



Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE

Thème 6

Evaluation de l'impact d'un dosage de 10 % de recyclé sur les propriétés des bétons

Auteur(s) :

Elhem GHORBEL
Safiullah OMARY
George WARDEH

Organisme(s) : L2MGC

R/17/RECY/040
LC/15/RECY/77
Juin 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

Résumé

Les résultats d'un programme expérimental sur l'effet de l'incorporation de 10% de granulats recyclés sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci des matériaux cimentaires sont présentés dans cette étude. La première étape du travail s'est attachée à l'étude des propriétés de mortiers de béton dont 10% du sable naturel est substitué par cinq types de sable recyclé. La composition des mortiers est dérivée de la formulation du béton C35/45-0R-0R à l'aide de la méthode du mortier de béton équivalent MBE. Les résultats expérimentaux ont montré que le sable recyclé n'affecte pas les propriétés mécaniques à l'état mais affecte plutôt les propriétés aux états frais et durcissant.

Pour la deuxième étape, le sable de la plateforme d'Ancycla (nommé SR-4), a été utilisé avec 4 lots de graviers recyclés pour formuler les bétons de l'étude où 10% des granulats naturels sont substitués en volume par des granulats recyclés. Les résultats obtenus ont montré que l'incorporation de 10% des granulats recyclés entraîne une modification des propriétés à l'état frais aussi bien que des propriétés physiques telles que la porosité à l'eau, le coefficient d'absorption et la perméabilité. Par ailleurs, tous les bétons recyclés ont atteint une résistance supérieure à 35MPa même si l'incorporation de 10% de granulats recyclés a provoqué une diminution des propriétés mécaniques.

Abstract

The results of an experimental program on the effect of the incorporation of 10% recycled aggregates on the fresh and hardened states properties of cementitious materials are presented in this study. The first step of the program focused on the properties of concrete mortars, for which 10% of the natural sand is substituted by five types of recycled sand. The composition of the mortars is derived from the formulation C35 / 45-0R-0R using the equivalent concrete mortar, CEM, method. The experimental results showed that the recycled sand does not affect the mechanical properties but affects the properties in the fresh and hardening state.

For the second step, the sand of the Ancykla platform (named SR-4) was used with 4 lots of recycled gravel to formulate the concretes in the study where 10% of the natural aggregates are substituted, in volume, by recycled gravels. The obtained results showed that the incorporation of 10% of recycled aggregates modify fresh properties as well as physical properties such as water porosity, absorption and permeability. However, all recycled aggregate concretes reached at hardened state a compressive strength higher than 35MPa even though the incorporation of 10% recycled aggregates into the concrete formulation caused a decrease in mechanical properties.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES	1
LISTE DES TABLEAUX	2
CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE	1
CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	2
1. LES GRANULATS RECYCLES.....	2
1.1 Influence de l'ancienne pate sur les caractéristiques physiques et chimiques des granulats	2
1.2 Caractéristiques mécaniques des gravillons recyclés	3
2. INFLUENCE DE L'INCORPORATION DES GRANULATS RECYCLES SUR LES PROPRIETES DES BETONS	4
2.1 Propriétés des bétons à l'état frais	4
2.2 Propriétés des bétons à l'état durci.....	5
2.2.1 Propriétés physiques	5
2.2.2 Propriétés mécaniques.....	5
CHAPITRE 2 : MATERIAUX UTILISES ET CARACTERISATION DES GRANULATS.....	7
1. MATERIAUX UTILISES	7
2. CARACTERISATION DES GRANULATS.....	8
2.1 Propriétés physiques :	8
2.1.1 Granulométrie : [EN NF 933-11].....	9
2.2.1. Module de finesse : [EN 12620]	9
2.1.2 Mesure de la masse volumique par la méthode du pycnomètre.....	10
CHAPITRE 3 : FORMULATION ET PROPRIETES DES MORTIERS A L'ETAT FRAIS ET A L'ETAT DURCI.....	12
1. FORMULATION DES MORTIERS	12
1.1 Méthode du mortier de béton équivalent MBE.....	12
1.1.1 Substitution de 10% du SN par un sable recyclé.....	14
2. PROPRIETES DES MORTIERS A L'ETAT FRAIS.....	16
2.1 La masse volumique à l'état frais	16
2.2 L'évolution de l'ouvrabilité au cours du temps.....	16
2.3 Temps caractéristiques de prise	17
2.4 Consistance normalisée : [EN 196-3].....	18
2.5 L'air occlus	19
3. PROPRIETES DES MORTIERS A L'ETAT DURCISSANT	20

3.1 Rhéologie des mortiers.....	20
3.1.1 Protocole expérimental :.....	20
3.1.2 Calibrage :.....	21
3.2 Chaleur d'hydratation et degré d'hydratation.....	23
4. PROPRIETES DES MORTIERS A L'ETAT DURCI.....	25
<hr/>	
4.1 Propriétés physiques des mortiers.....	25
4.1.1 Masse volumique et porosité accessible à l'eau.....	25
4.1.2 Cinétique de séchage :.....	27
4.1.3 Retrait.....	28
4.1.4 Conductivité thermique.....	28
4.2 Propriétés mécaniques des mortiers.....	29
4.2.1 Module d'élasticité dynamique.....	29
4.2.2 Résistance à la flexion : [NF EN 196-1].....	30
4.2.3 Résistance à la compression : [NF EN 196-1].....	31
DISCUSSION.....	33
CHAPITRE 4 : FORMULATION ET PROPRIETES DES.....	36
BETONS A L'ETAT FRAIS ET A L'ETAT DURCI.....	36
1. FORMULATION DES BETONS.....	36
2. PROPRIETES DU BETON A L'ETAT FRAIS.....	37
<hr/>	
2.1 Air occlus.....	37
3. PROPRIETES DES BETONS A L'ETAT DURCI.....	38
<hr/>	
3.1 Porosité accessible à l'eau.....	38
3.2 Cinétique de séchage.....	40
3.3 Perméabilité au gaz.....	41
3.4 Propriétés mécaniques du béton durci.....	44
3.4.1 Module d'élasticité dynamique.....	44
3.4.2 Résistance à la compression.....	45
3.4.3 Résistance à la traction par fendage.....	46
DISCUSSION.....	47
CONCLUSION.....	49
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	50
<hr/>	

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Relation entre teneur en mortier et absorption d'eau (Juan, et al., 2009).....	2
Figure 2. Relation entre teneur en mortier et la densité (inversement proportionnel) (Juan, et al., 2009).	3
Figure 3. Relation entre teneur en mortier et teneur en sulfate (proportionnel) (Juan, et al., 2009).....	3
Figure 4. Le coefficient Los Angeles : comparaison entre gravillons naturels et recyclés (OMARY, et al).....	3
Figure 5. Influence du gel/dégel sur la granularité des granulats naturels et recyclés (Omary, et al., 2016).....	3
Figure 6. Pourcentage de l'air occlus en fonction du taux de substitution [20]	5
Figure 7. Les différents sables recyclés utilisés pour la formulation des mortiers.	7
Figure 8. Courbe granulométrique du sable naturel (SN) et sables recyclés.	9
Figure 9. La teneur en fine des sables recyclés.	9
Figure 10. Module de finesse des sables.	10
Figure 11. Les étapes de la mesure de la masse volumique, du coefficient d'absorption d'eau et de la porosité.	10
Figure 12. Masses volumiques réelle après séchage à l'étuve.	11
Figure 13. Porosité et coefficients d'absorption des différents sables.....	11
Figure 14. Masse volumique des mortiers à l'état frais.....	16
Figure 15. Dimension du mini cône.	17
Figure 16. Évolution de l'étalement au cours du temps.	17
Figure 17. Évolution de l'affaissement au cours du temps.....	17
Figure 18. Temps de début et fin de prise.	18
Figure 19. Essai de consistance de la pâte de ciment.....	19
Figure 20. Consistance normalisée $d=f(E/L)$	19
Figure 21. Aéromètre.	19
Figure 22. L'air occlus des différents mortiers.	19
Figure 23. Rhéomètre Anton Paar avec la géométrie double-hélice (ST39).	20
Figure 24. Protocole de cisaillement.....	20
Figure 25. Evolution des contraintes de cisaillement en fonction du temps.	21
Figure 26. Courbes d'écoulement d'une huile newtonienne.	21
Figure 27. Courbures d'écoulement de différents mortiers.	22
Figure 28. Calorimètres semi-adiabatique et calorimètre de référence.	23
Figure 29. Evolution de la température au cours du temps.....	24
Figure 30. Chaleur d'hydratation en fonction du temps.	24
Figure 31. Degré d'hydratation en fonction du temps.....	24
Figure 32. Schéma illustratif du système de mesure de la porosité sous vide.....	26
Figure 33. porosité accessible à l'eau.....	26
Figure 34. Masse volumique des mortiers.....	27
Figure 35. La perte de masse en fonction du temps.	27
Figure 36. Dispositif expérimental pour la mesure du retrait total.....	28
Figure 37. Evolution du retrait total.....	28
Figure 38. Conductimètre.	29
Figure 39. Conductivités thermiques des différents mortiers.....	29
Figure 40. Dispositif de mesure du module d'élasticité dynamique.....	29
Figure 41. Module d'élasticité des différents mortiers étudiés.	30
Figure 42. Essais de flexion 3 points.....	30
Figure 43. Comparaison de la résistance à la flexion des différents mortiers.....	31
Figure 44. Presse de compression.	31
Figure 45. Comparaison de la résistance à la compression des différents mortiers.	32
Figure 46. Propriétés à l'état durci à 28 jours.....	33
Figure 47. Propriétés à l'état frais.	33
Figure 48. Propriétés à l'état durcissant.	33
Figure 49. Images de MEB.....	35
Figure 50. Détails des différents constituants d'un Aéromètre (a) et les résultats d'air occlus (b).....	38
Figure 51. Schéma illustratif du système de mesure de la porosité sous vide.....	39
Figure 52. Masse volumique (a), coefficient d'absorption d'eau (b) et porosité accessible à l'eau (c) des bétons.	40
Figure 53. Cinétique de séchage à $105\pm 5^\circ C$	41
Figure 54. Système de mesure de la perméabilité au gaz.....	42
Figure 55. Le schéma illustrant l'évolution de la perméabilité apparente (K_{App}) en fonction de l'inverse de la pression moyenne (P_m).	43

Figure 56. Perméabilité intrinsèque en fonction de l'inverse de pression moyenne	43
Figure 57. Photo illustrant le fonctionnement d'E- MK2 Mètre	44
Figure 58. Module d'élasticité dynamique des bétons.....	44
Figure 59. Photo illustrant le fonctionnement d'essai de compression à l'aide de SCHENK	45
Figure 60. Dispositif pour surfaçage d'une éprouvette.....	45
Figure 61. Résistance à la compression des bétons.	46
Figure 62. Dispositif pour l'essai de traction par fendage.....	46
Figure 63. Résistance à la traction par fendage des bétons.....	47
Figure 64. Propriétés mécanique des bétons.	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Gravillons naturels et Gravillons recyclés provenant de la plateforme de Neuilly.....	8
Tableau 2. Gravillons recyclés provenant de la plateforme de Leonhart et d'Ancycla.....	8
Tableau 3. Exemple de calcul.	13
Tableau 4. Formulation initiale.	13
Tableau 5. Formulation du MBE.....	13
Tableau 6. Formulation finale du MBE.....	13
Tableau 7. Dosages des différents constituants pour le MBE SR-PN.....	14
Tableau 8. Dosages des différents constituants pour le MBE SR-1.....	14
Tableau 9. Dosages des différents constituants pour le MBE SR-2.....	14
Tableau 10. Dosages des différents constituants pour le MBE SR-3.....	15
Tableau 11. Dosages des différents constituants pour le MBE SR-4.....	15
Tableau 12. Dosages des différents constituants pour le MBE SR-5.....	15
Tableau 13. Temps de début et de fin de prise des différents mortiers.	18
Tableau 14. Seuil de cisaillement de différents mortiers.....	21
Tableau 15. Viscosité de différents mortiers.....	22
Tableau 16. Paramètres de calcul.....	24
Tableau 17. Températures et des chaleurs maximales d'hydratation.....	25
Tableau 18. Compositions des différentes formulations par volume (m^3/m^3).	36
Tableau 19. Compositions des différentes formulations et caractéristiques physiques à l'état frais.	37

CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE

Cette étude s'inscrit dans le cadre du PN EYBETON et plus particulièrement le thème 6 « Mélanges de granulats naturels et recyclés ».

A travers ce travail on cherche à :

- Etudier l'impact ou non de l'incorporation de 10% de granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques à l'état frais et sur les propriétés physiques et mécaniques à l'état durci.
- Donner des recommandations sur l'emploi d'un faible taux de substitution vis-à-vis de la formulation du mortier et du béton.
- Caractériser de façon fine la microstructure des matériaux étudiés afin d'évaluer l'influence des granulats recyclés sur les propriétés de transfert et par conséquent sur la durabilité des matériaux cimentaires.

Une procédure expérimentale a été conduite en deux temps.

Dans un premier temps, les propriétés à l'état frais et durci de mortiers de béton dont 10% du sable naturel est substitué par plusieurs types de sable recyclé ont été étudiées. La composition des mortiers est dérivée de la formulation du béton C35/45-OR-OR. Pour le mortier de référence les gravillons sont remplacés par une masse équivalente du sable naturel qui occupera le même volume. Ensuite, 10% en volume du sable naturel sera substitué par 5 types de sables recyclés. Pour tous les mortiers développés, les paramètres de la formulation seront conservés à savoir : la quantité du ciment et du filler, le rapport eau efficace sur ciment aussi bien que le dosage en superplastifiant. Les propriétés étudiées et analysées pour toutes les séries de mortiers sont :

- A l'état frais : la masse volumique, l'air occlus, l'évolution de l'ouvrabilité au cours du temps, les temps caractéristiques de prise, les degrés d'hydratation.
- A l'état durcissant : les propriétés rhéologiques telles que le seuil d'écoulement et la viscosité.
- A l'état durci : les propriétés physiques (porosité accessible à l'eau, cinétique du séchage ainsi que la conductivité thermique), les propriétés mécaniques (compression, flexion 3 points et module élastique dynamique) sont déterminées aux échéances de 3, 7, 21 et 28 jours. Les résultats obtenus sont analysés à la lumière des observations effectuées au microscope électronique à balayage.

