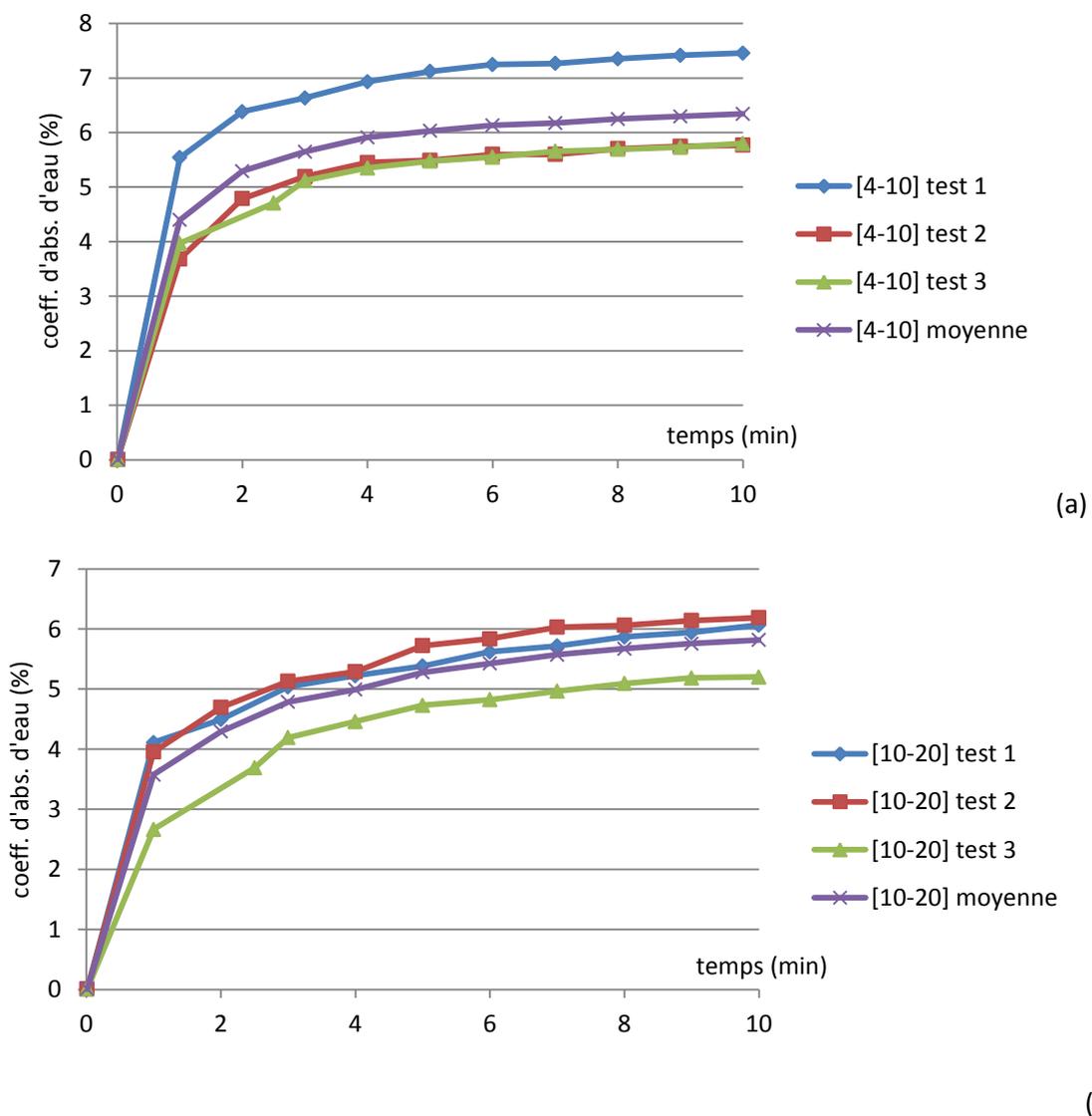


Figure 7. Cinétique d'absorption des granulats recyclés de granulométrie (a) [4-10] et (b) [10-20] sur 10 minutes

Au bout de 10min, 92% de la valeur d'absorption à 24h est atteinte. Au bout de 5 minutes, soit environ la durée du malaxage, elle n'est atteinte qu'à 85% seulement. L'ajout lors du malaxage de

l'eau correspondant à l'absorption à 24h peut ainsi conduire à une plus grande ouvrabilité que celle souhaitée.

b- Résultats de la cinétique à long terme

L'absorption ne semblant pas être terminée dans les dix premières minutes, des essais à long terme ont été réalisés sur les trente premières minutes, puis après une heure, deux heures, un jour, deux jours, une semaine et un mois.