La première partie de l'étude a conduit au choix d'un sable recyclé le plus « défavorable », S_{RD} , au regard de l'ensemble des propriétés physiques et mécaniques obtenues sur mortiers.

Dans la seconde partie le sable S_{RD} a été utilisé avec 4 lots de gravillons recyclés pour l'élaboration de 5 formules de bétons, le bétons de référence et 4 bétons en remplaçant 10% en volume des granulats naturels (S_N+G_N) par des granulats recyclés ($S_{RD}+G_R$)

Les propriétés physiques (porosité accessible à l'eau) et mécaniques (résistance à la compression, au fendage et modules dynamiques) ont été déterminées en testant des éprouvettes cylindriques 11 x 22 cm. Le suivi des cinétiques de séchage et de la perméabilité au gaz (azote) effectuée sur des bétons à différents états de saturation a été réalisé sur des disques 5x30cm.

Chapitre 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Les granulats recyclés

Les caractéristiques des granulats recyclés et en particulier de la fraction sableuse de ces granulats diffèrent parfois assez notablement de celles des granulats naturels. Une partie de ces caractéristiques est en fait influencée par la fraction mortier attachées à ces granulats. (Juan, et al., 2009).

1.1 Influence de l'ancienne pate sur les caractéristiques physiques et chimiques des granulats

Les granulats recyclés diffèrent principalement des granulats naturels en ce qu'ils sont composés de deux fractions de nature différente : le granulat naturel et le mortier de ciment qui y est accroché. Ce mortier de ciment est la cause de la baisse des caractéristiques des granulats recyclés.

Plusieurs chercheurs (Jose, 2002), (Juan, et al., 2009), (Akash, et al., 2007), (Martín-Morales, et al., 2011), (Manzi, et al., 2013), ont constaté que le coefficient d'absorption d'eau des granulats recyclés est compris entre 3 et 12%. Il est important de noter que cette valeur est bien plus élevée que celle des granulats naturels, qui ont une absorption d'eau comprise entre 0.5 et 3%.

En effet la valeur précise de l'absorption d'eau des granulats recyclés dépend du béton parent (béton à partir duquel ont été produits ces granulats) et le taux de mortier résiduel sur les granulats.

M. S. de Juan et P. A Gutiérrez ont montré que l'augmentation de l'absorption d'eau augmente avec l'augmentation de la fraction du mortier attachées à ces granulats (**Figure 1**). Etant plus poreux, le mortier attaché au granulat de départ provoque l'augmentation de l'aptitude de ce dernier à absorber l'eau. (Juan, et al., 2009)

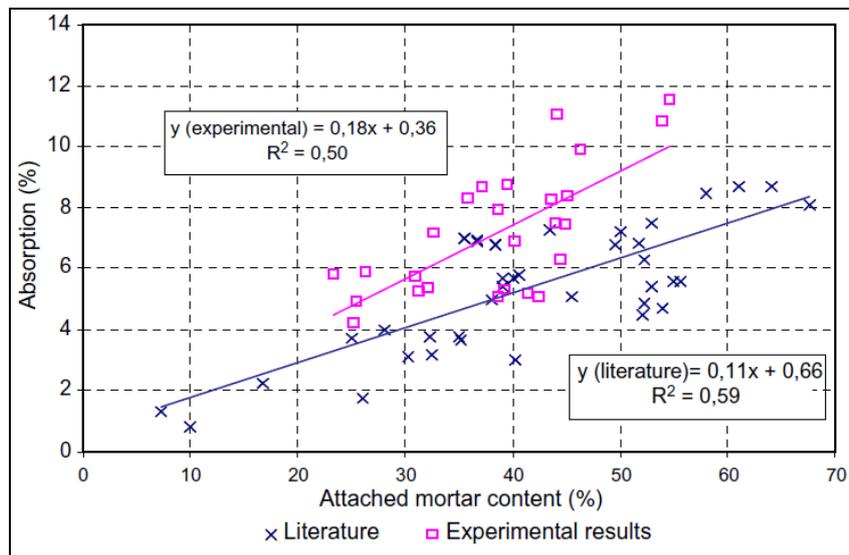


Figure 1. Relation entre teneur en mortier et absorption d'eau (Juan, et al., 2009)

La teneur en mortier dépend du cycle de concassage du béton et est directement liée à la taille du granulat (Juan, et al., 2009). Aussi, certaines études ont été réalisées pour caractériser ce mortier (Abbas, et al., 2009). Il a également été constaté que les caractéristiques du mortier dépendaient des performances du béton d'origine (Padmini, et al., 2009). D'autres caractéristiques sont aussi affectées par les résidus de mortier comme la densité qui est plus faible par rapport aux granulats naturels (**Figure 2**). La teneur en sulfates et en alcalins est plus élevée comparé aux granulats naturels (**Figure 3**) (Juan, et al., 2009).

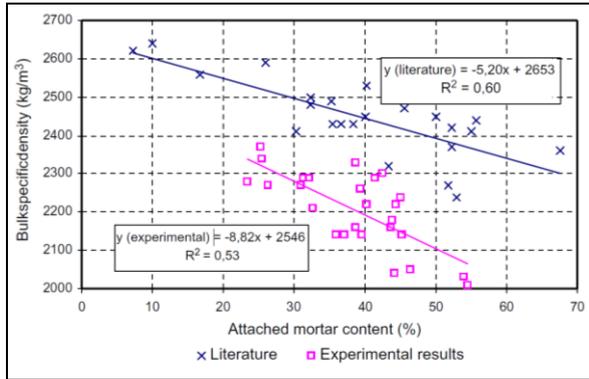


Figure 2. Relation entre teneur en mortier et la densité (inversement proportionnel) (Juan, et al., 2009).

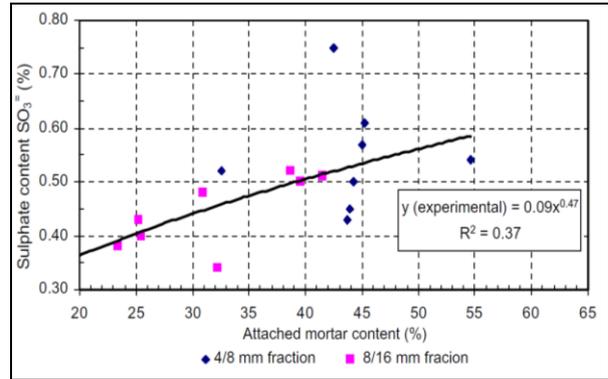


Figure 3. Relation entre teneur en mortier et teneur en sulfate (proportionnel) (Juan, et al., 2009)

1.2 Caractéristiques mécaniques des gravillons recyclés

La présence du mortier réduit la résistance aux chocs, à l'usure et au gel/dégel (Figure 4) ((OMARY, et al., 2015) et (Juan, et al., 2009)).

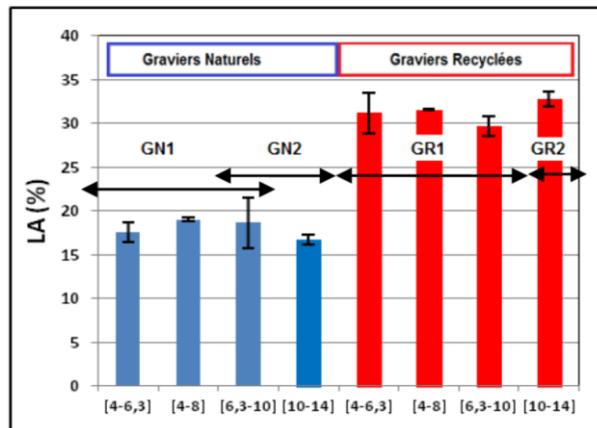


Figure 4. Le coefficient Los Angeles : comparaison entre gravillons naturels et recyclés (OMARY, et al).

Des changements de la distribution granulairé après des cycles de gel/dégel ont été remarqués pour les granulats recyclés alors qu'elle reste presque la même pour les granulats naturels. Cela s'explique par le fait que les cycles de gel/dégel provoquent la dégradation de l'ancienne pâte attachée au granulat recyclé (Figure 5) (Omary, et al., 2016).

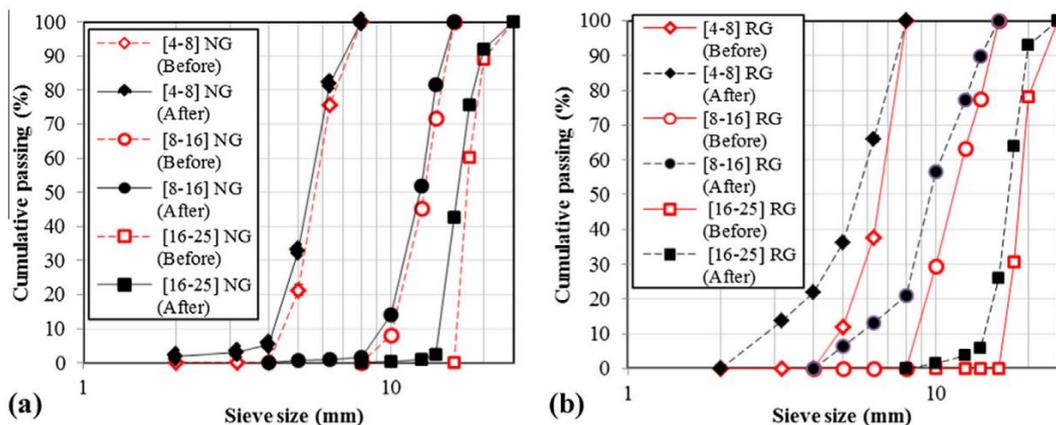


Figure 5. Influence du gel/dégel sur la granularité des granulats naturels et recyclés (Omary, et al., 2016).

2. Influence de l'incorporation des granulats recyclés sur les propriétés des bétons

L'utilisation des granulats provenant du recyclage du béton de démolition dans de nouveaux bétons n'est pas récente. Le premier état de l'art sur le sujet a en effet été publié par la RILEM en 1978 (Nixon, 1978).

Dans la littérature, les granulats recyclés sont incorporés dans la formulation de béton en substituant les granulats naturels dans des proportions variant de 0 à 100 %. Des bétons témoins sont toujours fabriqués pour établir un point de comparaison.

Ainsi, les approches pour formuler un béton sont nombreuses, chacun fixant les paramètres utiles pour comparer et observer l'effet des granulats recyclés sur le comportement des bétons. Certains choisissent de travailler à ouvrabilité constante ((Debieb, et al., 2010), (Levy, 2004)) tandis que d'autres auteurs s'intéressent aux temps de malaxage, au degré d'humidité des granulats recyclés et à la quantité d'eau globale et effective à mettre en œuvre (Evangelista, et al., 2007) et (Jose, 2002). Pour certaines études le remplacement est massique ou volumique sans modifier les autres paramètres de composition (quantité de ciment, rapport E/C, etc.) (Gomart, et al., 2013, August) et (Olorunsogo, et al., 2002), tel est le cas de notre étude.

En général il n'existe pas de méthode de composition du béton qui soit universellement reconnue comme étant la meilleure. La composition du béton est toujours le résultat d'un compromis entre une série d'exigences généralement contradictoires. Cependant, une méthode de composition du béton pourra être considérée comme satisfaisante si elle permet de réaliser un béton qui respecte le cahier des charges.

2.1 Propriétés des bétons à l'état frais

La masse volumique du béton conventionnel à l'état frais est connue pour être aux alentours de 2400 kg/m^3 . Cependant, les bétons à base de granulats recyclés avec un taux de substitution de 100% ont une masse volumique clairement inférieure qui peut être entre 2000 et 2200 Kg/m^3 (Hansen, et al., 1983). Plus le taux de substitution augmente plus la masse volumique diminue, et ce due à la faible masse volumique des granulats recyclés qui le constituent. (Omary, et al., 2016)

Plusieurs recherches ont montré que pour une teneur en eau identique, l'ouvrabilité d'un béton de granulats recyclés est inférieure à celle d'un béton standard, et ceci est plus ressenti lorsque le pourcentage de substitution dépasse 50% (Ilker, et al., 2004). Cette différence est très certainement due à la plus grande porosité des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels. Afin de pallier ce problème, différentes études ont été réalisées en faisant varier les conditions de préparation des granulats, et il en est ressorti qu'un ajout d'eau correspondant à l'absorption d'eau des granulats testés améliore significativement l'ouvrabilité du béton frais (Akash, et al., 2007). L'eau peut être ajoutée de différentes manières, soit en pré-saturant les granulats préalablement au malaxage, soit en compensant en ajoutant directement l'eau d'absorption dans l'eau de gâchage (Ferreira, et al.) et (Zengfeng, 2014).

Pour la même raison (une plus grande porosité des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels), le pourcentage de l'air occlus est légèrement supérieur (de 4 à 5 %) dans le cas des bétons recyclés avec un taux de substitution de 100% (**Figure 6**) (Omary, et al., 2016).

Ravindrarah et al. ont montré que la diminution du temps de prise des bétons de granulats recyclés est dû à la réduction du rapport eau efficace/ciment et la présence d'alcalins libérés par les granulats recyclés (R., et al., 1987). Mais l'usage de superplastifiant agit dans le sens inverse. (Hansen, 2004)

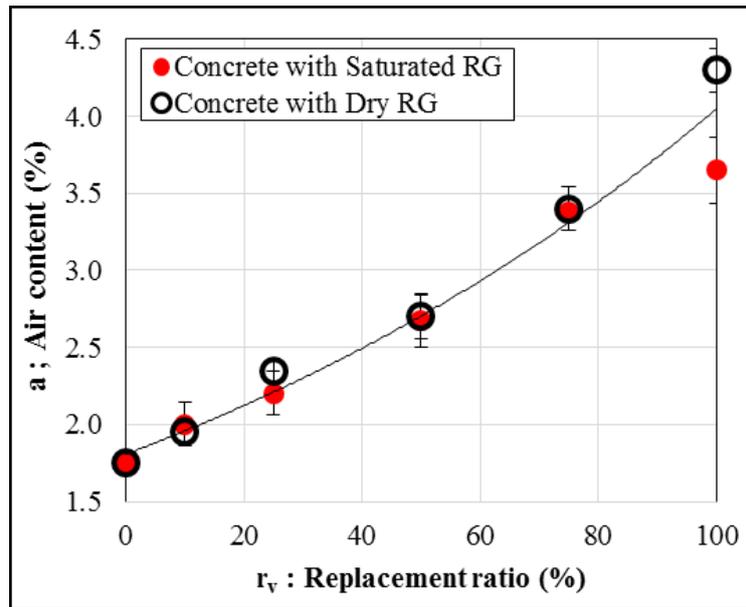


Figure 6. Pourcentage de l'air occlus en fonction du taux de substitution [20]

L'augmentation des dosages en liants neufs tend à faire croître l'exothermie des bétons recyclés. La réduction du rapport eau efficace/ciment joue dans le sens inverse, mais la présence d'une réserve d'eau dans les granulats va dans le sens d'une meilleure hydratation du ciment, et donc d'un dégagement thermique plus fort Juan, et al., 2009).

2.2 Propriétés des bétons à l'état durci

2.2.1 Propriétés physiques

- **Absorption d'eau des bétons** : Les absorptions par immersion ou par capillarité sont nettement augmentées dans le cas des bétons de granulats recyclés. Ceci s'applique en particulier à l'absorption par capillarité, du fait d'une plus grande quantité de pores capillaires (Evangelista, et al., 2007).
- **Porosité** : Du fait de la présence de mortier attaché aux granulats, la structure des bétons recyclés est globalement plus poreuse qu'un béton naturel, et cela est d'autant plus vrai que le taux de remplacement est important avec une diminution de la densité totale du matériau de l'ordre de 5 à 10% pour une substitution à 100% des gravillons naturels par des granulats recyclés. ((Evangelista, et al., 2007), (Jose, 2002) (Ilker, et al., 2004) et (Akash, et al., 2007)). Les valeurs de porosité obtenues dans la littérature vont de 14% à 20,1%. Cependant il a été observé une diminution de porosité significative une fois que le béton a mûri quelques temps. En effet, Gomez-Soberon a montré que le taux de remplacement des granulats est directement corrélé au volume de pores total et à leurs tailles, mais que si cette influence est tout à fait vérifiée au jeune âge du béton, elle s'atténue à mesure que le béton vieillit. Ceci semble dû à la cristallisation de nouveaux produits qui réduisent à la fois le nombre et la taille des pores. (Jose, 2002).
- **Perméabilité** : Il a été largement prouvé que les bétons fabriqués à partir de granulats recyclés sont nettement plus perméables que les bétons classiques, cela dit, il faut tout de même noter que cette perméabilité peut facilement être réduite en utilisant des fines (cendres volantes, fillers, fumée de silice... etc).

2.2.2 Propriétés mécaniques

- **Module d'élasticité dynamique** : Plusieurs recherches se sont intéressées à l'étude du module d'élasticité. Elles concordent toutes sur le fait que le module d'Young d'un béton à granulats recyclés

est significativement plus faible que celui d'un béton à granulats naturels (Akash, et al., 2007) et (Poon, et al., 2007).

- *Résistance moyenne à la compression* : Dans la plupart des cas, il a été constaté que les bétons à granulats recyclés présentent des résistances à la compression inférieures à celles des bétons naturels (Zhen-Hua, et al., 2014). Cette diminution de performance est significativement affectée par certains paramètres, tels que le taux de substitution des granulats, leurs conditions de conditionnement (saturés, sec...), la qualité du béton parent, ou encore le rapport eau/ciment. Par exemple, plusieurs recherches ont montré que, pour un rapport E/C constant, la diminution de la résistance à la compression est peu significative lorsque le taux de substitution des graviers est inférieur ou égal à 25% et de sable inférieur à 30%. ((Evangelista, et al., 2007) et (Hansen, 2004)). Généralement, cette diminution est attribuée à une porosité plus importante dans les bétons de granulats recyclés [8] et une mauvaise interface granulats/liant (YUENONG, et al., 1998). Il est cependant important de noter que l'inverse a aussi été observé, avec des augmentations de performances mécaniques de l'ordre de 10 à 13% pour les bétons recyclés par rapport aux bétons naturels (Wang, et al., 2010) et (Etxeberia, et al., 2007). Il a été montré par exemple qu'à E/C élevé (entre 0,6 et 0,75), la résistance d'un béton recyclé est comparable à celle d'un béton standard jusqu'à un taux de remplacement aussi important que 75%. (Amon, 2003). Rao et al. ont également constaté que pourvu que le rapport E/C soit supérieur ou égal à 0.55, les résistances des bétons recyclés étaient comparables à celles des bétons standards même à un taux de remplacement de 100% (Akash, et al., 2007). Cette tendance est liée au fait que pour des rapports E/C élevés, la résistance en compression est liée à la qualité de la pâte et de l'interface pâte-granulats, moins résistantes que les granulats. En revanche, avec des rapports E/C inférieurs à 0.4, la valeur de la résistance est réduite de 25%. Le peu d'études réalisées jusqu'à présent cherchant à relier la résistance à la compression aux conditions de préparation des granulats (séchés en étuve, séchés à l'air, imbibés surface sèche...) n'ont pas donné de résultats très concluants et concordants (Poon, et al., 2007) et (Akash, et al., 2007). De manière générale, on peut dire que plus le rapport granulats recyclés/granulats naturels augmente, plus la résistance à la compression diminue, mais qu'en ajustant ce ratio, on parvient toujours à atteindre les résistances requises ((Evangelista, et al., 2007), (Ilker, et al., 2004), et (Akash, et al., 2007)). De Brito (J., Juillet 2014) a également constaté que la qualité du granulats recyclé joue un rôle très important dans la résistance à la compression du béton dans lequel il est incorporé.
- *Résistance à la traction par fendage et à la flexion* : Comme pour la résistance à la compression, la résistance à la traction de fendage et de flexion diminue en augmentant le taux de substitution en granulats recyclés. ((Hansen, 2004) et (Evangelista, et al., 2007)) Les études réalisées concernant la résistance en traction des bétons recyclés présentent des résultats légèrement différents les uns des autres. Si toutes indiquent une perte de résistance pour le béton recyclé par rapport au béton standard, certains ont obtenu une réduction de 15 à 20% à un taux de remplacement de 100% (Akash, et al., 2007) et d'autres une perte de moins de 10% pour un essai réalisé à 28 jours.

Chapitre 2 : Matériaux utilisés et Caractérisation des granulats

1. Matériaux utilisés

- **Ciment** : Le ciment utilisé est un ciment CEM II/A-L 42.5 de Rochefort fourni par Holcim. Ce genre de ciment est couramment utilisé pour la confection de bétons C25/30 et C35/45. Le ciment a été livré en vrac en 2 lots de 19 tonnes. Chaque lot a été conditionné en usine en futs plastiques étanches de 60 litres, pour optimiser la conservation du ciment sur la durée du projet national.
- **Filler** : Un filler calcaire, le Betocarb HP-OG d'Omya, a également été sélectionné pour améliorer le squelette granulaire des bétons. Ce matériau relativement inerte et régulier a été livré en sac de 25 kg palettisés.
- **Super plastifiant** Le MC PowerFlow 3140, fourni par MC Chimie, a été choisi par le Synad comme superplastifiant.
- **Granulats naturels** composés de sable semi-concassé 0/4 de la carrière Lafarge de Sandrancourt et gravillons calcaires concassés 4/10 et 6,3/20 provenant de la carrière Lafarge de Givet
- **Sables recyclés** 6 types de sables recyclés ont été utilisés pour la formulation des mortiers (**Figure 7**) : Sable recyclé de DLB de la plateforme de Gonesse de classe granulaire 0/4 (nommé par la suite SR-PN), Sable recyclé provenant de la plateforme de Neuilly de classe granulaire 0/5 (nommé par la suite SR-1), Sable recyclé provenant de la plateforme de Leonhart de classe granulaire 0/4 (nommé par la suite SR-2), Sable recyclé provenant de la plateforme d'Anse (nommé par la suite SR-3), Sable de la plateforme d'Ancyra (nommé par la suite SR-4) et Sable recyclé provenant de la plateforme de CBN Tourville (nommé par la suite SR-5).



Figure 7. Les différents sables recyclés utilisés pour la formulation des mortiers.

- **Gravillons recyclés** : 4 types de gravillon recyclés ont été utilisés pour la formulation des bétons (**Tableau 1** et **Tableau 2**): gravillons recyclés provenant de la plateforme de la DLB de classe granulaire 4/10 et 10/20 (nommés GR-1 (1) et GR-1 (2)), gravillons recyclés provenant de la plateforme de Neuilly de classe granulaire 6,3/10 et 12,5/31,5 (nommés par la suite GR-2 (1) et GR-2 (2)), gravillons recyclés provenant de la plateforme de Leonhart de classe granulaire 4/10 et 10/20 (nommés par la suite GR-3 (1) GR-3 (2)) et gravillons recyclés provenant de la plateforme d'Ancyra de classe granulaire 6,3/20 (**Tableau 2**) (nommé par la suite GR-4).

Tableau 1. Gravillons naturels et Gravillons recyclés provenant de la plateforme de Neuilly

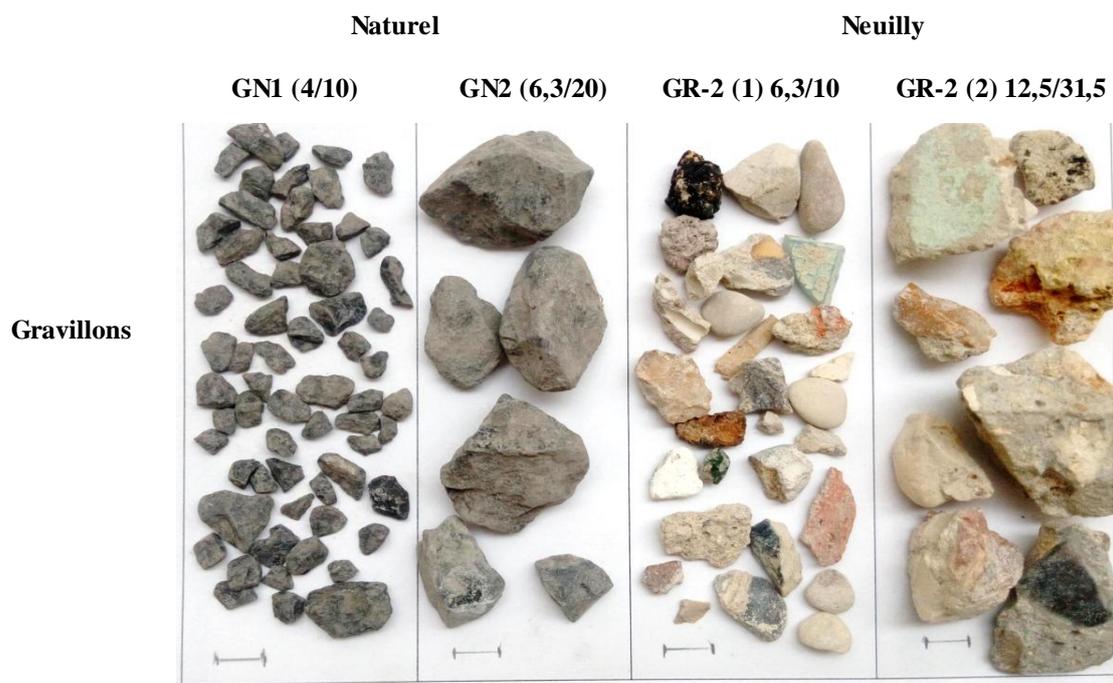
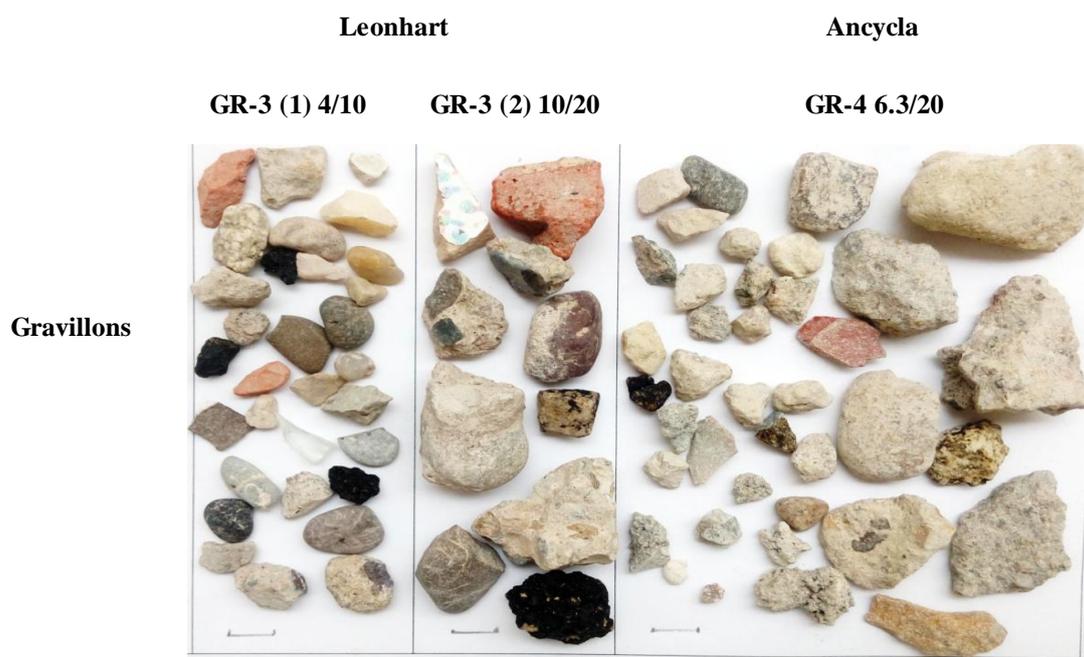


Tableau 2. Gravillons recyclés provenant de la plateforme de Leonhart et d'Ancyra.