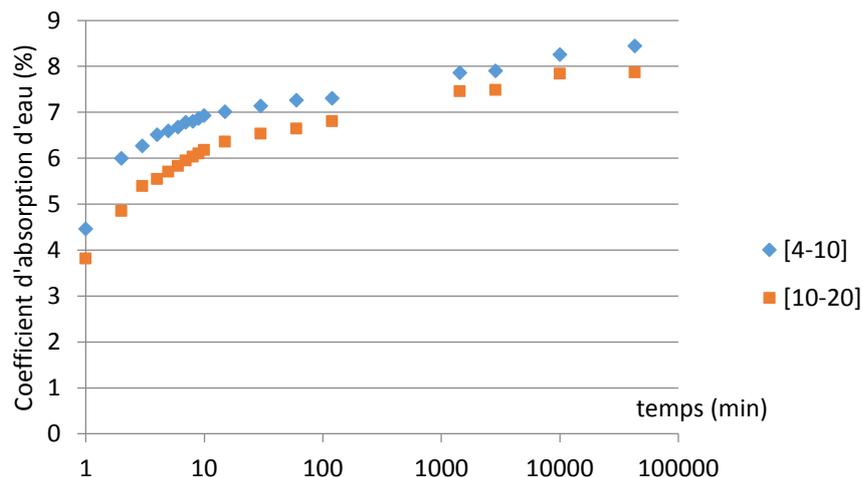


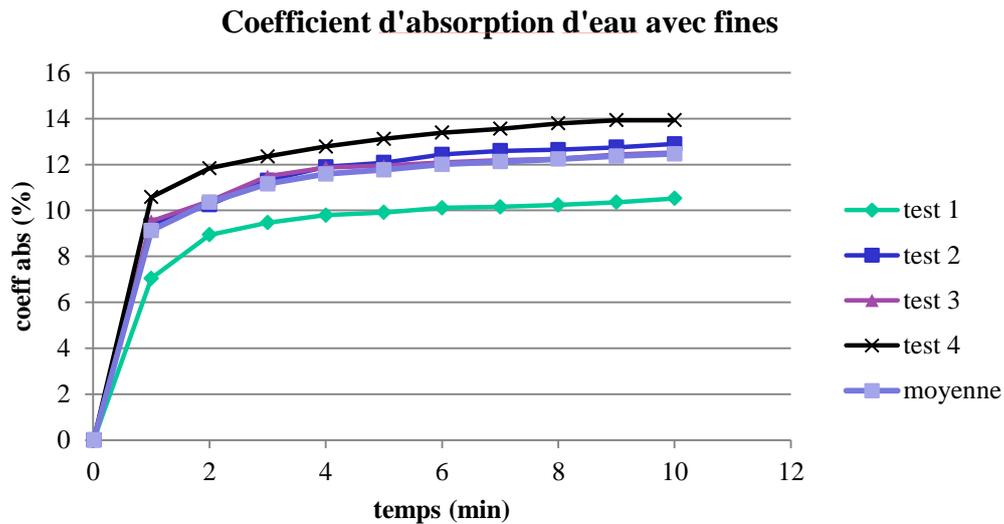
Figure 8. Cinétique d'absorption des granulats recyclés de granulométrie [4-10] et [10-20] sur un mois

Si la majeure partie de l'absorption se fait dans les quelques premières minutes, on constate ici qu'après plus d'un mois elle se poursuit encore légèrement. Cette propriété est à prendre en compte notamment lorsque les granulats sont stockés à l'extérieur et donc exposés à l'humidité. La prise en compte de WA24 pour le calcul de l'eau d'apport des granulats lors de la formulation des bétons peut alors conduire à une trop forte correction en eau, et à une moins bonne maniabilité que celle attendue.