2. Caractérisation des granulats

2.1 Propriétés physiques :

Les propriétés physiques des granulats recyclés sont différentes de celles des granulats naturels. Ils ont le plus souvent une densité plus faible et une absorption d'eau plus élevée.

2.1.1 Granulométrie : [EN NF 933-11]

Une différence remarquable entre la granulométrie du sable naturel et celle des sables recyclés est observée au niveau de l'analyse granulométrique illustrée par la **Figure 8**. A noter que les sables SR-PN, SR-1, SR-2, SR-3, SR-4 et SR-5 présentent une granularité assez proche.

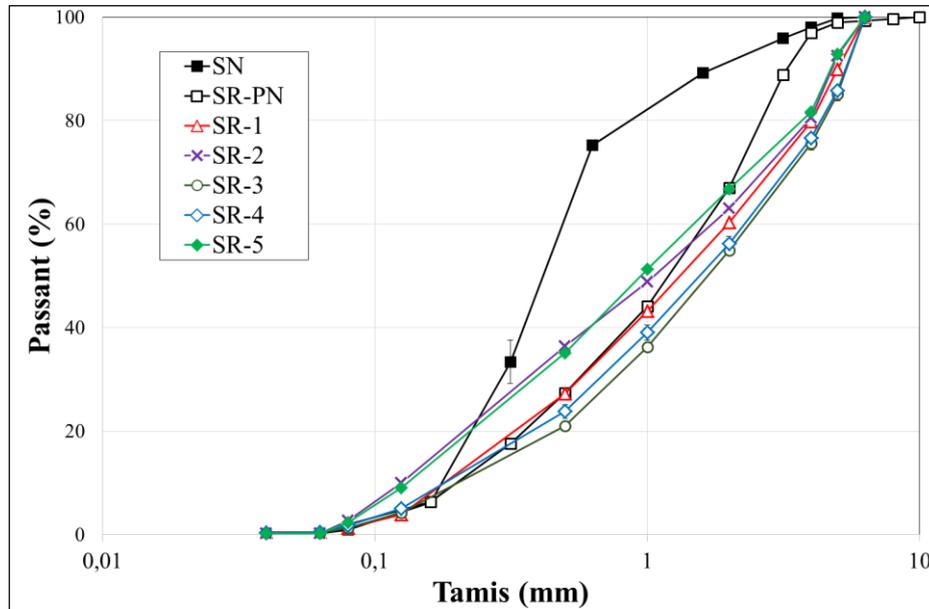


Figure 8. Courbe granulométrique du sable naturel (SN) et sables recyclés.

La teneur en fine (% de particules passant à travers le tamis de 0.063 mm) a été déterminée. Il apparaît que tous les sables contiennent moins de 3% en masse de fines (**Figure 9**).

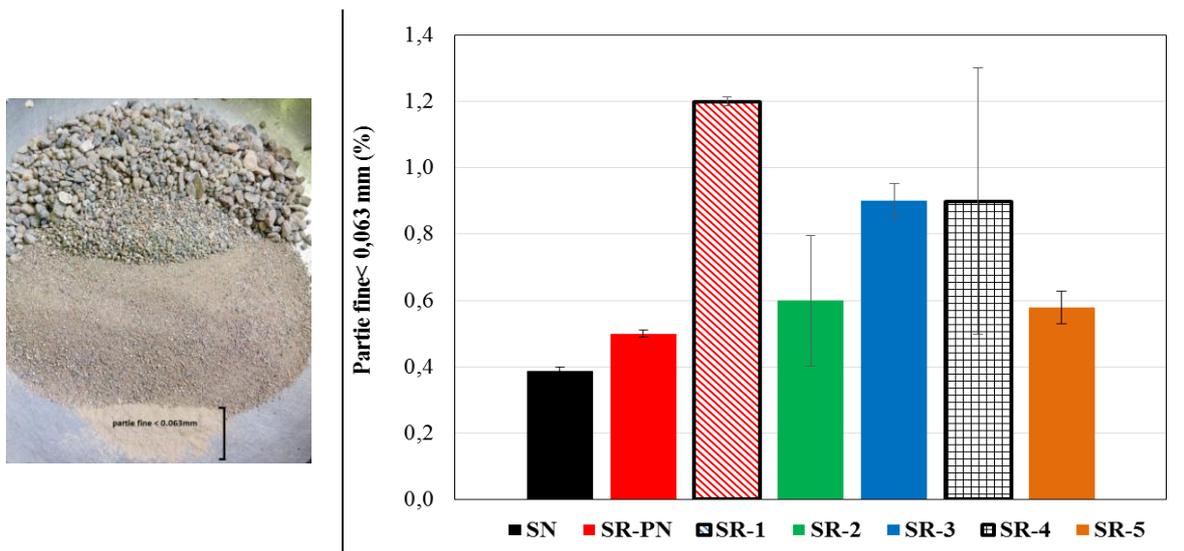


Figure 9. La teneur en fine des sables recyclés.

2.2.1. Module de finesse : [EN 12620]

Le module de finesse est calculé conformément à l'annexe B de la norme **EN 12620** et les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 10. Les SR-3 et SR-4 ont le module de finesse le plus faible. C

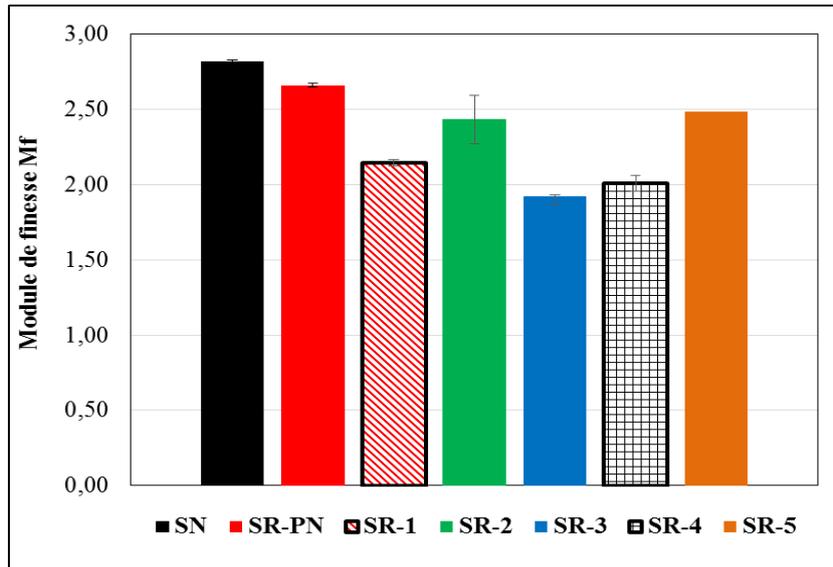


Figure 10. Module de finesse des sables.

2.1.2 Mesure de la masse volumique par la méthode du pycnomètre

La masse volumique, le coefficient d'absorption et la porosité des granulats naturels et recyclés ont été déterminées par la méthode du Pycnomètre selon la norme NF EN 1097-6. Ces mesures s'effectuent en 4 étapes (Figure 11).

- Le pycnomètre est rempli d'eau jusqu'au trait de jauge ; il est ensuite pesé avec précision ce qui donne la masse (M_3).
- Les granulats sont introduits dans un pycnomètre vide, on y ajoute à nouveau de l'eau jusqu'au trait de jauge. Le système obtenu est alors pesé avec précision et la masse obtenue est appelée (M_2).
- Les granulats sont ensuite séchés à l'aide d'un linge propre pour obtenir des granulats saturés, surface sèche ; ils sont alors pesés ce qui fournit la masse (M_1).
- Les granulats sont ensuite placés dans une étuve maintenue à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (M_4).

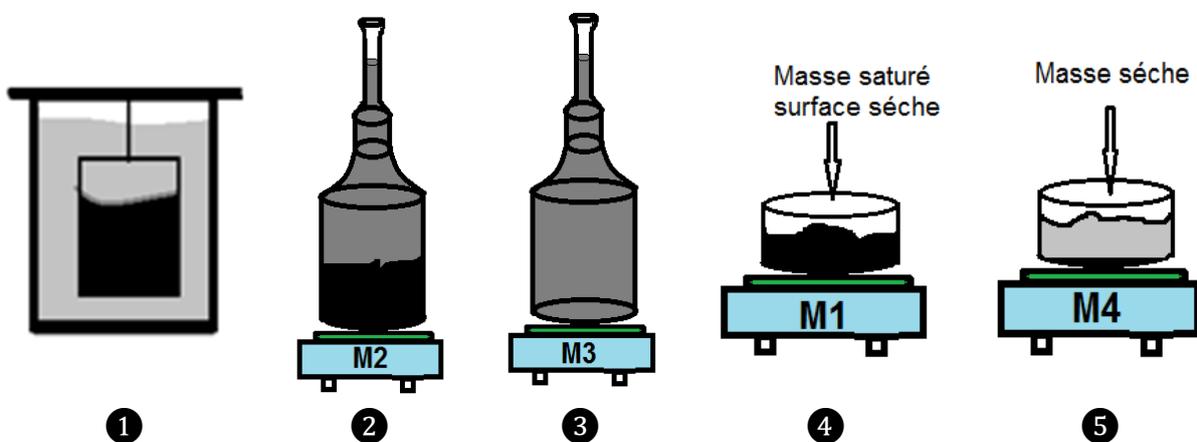


Figure 11. Les étapes de la mesure de la masse volumique, du coefficient d'absorption d'eau et de la porosité.

Les différentes grandeurs sont calculées grâce aux relations sont :

→ Masse volumique réelle, ρ_{rd} , exprimée en kg/m^3 : $\rho_{rd} \left(\text{kg/m}^3 \right) = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \rho_{eau}$

→ Coefficient d'absorption d'eau $WA_{24h} (\%) = \frac{M_1 - M_4}{M_4} 100$

→ Porosité accessible à l'eau $n(\%) = \frac{M_1 - M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} 100$:

Les résultats obtenus sont présentés dans la **Figure 12**.

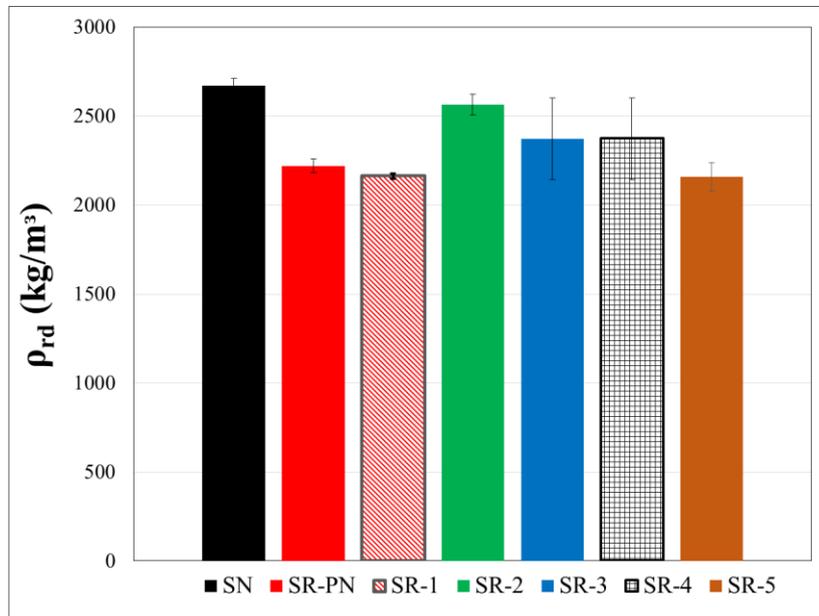


Figure 12. Masses volumiques réelle après séchage à l'étuve.

Les sables recyclés se caractérisent par des coefficients d'absorption et des porosités supérieures au sable naturel. Les sables SR-1, SR-2 et SR-4 ont des porosités et des coefficients d'absorptions les plus élevés (**Figure 13**).

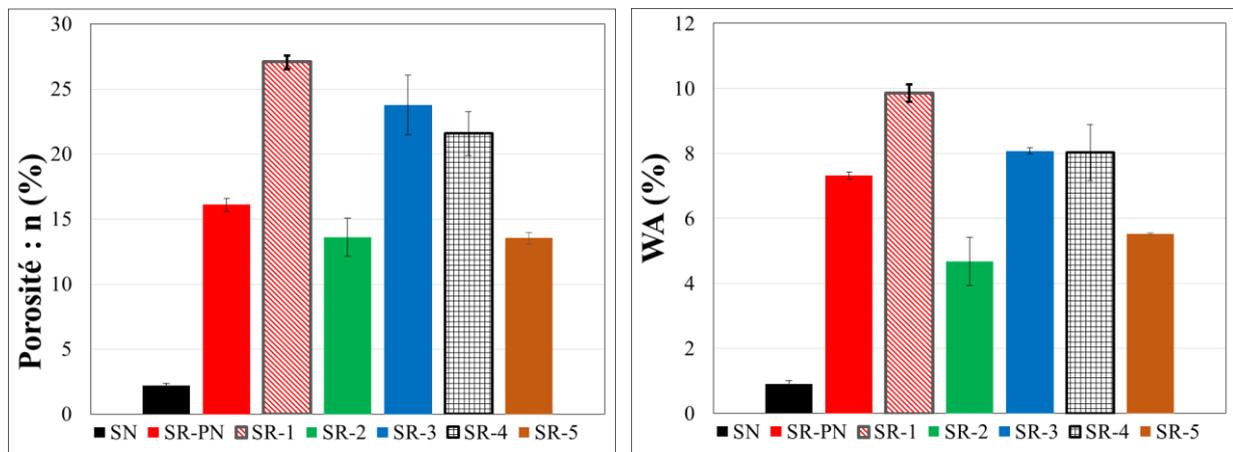


Figure 13. Porosité et coefficients d'absorption des différents sables.

Chapitre 3 : Formulation et propriétés des mortiers à l'état frais et à l'état durci

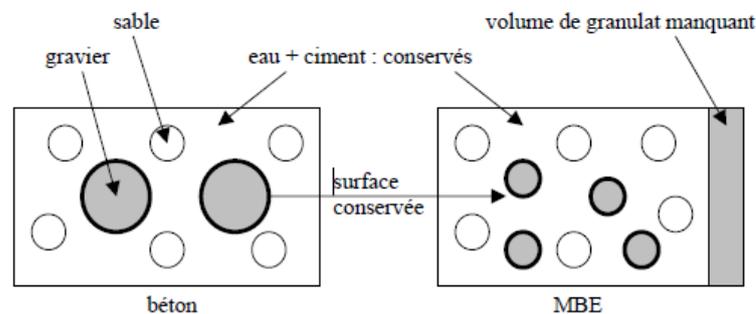
1. Formulation des mortiers

Le comportement de bétons peut être étudié par le biais d'études sur des mortiers judicieusement élaborés et dosés. Ces mortiers présentent alors l'avantage d'être plus faciles à tester, les volumes de matériau requis étant plus faibles du fait de la diminution du volume représentatif.

La méthode d'obtention du mortier associé au béton utilisée dans cette étude est la méthode du mortier de béton équivalent MBE

1.1 Méthode du mortier de béton équivalent MBE

La méthode MBE consiste à concevoir, à partir d'une composition donnée d'un béton, un mortier de béton équivalent dont les propriétés rhéologiques sont corrélables à celles du béton d'origine (Schwartzentruber, et al., 2000).



Il s'agit de remplacer les gravillons d'un béton par du sable dont la surface développée des grains est égale à celle des gravillons retirés. Pour le calcul des surfaces développées on suppose que la courbe granulaire peut être discrétisée en plusieurs tranches granulaires et qu'à l'intérieur de chaque tranche granulaire « i » les granulats sont de forme sphérique de volume $v_i = \pi d_i^3 / 6$ et de surface $s_i = \pi d_i^2$ et que la densité de la particule moyenne est indépendante de sa taille et est égale à celle du granulat considéré.

On admet que chaque tranche granulaire est composée de particules monodimensionnelles dont le diamètre, d_i , est la moyenne arithmétique des mailles des deux tamis adjacents, $d_i = \frac{T_{mi} + T_{Mi}}{2}$, avec T_{mi} : taille du tamis inférieur et T_{Mi} : taille du tamis supérieur.

La masse de granulats dans chaque tranche granulaire est $M_i = (R_{mi} - R_{Mi}) \frac{g}{100}$ où g (kg / m^3) est le dosage du granulat considéré dans le béton, R_{mi} et R_{Mi} les refus associés au tamis supérieurs et inférieurs définissant une tranche granulaire i.

Le volume des granulats contenu dans la tranche i est $V_i = \frac{M_i}{\rho}$ où ρ masse volumique des granulats.

Le nombre de particules N_i dans une tranche granulaire i étant $N_i = \frac{V_i}{v_i}$ on en déduit la surface développée par

les particules dans une tranche granulaire i $S_i = N_i s_i = \frac{V_i}{v_i} \times s_i$

La même démarche est appliquée pour le calcul de la surface développée par le sable et par les gravillons. En utilisant cette méthode, on calcule la surface développée des gravillons présents dans le béton, puis celle d'un Kg de sable. On en déduit alors la quantité de sable correcteur qu'il faut rajouter pour remplacer les gravillons. Il suffit pour cela d'assurer l'égalité entre les surfaces développées par le sable correcteur et les gravillons.

Un exemple de calcul est présenté dans le **Tableau 3** (La masse du sable dans 1 m³ de béton= 771 Kg ; $\rho_{(\text{sable})} = 2570 \text{ Kg/m}^3$).

Tableau 3. Exemple de calcul.

			masse sable(analyse granulométrique) g								
masse sable dans 1m ³ béton	771	kg	1123,6								
ρ	2570										
tamis	0	0,063	0,08	0,16	0,315	0,63	1,6	3,15	4	5	6,3
refus g	4,8	5,5	60,8	336,8	438,8	155	77,7	22,2	19,8	2,2	0
refus %	0,4	0,5	5,4	30,0	39,1	13,8	6,9	2,0	1,8	0,2	0
masse kg	3,3	3,8	41,7	231,1	301,1	106,4	53,3	15,2	13,6	1,5	0
d_{moy}	0,0315	0,0715	0,12	0,2375	0,4725	1,115	2,375	3,575	4,5	5,65	6,3
volume grain	1,64E-14	1,91E-13	9,05E-13	7,01E-12	5,52E-11	7,26E-10	7,01E-09	2,39E-08	4,77E-08	9,44E-08	1,31E-07
VOLUME VT	1,28E-03	1,47E-03	1,62E-02	8,99E-02	1,17E-01	4,14E-02	2,07E-02	5,93E-03	5,29E-03	5,87E-04	0,00E+00
nombre	7,83E+10	7,67E+09	1,79E+10	1,28E+10	2,12E+09	5,70E+07	2,96E+06	2,48E+05	1,11E+05	6,22E+03	0,00E+00
surface grain	3,12E-09	1,61E-08	4,52E-08	1,77E-07	7,01E-07	3,91E-06	1,77E-05	4,02E-05	6,36E-05	1,00E-04	1,25E-04
SURFACE ST	2,44E+02	1,23E+02	8,12E+02	2,27E+03	1,49E+03	2,23E+02	5,24E+01	9,95E+00	7,05E+00	6,24E-01	0,00E+00
SD totale	5,23E+03	m ²									
SD	1kg sable	6,785059185	m ²								

De la même manière, on détermine la surface développée par le gravillon, soit dans notre cas SD (gravillon)=274,62 m², c'est la surface que doit remplacer le sable. Sachant que 1 Kg de sable génère une surface de 7,66 m², on peut donc déduire la quantité du sable qui remplacera celle du gravier. Sable à rajouter = $(274,62/7,66) = 35,85$. Les calculs réalisés sont résumés les **Tableau 4**, **Tableau 5** et **Tableau 6**.

Tableau 4. Formulation initiale.

	Masse Kg	m ³ / m ³
Ciment	299,0	0,097
Filler	58,0	0,021
Eau	185,0	0,185
Sable	771,0	0,299
Gravillons	1074,0	0,396
Sp	2,000	0,002
Air		0,020
Total		1

Tableau 5. Formulation du MBE.

	Masse Kg	m ³ / m ³
Ciment	299,00	0,097
Filler	58,00	0,021
Eau	185	0,185
Sable	806,8	0,314
Gravillons	0,0	0,000
Sp	2,00	0,002
Air		0,0014
Total		0,6207

Tableau 6. Formulation finale du MBE

	Masse Kg	m ³ / m ³
Ciment	481,7	0,156
Filler	93,4	0,035
Eau	298,1	0,298
Sable	1299,9	0,506
Sp	3,22	0,003
Air	0,0	0,002
Total		1,000

1.1.1 Substitution de 10% du SN par un sable recyclé

On a substitué 10% en volume du sable naturel par du sable recyclé. Les dosages des différents constituants des MBE SR-PN, MBE SR-1, MBE SR-2, MBE SR-3, MBE SR-4 et MBE SR-5 sur matériaux secs sont présentés respectivement dans les **Tableau 7**, **Tableau 8**, **Tableau 9**, **Tableau 10**, **Tableau 11** et **Tableau 12**.

Tableau 7. Dosages des différents constituants pour le MBE SR-PN.

MBE			MBE-10%-SR-PN		
	Masse(Kg)	1 m ³	Volume (m ³)	Masse Vol.(Kg/m ³)	Masse (Kg pour 1m ³)
Ciment	481,7	0,156	0,156	3090,0	481,7
Filler	93,4	0,035	0,035	2700,0	93,4
Eau	298,1	0,298	0,298	1000,0	298,1
Sable	1299,9	0,506	0,455	2570,0	1169,9
Sp	3,22	0,003	0,003	1100,0	3,2
Air	0,0	0,003	0,003	1000,0	0,0
SR	0,0	0,000	0,051	2220,0	112,3
		1,000	1,000		2158,6

Tableau 8. Dosages des différents constituants pour le MBE SR-1.

MBE			MBE-10%-SR-1		
	Masse(Kg)	1 m ³	Volume (m ³)	Masse Vol.(Kg/m ³)	Masse (Kg pour 1m ³)
Ciment	481,7	0,156	0,156	3090,0	481,7
Filler	93,4	0,035	0,035	2700,0	93,4
Eau	298,1	0,298	0,298	1000,0	298,1
Sable	1299,9	0,506	0,455	2570,0	1169,9
Sp	3,22	0,003	0,003	1100,0	3,2
Air	0,0	0,003	0,003	1000,0	0,0
SR	0,0	0,000	0,051	2155,9	109
		1,000	1,000		2155,4

Tableau 9. Dosages des différents constituants pour le MBE SR-2.

MBE			MBE-10%-SR-2		
	Masse(Kg)	1 m ³	Volume (m ³)	Masse Vol.(Kg/m ³)	Masse (Kg pour 1m ³)
Ciment	481,7	0,156	0,156	3090,0	481,7
Filler	93,4	0,035	0,035	2700,0	93,4
Eau	298,1	0,298	0,298	1000,0	298,1
Sable	1299,9	0,506	0,455	2570,0	1169,9
Sp	3,22	0,003	0,003	1100,0	3,2
Air	0,0	0,003	0,003	1000,0	0,0
SR	0,0	0,000	0,051	2604,9	131,8
		1,000	1,000		2178,1

Tableau 10. Dosages des différents constituants pour le MBE SR-3.

MBE			MBE-10%-SR-3		
	Masse(Kg)	1 m ³	Volume (m ³)	Masse Vol.(Kg/m ³)	Masse (Kg pour 1m ³)
Ciment	481,7	0,156	0,156	3090,0	481,7
Filler	93,4	0,035	0,035	2700,0	93,4
Eau	298,1	0,298	0,298	1000,0	298,1
Sable	1299,9	0,506	0,455	2570,0	1169,9
Sp	3,22	0,003	0,003	1100,0	3,2
Air	0,0	0,003	0,003	1000,0	0,0
SR	0,0	0,000	0,051	2210.8	111.8
		1,000	1,000		2158.2

Tableau 11. Dosages des différents constituants pour le MBE SR-4.

MBE			MBE-10%-SR-4		
	Masse(Kg)	1 m ³	Volume (m ³)	Masse Vol.(Kg/m ³)	Masse (Kg pour 1m ³)
Ciment	481,7	0,156	0,156	3090,0	481,7
Filler	93,4	0,035	0,035	2700,0	93,4
Eau	298,1	0,298	0,298	1000,0	298,1
Sable	1299,9	0,506	0,455	2570,0	1169,9
Sp	3,22	0,003	0,003	1100,0	3,2
Air	0,0	0,003	0,003	1000,0	0,0
SR	0,0	0,000	0,051	2234.6	113
		1,000	1,000		2159,4

Tableau 12. Dosages des différents constituants pour le MBE SR-5.

MBE			MBE-10%-SR-5		
	Masse(Kg)	1 m ³	Volume (m ³)	Masse Vol.(Kg/m ³)	Masse (Kg pour 1m ³)
Ciment	481,7	0,156	0,156	3090,0	481,7
Filler	93,4	0,035	0,035	2700,0	93,4
Eau	298,1	0,298	0,298	1000,0	298,1
Sable	1299,9	0,506	0,455	2570,0	1169,9
Sp	3,22	0,003	0,003	1100,0	3,2
Air	0,0	0,003	0,003	1000,0	0,0
SR	0,0	0,000	0,051	2158,0	109,2
		1,000	1,000		2155,5

2. Propriétés des mortiers à l'état frais

2.1 La masse volumique à l'état frais

Les masses volumiques à l'état frais des différents mortiers sont représentées, pour chaque type de mortier, dans la **Figure 14**.

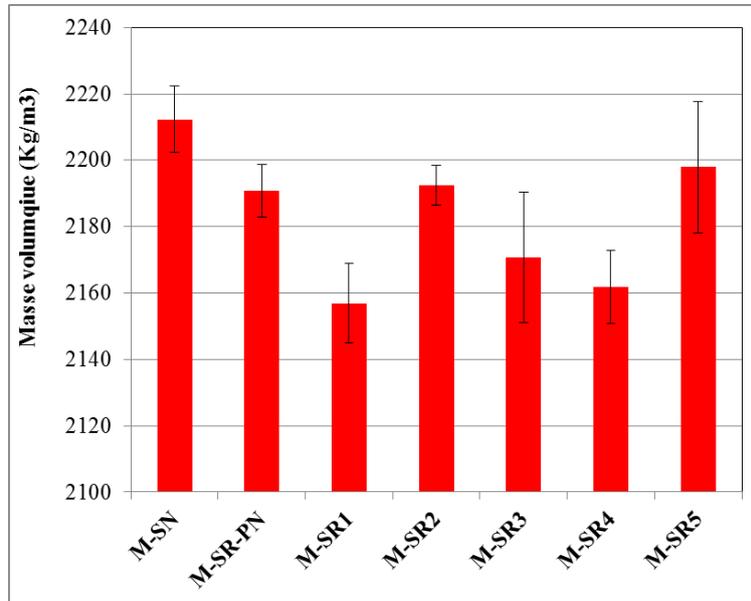


Figure 14. Masse volumique des mortiers à l'état frais.

Globalement, la masse volumique des mortiers de béton avec les sables recyclés est inférieure à celle du mortier avec le sable naturel, ce qui est conforme à nos attentes puisque la masse volumique du sable recyclé est inférieure à celle du sable naturel. Cependant, la différence ne dépasse pas 3%.

2.2 L'évolution de l'ouvrabilité au cours du temps

Les dimensions du mini cône utilisé pour caractériser l'ouvrabilité des différents mortiers sont données dans la **Figure 15**. L'évolution de l'étalement et de l'affaissement au cours du temps sont présentés respectivement dans les **Figure 16** et **Figure 17**. Il faut préciser que le dosage en superplastifiant a été ajusté pour obtenir un étalement de 35 cm à la sortie du malaxeur pour tous les mortiers.

La perte d'étalement au cours du temps est plus rapide pour les mortiers avec 10 % de SR en comparaison avec celle de mortier référence. Parmi les mortiers avec 10 % de SR le M-SR-PN enregistre la perte d'ouvrabilité la plus rapide. Au bout de 120 minutes tous les mortiers présentent le même étalement.