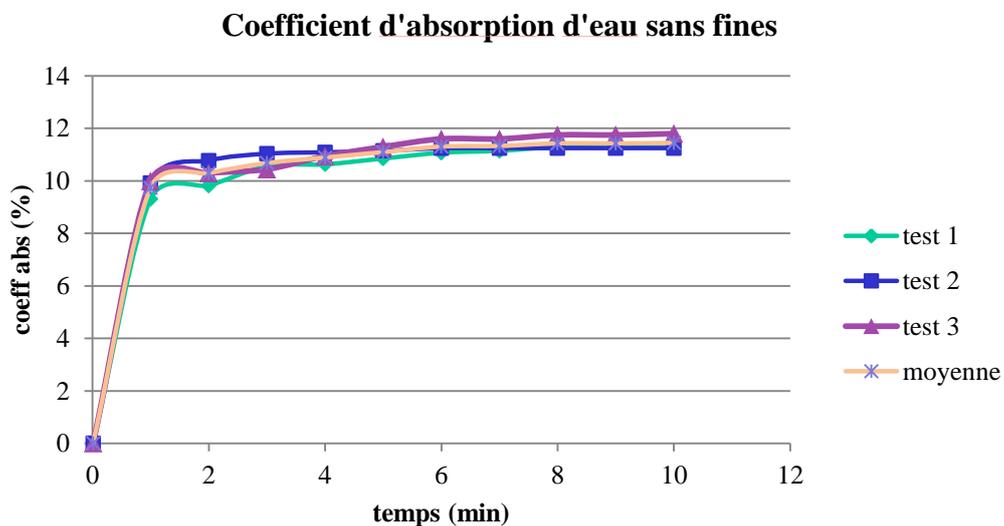
3. Cinétique d'absorption du sable recyclé

La cinétique d'absorption a été réalisée dans les conditions décrites précédemment pour les gravillons. Le séchage en revanche se fait selon le protocole Büchner décrit plus haut.

Les résultats obtenus sont résumés dans la figure 9 ci-dessous :



(a)

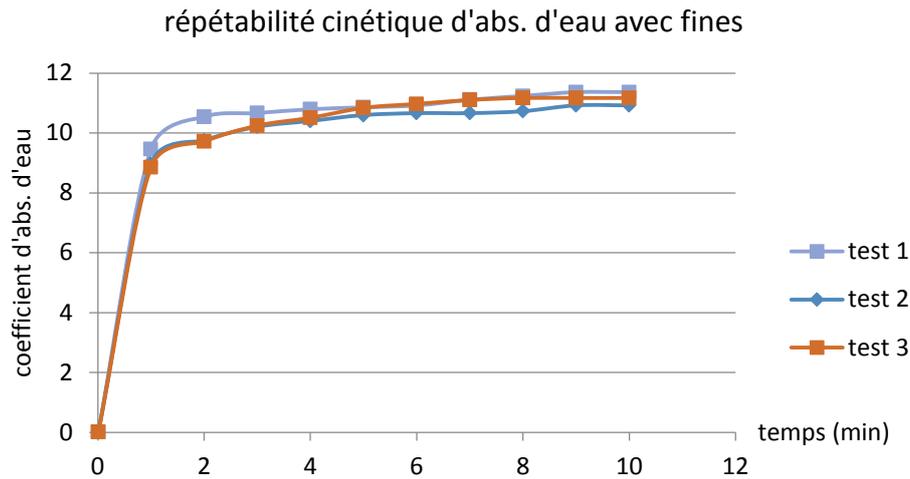


(b)