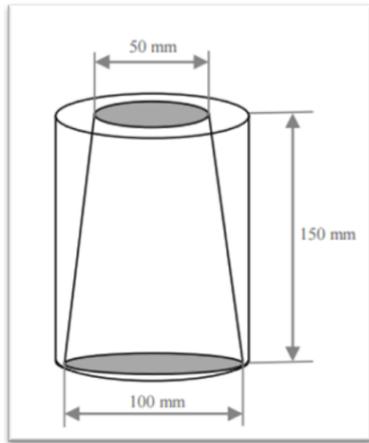


Figure 15. Dimension du mini cône.

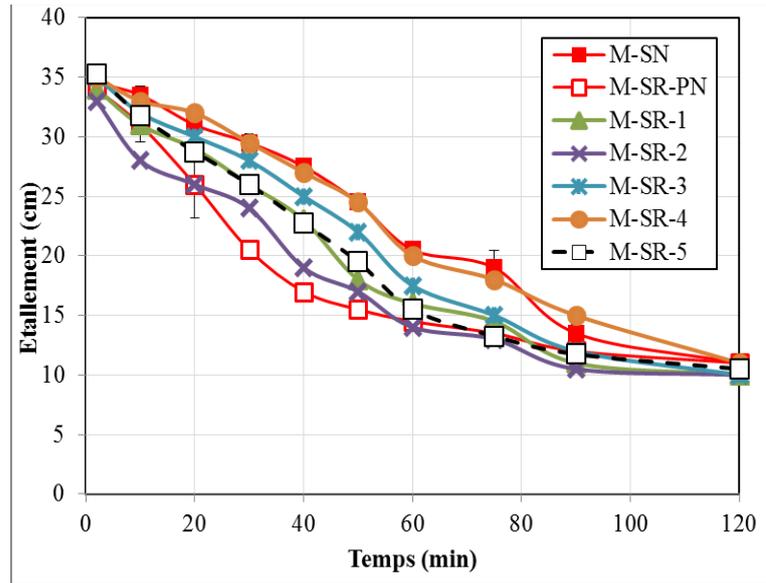


Figure 16. Évolution de l'étalement au cours du temps.

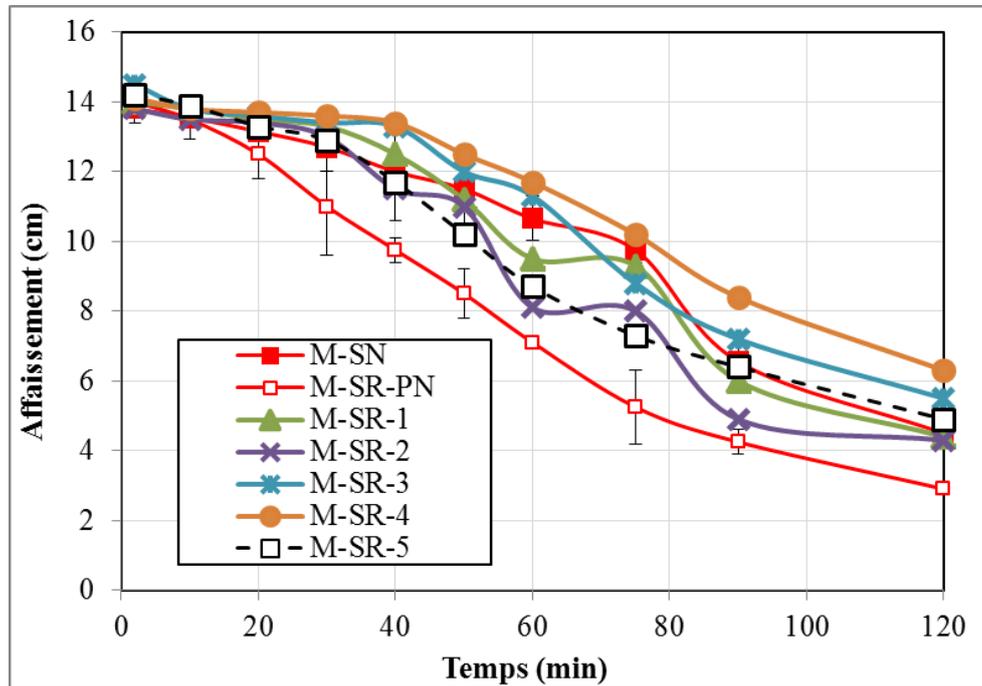


Figure 17. Évolution de l'affaissement au cours du temps.

2.3 Temps caractéristiques de prise

Pour la détermination du temps de prise des mortiers, l'appareil de Vicat a été utilisé conformément à la norme NF P 15-431 (ou NF EN 480-2). L'aiguille de 1,13mm de diamètre est alors soumise à une charge de 1000g. La procédure d'essai consiste à suivre l'enfoncement de l'aiguille dans le mortier au cours du temps jusqu'à ce qu'elle cesse de s'enfoncer sous l'effet de ce chargement et s'arrête à une distance « d » du fond du moule supérieure à 2,5mm. Cet instant est considéré comme le temps de début de prise.

Pour la détermination de la fin de prise, il faut retourner le moule afin que les essais de fin de prise puissent être faits sur la face initialement en contact avec la plaque de base et on mesure l'enfoncement de l'aiguille qui ne doit pas dépasser 2,5 mm.

Les résultats obtenus montrent que les temps caractéristiques du début et de fin de prise des mortiers dont 10% de sable naturel a été substitué par du sable recyclé sont assez proches (**Figure 18** et **Tableau 13**). On remarque que le début de prise enregistré pour le mortier M-SR 4 est le plus long. En revanche, le mortier MSR-PN s'illustre par le temps de prise le plus court. Ceci peut expliquer le fait que ce mortier présente la perte d'ouvrabilité la plus rapide (79% de réduction de l'affaissement au bout de 120 minutes pour le M-SR-PN et 55% pour le M-SR 4).

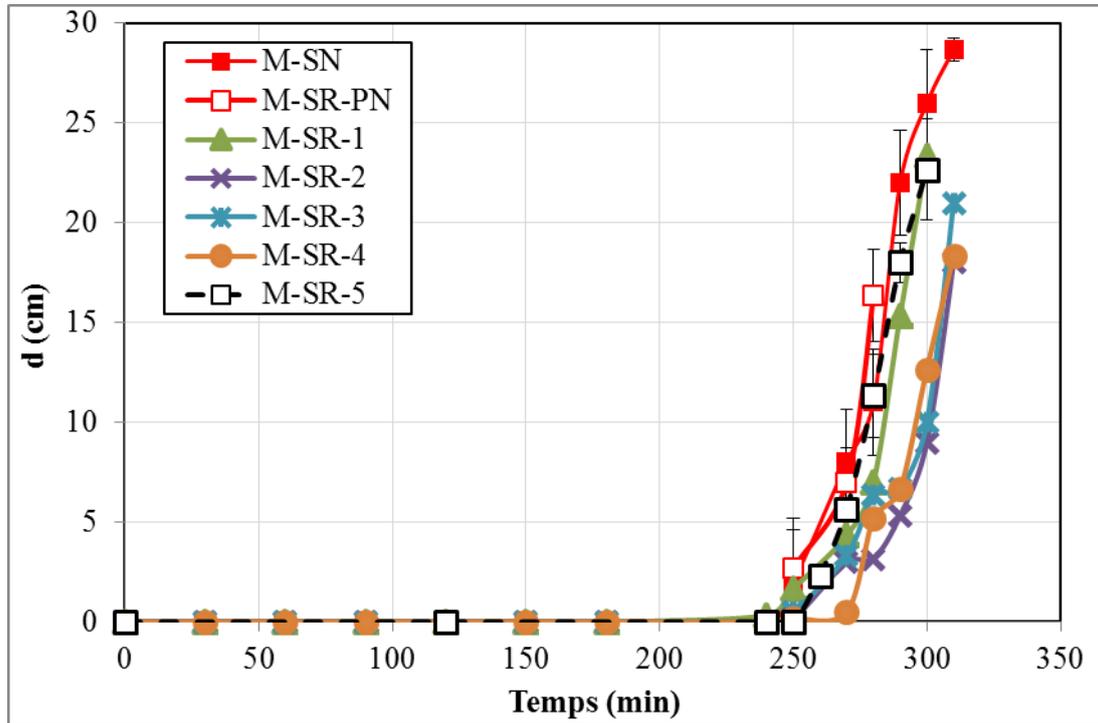


Figure 18. Temps de début et fin de prise.

Tableau 13. Temps de début et de fin de prise des différents mortiers.

Nom du mortier	M-SN	M-SR-PN	M-SR-1	M-SR-2	M-SR-3	M-SR-4	M-SR-5
Temps de début de prise (min)	252	250	257	265	265	270	260
Temps de fin de prise (min)	310	280	300	310	310	310	310
$\frac{Aff_{t=0} - Aff_{t=120}}{Aff_{t=0}} \times 100$	0.67	0.79	0.69	0.69	0.62	0.55	0.65

2.4 Consistance normalisée : [EN 196-3]

L'essai de consistance effectué avec l'appareil de Vicat a pour objectif de définir une consistance dite « normalisée ». La consistance est évaluée en mesurant l'enfoncement d'une sonde amovible de diamètre 10 mm sous l'effet d'une charge constante de masse totale égale à 300 grammes (**Figure 19**). La consistance est dite normalisée lorsque l'enfoncement s'arrête à une distance $d = 6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Si d n'atteint pas cette valeur il convient de refaire l'essai avec différentes valeurs de E/C jusqu'à l'obtention de $d = 6 \text{ mm} \pm 1$.

Dans cette étude la pâte est constituée de : 500g de liant (ciment + filler) et d'eau.

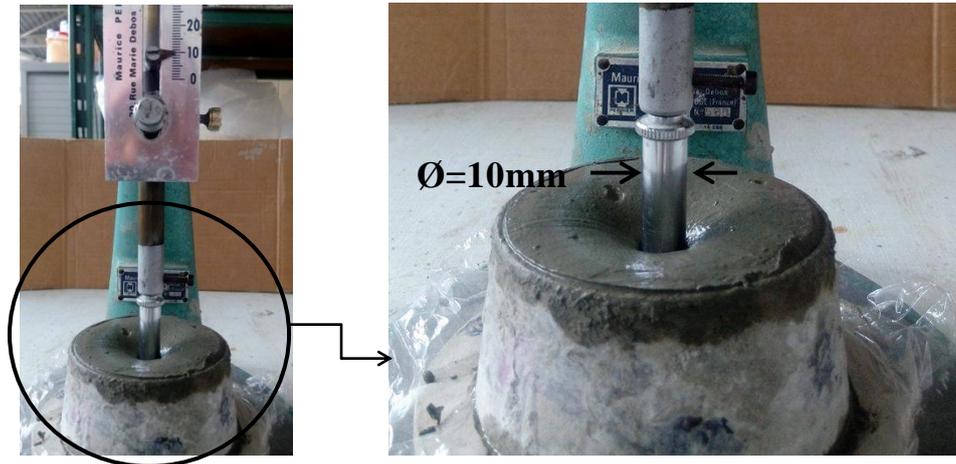


Figure 19. Essai de consistance de la pâte de ciment.

A partir de la courbe de $d=f(E/L)$ (Figure 20) on peut déduire la consistance normalisée de la pâte utilisée (de la formulation du projet national). On obtient une consistance normalisée pour un rapport $E/L= 0.284$.

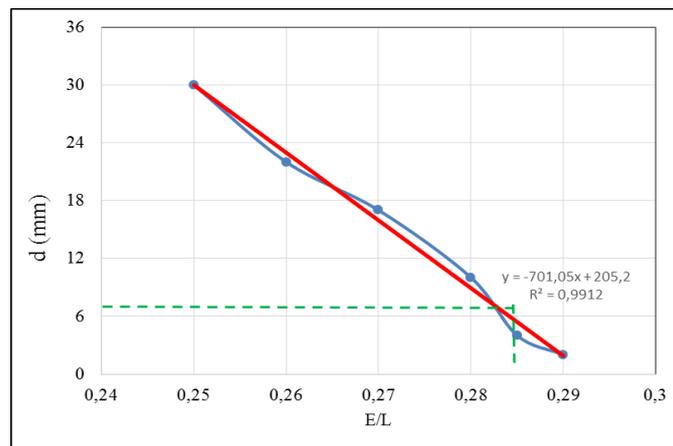


Figure 20. Consistance normalisée $d=f(E/L)$.

2.5 L'air occlus

Les mesures de l'air occlus ont été réalisées à l'aide d'un aéromètre de 1L (Figure 21). Les résultats reportés dans la Figure 22 correspondent à une moyenne des valeurs obtenues à partir de trois essais.



Figure 21. Aéromètre.

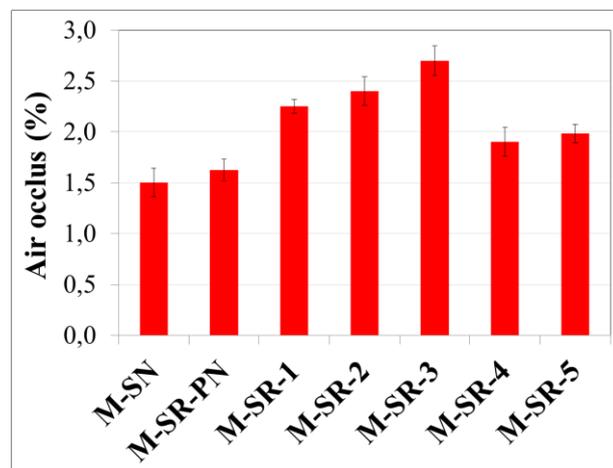


Figure 22. L'air occlus des différents mortiers.

Une augmentation significative de l'air occlus est observée pour les mortiers avec sables recyclés. Cette augmentation peut être due à la géométrie plus anguleuse des sables recyclés (Gomart, et al., 2013, August). L'augmentation la plus importante est enregistrée pour le mortier M-SR-3 et la moins élevée pour M-SR-PN. L'incorporation de 10% de sable recyclé engendre une variation relative de l'air occlus par rapport au mortier de référence telle que $-80 < \frac{A_{occ}^{M-SN} - A_{occ}^{M-SR-i}}{A_{occ}^{M-SN}} \times 100 < -8$. Le sable recyclé SR-3 n'est pas le sable présentant la porosité la plus élevée ni le pourcentage de fine de plus important.

Les mortiers sont tous élaborés avec le même dosage en ciment le même rapport E/C et ont la même affaissement cible. Aussi, une telle augmentation de l'air occlus des mortiers ne peut s'expliquer que par la géométrie des grains du sable certainement plus rugueux et anguleux.

3. Propriétés des mortiers à l'état durcissant

3.1 Rhéologie des mortiers

3.1.1 Protocole expérimental :

Les essais ont été effectués sur plusieurs séries d'échantillons en faisant varier le type de sable. Le rapport E/C étant de 0,62 et le rapport E/L de 0,52. Les mortiers ont été réalisés en présence du superplastifiant.

Les essais de rhéologie ont été effectués à l'aide d'un rhéomètre Anton Par en utilisant une géométrie double-hélice (ST39). Cette dernière, choisie dans le but d'éviter la décantation du sable durant l'essai, a montré une bonne efficacité d'homogénéisation par rapport aux autres géométries. Le rhéomètre ainsi que la géométrie utilisée, sont représentés dans la **Figure 23**.



Figure 23. Rhéomètre Anton Paar avec la géométrie double-hélice (ST39).

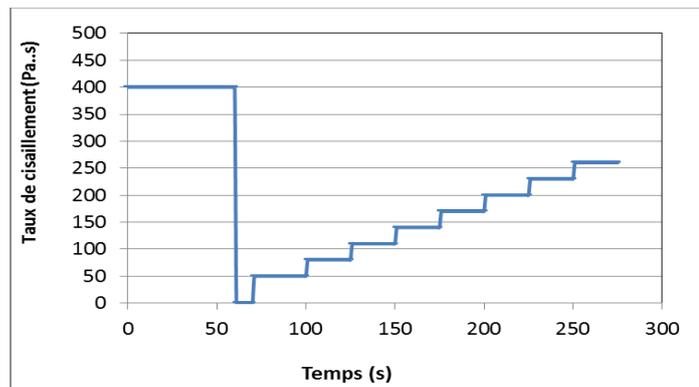


Figure 24. Protocole de cisaillement

Dans un premier temps, un cisaillement de 400 Pa.s a été appliqué, pendant 60 s, afin d'homogénéiser et déstructurer le mélange. Par la suite, nous avons appliqué une rampe croissante du taux de cisaillement, de 50 à 260 Pa.s, avec un palier de 25 s pour chaque niveau de chargement comme le montre la **Figure 24**. Un espacement de 15mm a été fixé, durant tout l'essai, pour éviter toute perturbation due au passage des grosses particules par cet entrefer. En raison de la répétabilité des résultats, deux essais ont été effectués pour chaque mortier.

Le protocole adopté a permis d'obtenir l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du temps. Les premiers essais réalisés sur chaque mortier sont illustrés dans la **Figure 25**. Nous avons pris la moyenne des cinq dernières valeurs de contraintes pour chaque palier dont l'écoulement est considéré stationnaire. Nous avons tracé par la suite les courbes d'écoulements correspondants à chaque mortier.

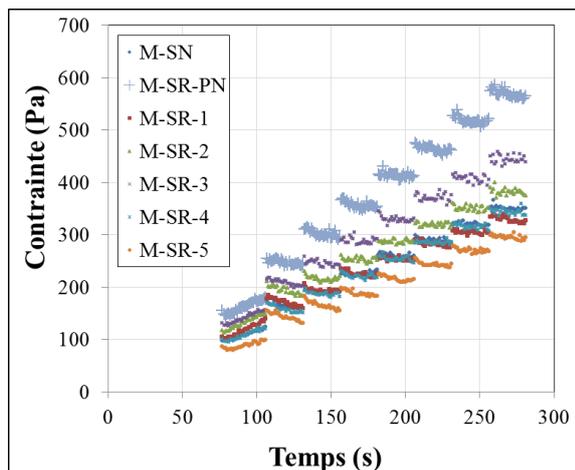


Figure 25. Evolution des contraintes de cisaillement en fonction du temps.

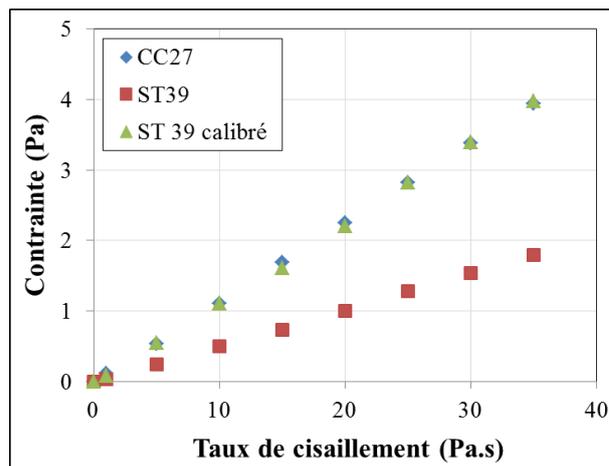


Figure 26. Courbes d'écoulement d'une huile newtonienne.

3.1.2 Calibrage :

L'utilisation de la géométrie double-hélice (ST39) nécessite un calibrage effectué en utilisant une géométrie couette, déjà calibrée, et une huile newtonienne. Cela, nous permet de déterminer un coefficient de correction égale à 2,2128. Les deux courbes d'écoulements de l'huile, obtenues par les deux géométries, ainsi que la courbe d'écoulement après le calibrage sont représentées dans la **Figure 26**.

Les courbes de contrainte de cisaillement- taux de cisaillement obtenues sont représentées dans la **Figure 27**. Il apparaît que tous les mortiers ont un comportement rhéologique de type Bingham : $\tau = \tau_o + \eta\dot{\gamma}$ où τ_o est le seuil de cisaillement et η la viscosité plastique. Leurs valeurs sont résumées dans les **Tableau 14** et **Tableau 15**.

D'un point de vue physique, τ_o est contrôlé par le nombre et la nature des contacts entre les grains et donc par la compacité du squelette granulaire alors que η est reliée à la circulation de la phase liquide dans les porosités inter-grains (De-Larrard, 2000). Ainsi τ_o représente la contribution de la phase solide et η celle de la phase liquide. Au-delà du seuil d'écoulement, τ_o , la contrainte appliquée est suffisante pour vaincre les frottements internes des grains solides et pour entraîner l'écoulement qui se traduit par des mouvements relatifs des grains solides et par la circulation de la phase liquide dans la porosité inter-grains.

Le mortier M-SR-5 est caractérisé par un seuil de cisaillement le plus faible alors que le mortier M-SR-2 par le seuil le plus élevé comparés au mortier de référence. Les variations relatives des propriétés rhéologiques sont significatives d'un mortier à un autre puisque $-36 < \frac{\tau_o^{M-SN} - \tau_o^{M-SR-i}}{\tau_o^{M-SN}} \times 100 < 33$ et $-84 < \frac{\eta^{M-SN} - \eta^{M-SR-i}}{\eta^{M-SN}} \times 100 < 18$.

Tableau 14. Seuil de cisaillement de différents mortiers.

Seuil de cisaillement (Pa)				
Mortiers	Essai 1	Essai 2	Moyenne	Ecart type
M-SN	160,1	211,2	185,6	26
M-SR-PN	206,7	190,1	198,4	8
M-SR 1	200,7	266,5	233,6	33
M-SR 2	213,6	292,1	252,7	39
M-SR 3	200,2	267,9	234,0	34
M-SR 4	149,5	210,6	179,9	30
M-SR 5	122,8	127,0	124,9	2

Tableau 15. Viscosité de différents mortiers.

Viscosité (Pas)				
Mortiers	Essai 1	Essai 2	Moyenne	Ecart type
M-SN	2,374	2,182	2,278	0,10
M-SR-PN	4,057	4,309	4,183	0,13
M-SR-1	2,037	1,701	1,869	0,17
M-SR-2	2,441	2,289	2,365	0,08
M-SR-3	3,052	2,941	2,996	0,06
M-SR-4	2,377	2,048	2,212	0,16
M-SR-5	2,039	1,944	1,991	0,05

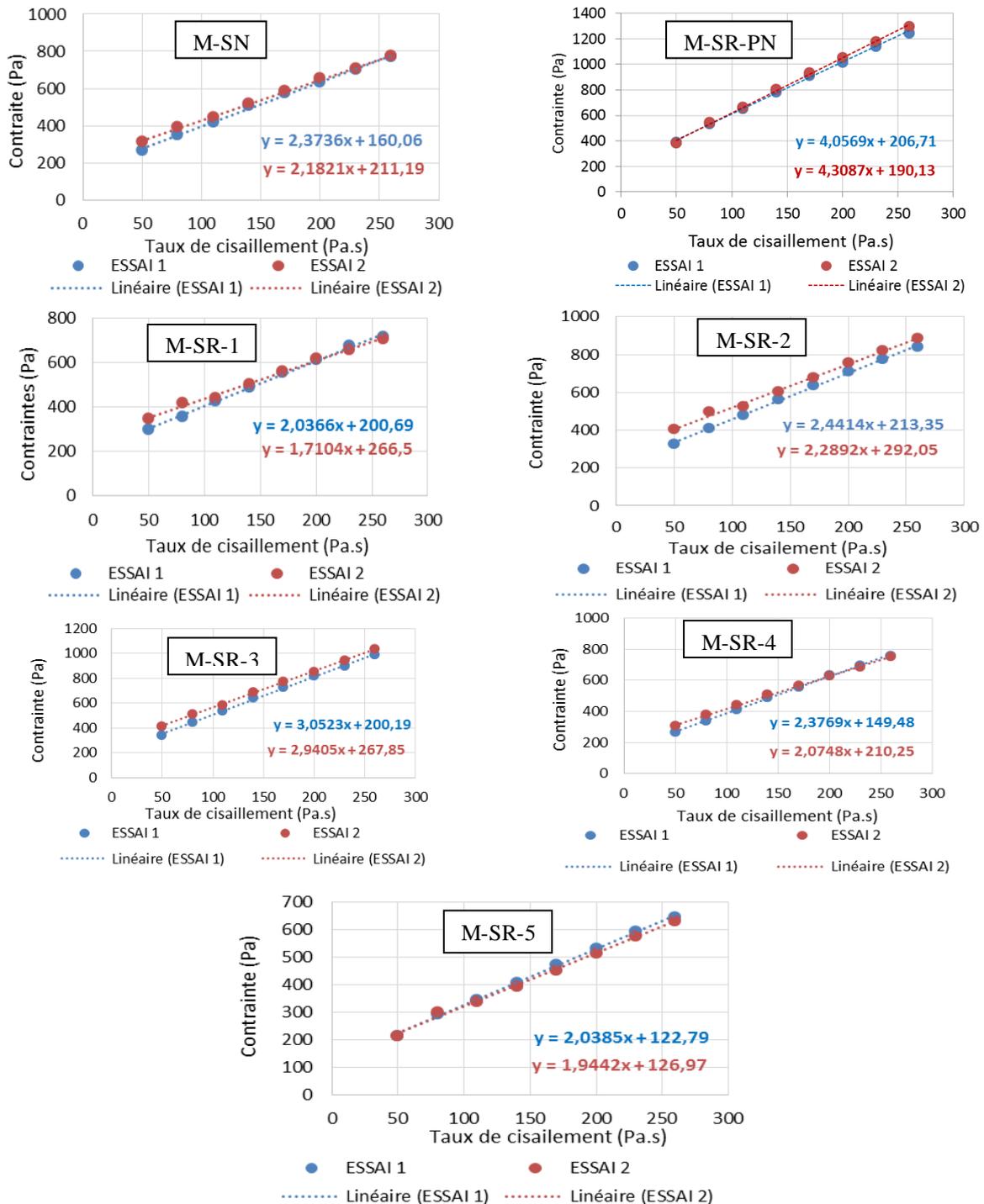


Figure 27. Courbures d'écoulement de différents mortiers.

3.2 Chaleur d'hydratation et degré d'hydratation

La chaleur d'hydratation Q , exprimée en joules par gramme de ciment, à un instant t écoulé, est donné par l'équation suivante :

$$Q = \frac{c}{m_c} \theta + \frac{1}{m_c} \int_0^t \alpha \theta_i dt$$

Où : α est le coefficient de déperdition. Cette équation peut être simplifiée pour s'écrire comme il suit :

$$Q = \frac{c}{m_c} \theta + \frac{1}{m_c} \sum_{i=1}^{i=n} \overline{\alpha}_i \overline{\theta}_i \Delta t_i$$

→ Δt_i est le temps écoulé entre la mesure de température à l'instant t_{i-1} et la mesure suivante à l'instant t

→ $\overline{\alpha}_i = a + b \overline{\theta}_i$ est le coefficient moyen de déperdition thermique totale du calorimètre au cours de l'intervalle Δt_i

→ $\overline{\theta}_i = \frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2}$ est la différence de la température entre le calorimètre d'essai et le calorimètre de référence entre les instants t_i et t_{i+1}

→ c est la capacité thermique totale du calorimètre calculée comme il suit :

$$c = 0,8(m_c - m_s) + 3,8 m_w + 0,5 m_b + \mu$$

Le degré d'hydratation est donné par l'équation :

$$\alpha(t) = \frac{Q(t)}{Q_\infty}$$

La détermination de la chaleur d'hydratations et du degré d'hydratation ont été effectués par calorimétrie semi-adiabatique, conformément à la norme NF EN 196-9.

Le banc de mesure de la chaleur d'hydratation comporte trois calorimètres semi-adiabatiques (**Figure 28**) dont les thermocouples sont reliés à une chaîne de mesure multi-voies (Société PERRIER LABOTEST) à microprocesseurs permettant de mémoriser les températures au cours d'essais. Tous les essais de mesure de la chaleur d'hydratation ont été réalisés dans une salle climatique à une température constante de 20°C.