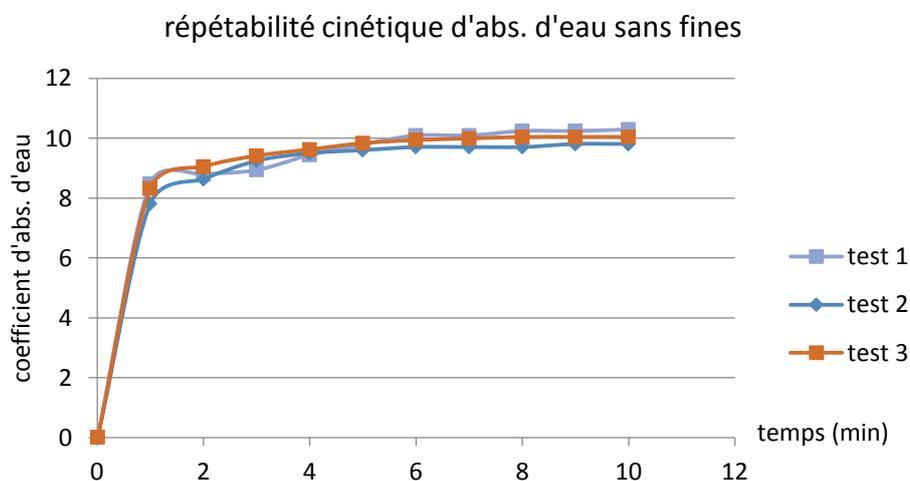
Figure 9. Cinétique d'absorption du sable recyclé (a) avec fines et (b) sans fines sur 10 minutes

On constate qu'en moyenne, l'absorption d'eau à 10 minutes est légèrement inférieure à 12% sans fines, et légèrement supérieure à 12% en présence de fines, soit égale à la valeur d'absorption à 24h obtenue précédemment. La présence de fines entraîne une plus grande variabilité entre les différents essais. Sans fines au contraire, on observe une très bonne précision de l'essai, même avec des prises d'essais différentes.

De la même manière que pour les gravillons, des essais de répétabilité sur une même prise d'essai ont été réalisés. Les résultats obtenus sont résumés dans le graphique ci-après :



(a)



(b)

Figure 10. Répétabilité des mesures de cinétique d'absorption du sable recyclé (a) avec fines et (b) sans fines sur 10 minutes

Lorsqu'on s'affranchit de la variabilité entre les différents échantillons, on observe une très bonne répétabilité de l'essai, avec ou sans fines (l'écart type du coefficient d'absorption est inférieur à 3%). Ceci est lié au dispositif de séchage Büchner utilisé pour les sables.

La présence de fines induit toutefois une plus grande variabilité et un coefficient d'absorption plus élevé.

VI. Etude de l'ouvrabilité de mortiers

Afin de valider les résultats obtenus, nous réalisons des essais rhéologiques sur mortiers de sable recyclé. Ceux-ci seront comparés à des mortiers réalisés dans les mêmes conditions avec du sable normalisé dont on connaît l'absorption.

Deux méthodes de pré-saturation du sable seront testées et comparées :

- Immersion du sable pendant 24h
- Ajout de la quantité exacte d'eau d'absorption (WA 24) qui est mélangée aux granulats dans un bidon laissé en position horizontale pendant 24 heures.

Dans les deux cas, le sable est pré-séché à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante.

La formulation de mortier choisie est la suivante :

Ciment = 450g

Sable = 1350g (normalisé) ou 1057g (sable recyclé) afin de rester à volume de sable constant

E/C = 0.7 soit Eau efficace = 315 mL

La valeur d'absorption utilisée pour le sable recyclé est celle mesurée sur Büchner à 24h (12%). Pour le sable normalisé, l'absorption est de 0,2 %.

On évaluera la maniabilité du mortier au mini cône, ainsi que son maintien sur 90 min. L'étalement est mesuré à t=0, puis toutes les trente minutes pendant 90minutes. Le mortier est malaxé à nouveau pendant 1 minute à grande vitesse avant chaque mesure.

1. Méthode 1 - immersion 24h

Les sables, recyclé et normalisé, sont placés dans des bacs, et totalement recouverts d'eau. Ils sont laissés ainsi durant 24h, puis égouttés sur tamis à travers des tissus absorbants. Leur teneur en eau totale est alors mesurée, valeur à laquelle est soustraite la valeur d'absorption, afin d'obtenir la teneur en eau de surface, utile pour l'hydratation et la maniabilité.

$$\text{eau de surface} = \text{eau totale} - \text{WA24}$$

2. Méthode 2 - ajout de la quantité d'eau d'absorption

Les sables, recyclé et normalisé, sont pesés puis placés dans des bidons étanches. Une quantité d'eau correspondant au coefficient d'absorption à 24h est ajoutée aux bidons. Ceux-ci sont fermés de façon étanche, puis roulés sur eux mêmes durant une dizaine de minutes. Ils sont conservés 24h en position horizontale avant le gâchage.

Le sable est utilisé tel quel, aucune mesure d'eau de surface n'est effectuée avant l'essai. L'eau ajoutée est l'eau efficace imposée par la formulation.

L'essai de maniabilité est réalisé au mini-cône. Après une étape de malaxage précisément définie, le mortier recyclé est inséré dans un mini-cône posé à la surface d'une table parfaitement plane. Le mini cône est alors soulevé de façon orthogonale à la table et au moins deux rayons du monticule de mortier affaissé sont précisément mesurés.



Figure 11. Essai au mini-cône

Les résultats résumés dans la figure 12 sont les valeurs moyennes obtenues sur 3 mesures (écart type sur la courbe) :

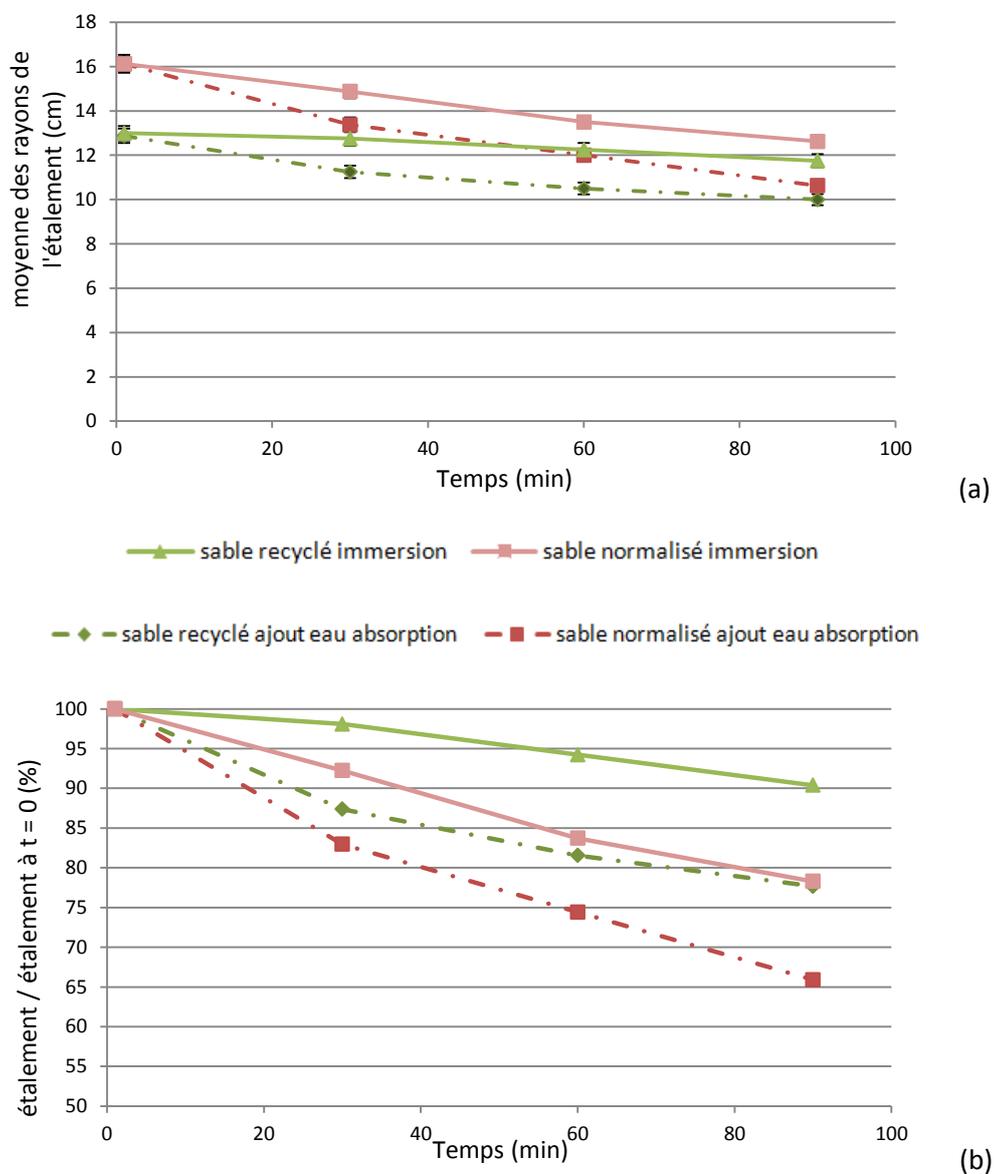


Figure 12. Évolution de la maniabilité des mortiers de sable recyclé et normalisé (a) en valeurs absolues et (b) en valeur relatives par rapport à l'étalement initial

On constate en premier lieu sur le graphique (a), que la valeur d'absorption du sable recyclé mesurée par Büchner n'a pas été surestimée, puisque les étalements obtenus ne sont pas plus élevés (inférieurs à 3cm) à ceux des sables normalisés dont on connaît précisément l'absorption. Les deux étalements ne peuvent toutefois être totalement comparables puisque la courbe granulométrique des deux sables diffère. Le graphique (b) indique que la méthode immersion est certainement la plus efficace pour saturer le sable en eau, étant donné que le maintien est meilleur dans ce cas là. On peut supposer que lorsqu'on emploie la méthode qui consiste à ajouter la quantité exacte d'eau d'absorption, celle-ci ne pénètre pas complètement dans les pores du sable, et continue d'être absorbée pendant le malaxage. Ceci expliquerait la perte de maniabilité plus rapide observée pour les deux types de sable.

VII. Conclusion

Les différents essais réalisés montrent, dans le cas des gravillons recyclés, une bonne répétabilité des mesures de masses volumiques et de coefficient d'absorption lorsqu'on suit la norme pour les granulats naturels. Ils ont aussi confirmé le peu d'influence de la classe granulaire (4/10 ou 10/20) sur les valeurs d'absorption. L'étude du sable recyclé présente plus de points délicats, et une variabilité importante des résultats est observée selon la méthode employée. La présence ou non de fines, ainsi que la méthode de détermination de l'état saturé surface sèche ont une influence non négligeable sur la valeur d'absorption finale.

Les mesures de cinétique ont indiqué une plus grande fiabilité des résultats avec l'adaptation de la méthode destinée aux granulats légers. On retiendra que 80% de la valeur d'absorption à 24h est atteinte dans les cinq premières minutes, mais que celle-ci continue encore pendant plusieurs semaines.

Les valeurs d'absorption des sables obtenues avec un séchage sur Buchner sont plus élevées que celles obtenues par la méthode de la norme. Les résultats des essais de maniabilité sur mortiers basés sur la valeur Buchner n'ont pas montré de « sur-fluidité » par rapport à un mortier de sable dont l'absorption est connue. La valeur « Buchner » semblerait donc donner une estimation réaliste de l'eau « prisonnière » du sable pendant le malaxage. L'étude sur l'ouvrabilité a par ailleurs montré que l'immersion du sable pendant 24h avant son utilisation permet un meilleur maintien de la maniabilité.

Références

[1] Norme NF EN 1097-6 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

[2] TAM V., GAO X.F., TAM C.M., CHAN C.H., « New approach in measuring water absorption of recycled aggregates », *Construction and Building Materials* vol. 22, 2008, p. 364–369

[3] DIN V 18004 clause 5. Particle density, effective particle density and water absorption of lightweight aggregates

[4] Norme NF EN 932-2 Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats - Partie 2 : méthodes de réduction d'un échantillon de laboratoire.