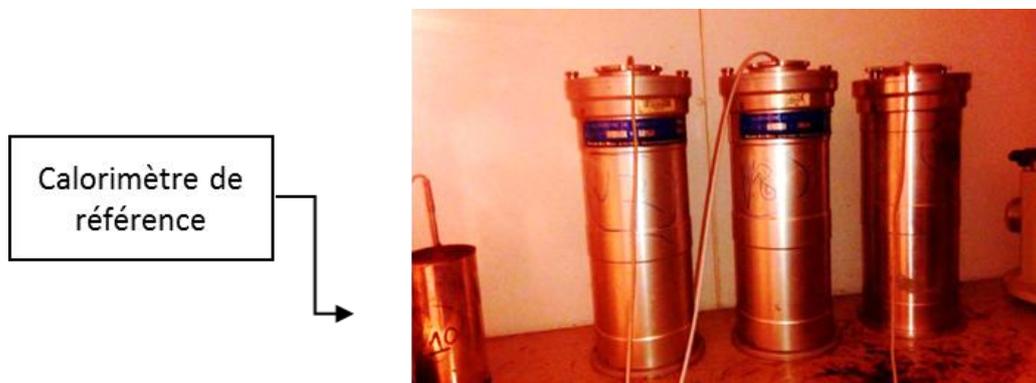


Figure 28. Calorimètres semi-adiabatique et calorimètre de référence.

L'évolution de la température au cours du processus d'hydratations des différents mortiers est décrite par la **Figure 29**. Les températures maximales enregistrées sont autour de 50°C atteintes au bout de 18 heures pour les différents mortiers.

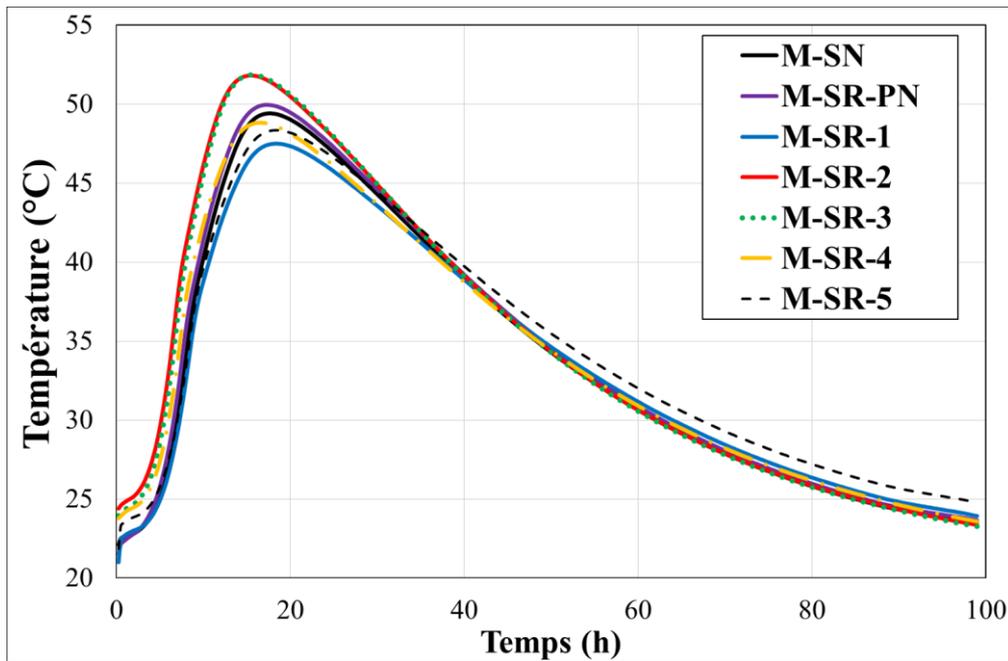


Figure 29. Evolution de la température au cours du temps.

Dans le **Tableau 16** sont présentés les différents paramètres de calcul permettant de déterminer la chaleur d'hydratation ainsi que le degré d'hydratation. Les résultats obtenus sont illustrés dans les **Figure 30** et **Figure 31**. Nous remarquons que l'incorporation des différents types de sable recyclés à 10% dans la composition des MBE n'a pas une influence significative sur la chaleur et le degré d'hydratation.

Tableau 16. Paramètres de calcul

Masse du ciment (gr)	m_c	299	g
Masse du sable (gr)	m_s	806	g
Masse de l'eau (gr)	m_w	185	g
Masse du boîtier à mortier (gr)	m_b	128,1	g
Capacité thermique du calorimètre vide	μ	428	J. K ⁻¹
Constante d'étalonnage du calorimètre	a	0,216	
Constante d'étalonnage du calorimètre	b	55	
Capacité thermique totale du calorimètre	c	2079,05	J. K ⁻¹

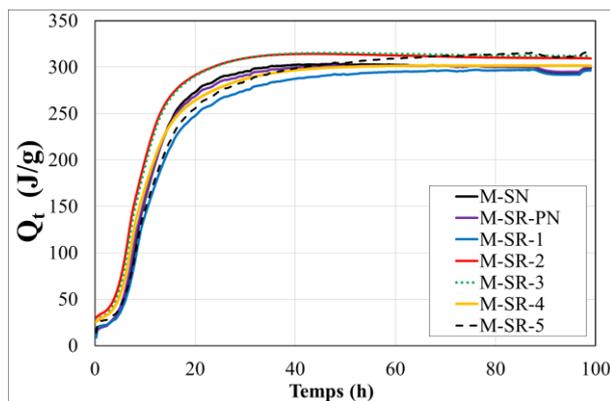


Figure 30. Chaleur d'hydratation en fonction du temps.

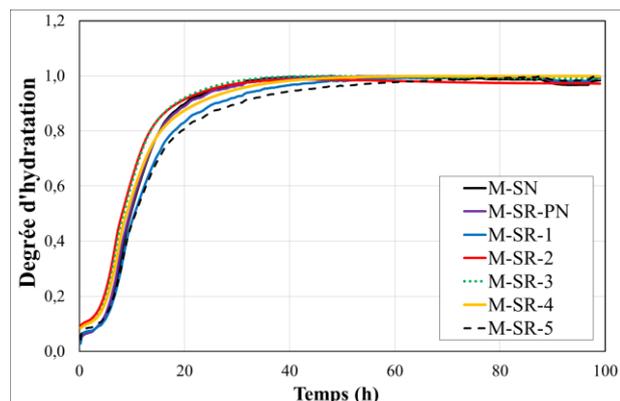


Figure 31. Degré d'hydratation en fonction du temps.

Le **Tableau 17** récapitule les valeurs des températures et de chaleurs d'hydratation maximales obtenues pour les différents MBE.

Tableau 17. *Températures et des chaleurs maximales d'hydratation.*

	T_{\max} (°C)	Q_{\max} (J/g)
M-SN	49	304
M-SR-PN	50	302
M-SR-1	48	297
M-SR-2	52	314
M-SR-3	52	315
M-SR-4	49	302
M-SR-5	48	316

On remarque que l'incorporation de 10% de sable recyclé dans les mortiers n'affecte pas de façon significative les réactions d'hydratation puisque $-4 \leq \frac{Q_{\max}^{M-SN} - Q_{\max}^{M-SR-i}}{Q_{\max}^{M-SN}} \times 100 \leq 2$. Le mortier M-SR-5 développe moins d'hydrates alors que le mortier M-SR-2 en développe plus comparés au mortier de référence.

4. Propriétés des mortiers à l'état durci

Toutes les éprouvettes (4x4x16) fabriquées ont été démoulées après 24h puis posées sur des grilles et immergées dans l'eau à une température de 20°C jusqu'à l'échéance des essais.



Figure 34. *Conservation des éprouvettes dans des bacs remplis d'eau.*

4.1 Propriétés physiques des mortiers

4.1.1 Masse volumique et porosité accessible à l'eau

La méthode permettant la mesure de la porosité accessible à l'eau et de la masse volumique apparente ainsi que du coefficient d'absorption est la méthode dite sous vide, dont le mode opératoire est décrit dans la norme française NF P 18-459.

Les mesures ont été effectuées sur trois échantillons de chaque type de mortier. Les échantillons ont été placés sous vide pendant 4 heures à une pression égale à 25 mbar puis ils ont été immergés dans l'eau à cette pression pendant 44 heures (**Figure 32**). Au bout de 48 heures, la masse est mesurée par pesée hydrostatique puis la masse sèche est déterminée après un séchage à une température de 80 ± 5 °C pendant une période permettant l'obtention d'une masse constante (différence de 0,05% entre deux pesées successives réalisées à 24h d'écart). Le dispositif utilisé pour la mesure de la porosité sous vide est schématisé dans la **Figure 32**.



Figure 32. Schéma illustratif du système de mesure de la porosité sous vide.

Les propriétés physiques sont calculées à l'aide des formules suivantes :

→ Pour la masse volumique apparente, ρ_{APP} , exprimée en kg/m^3 :
$$\rho_{App} = \frac{M_{Sec}}{M_{Air} - M_{Eau}} \times \rho_{eau}$$

→ Pour le coefficient d'absorption d'eau WA_{44h} (%) :
$$WA_{44h} (\%) = \frac{M_{Air} - M_{Sec}}{M_{Sec}} \times 100$$

→ La porosité accessible à l'eau sous vide : n_V^B (%) :
$$n_V^B (\%) = \frac{M_{Air} - M_{Sec}}{M_{Sec} - M_{Eau}} \times 100$$

Où M_{Eau} est la masse de l'éprouvette en kg plongée dans l'eau ; M_{Air} est la masse dans l'air de l'échantillon saturé en kg et M_{Sec} est la masse de l'échantillon séché à $80 \pm 5^\circ \text{C}$ en kg

Les résultats expérimentaux de la porosité des mortiers ont été illustrés par la figure suivante (**Figure 33**). Nous remarquons que la substitution de 10% du sable naturel par le sable recyclé provoque l'augmentation de la porosité accessible à l'eau sous vide pour tous les mortiers comparée à celle du mortier de référence M-SN. La

variation relative des porosités est toutefois faible $-6 < \frac{n^{M-SN} - n^{M-SR-i}}{n^{M-SN}} \times 100 < 0$.

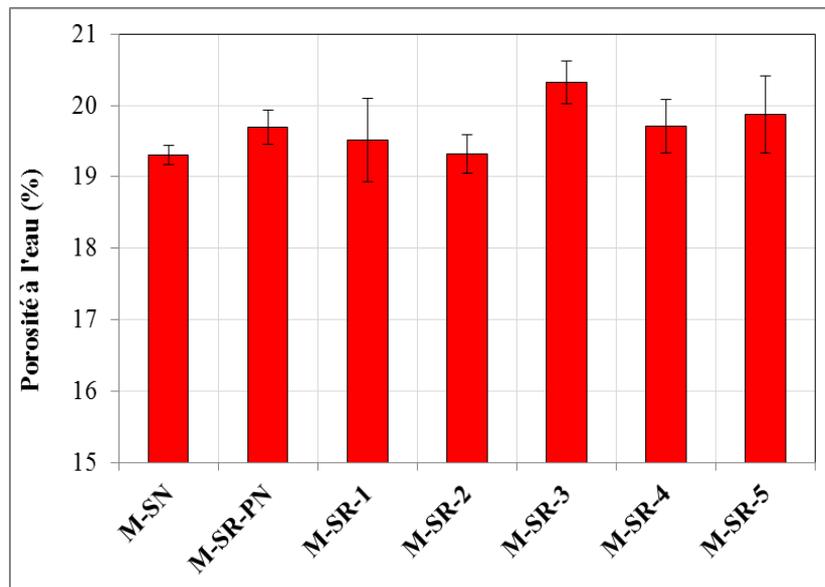


Figure 33. porosité accessible à l'eau.

Par ailleurs, une légère diminution de la masse volumique des mortiers pour lesquels 10% de sables recyclés ont été incorporés. Cette baisse n'est pas significative puisque $-1 < \frac{\rho_{rd}^{M-SN} - \rho_{rd}^{M-SR-i}}{\rho_{rd}^{M-SN}} \times 100 < 1$. Les résultats obtenus sont présentés (**Figure 34**).

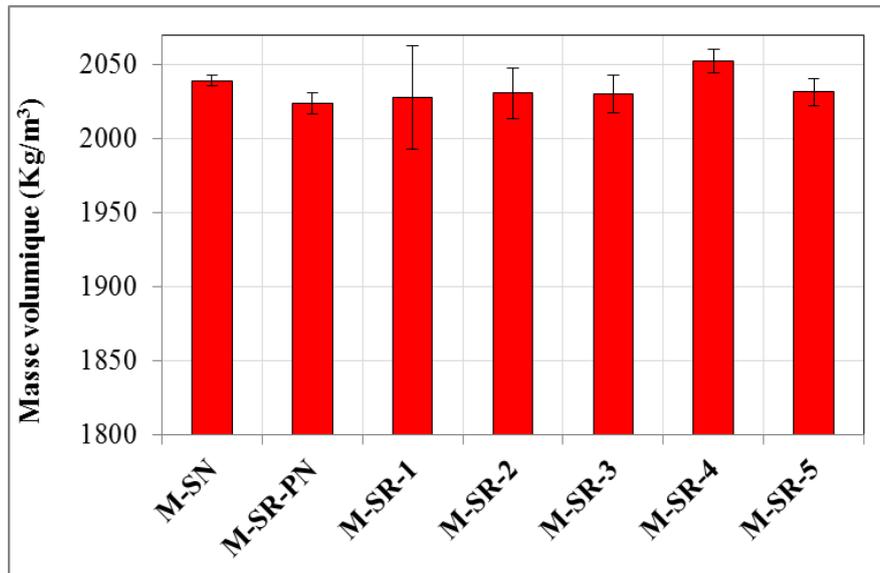


Figure 34. Masse volumique des mortiers.

4.1.2 Cinétique de séchage :

L'essai a été effectué sur 3 échantillons de chaque type de mortier. Les échantillons (préalablement saturés) ont été mis dans l'étuve à 80 °C jusqu'à atteindre une masse constante. Au début de l'essai des pesés ont été réalisés à des intervalles de temps de 1h pour suivre la perte de masse. Après les premières 24h une mesure par jour a été effectuée.

La perte de masse est calculée par rapport à la masse initiale saturée selon l'équation suivante :

$$\text{Perte de masse}(\%) = \frac{M_{\text{saturée}} - M_t}{M_{\text{saturée}}} \times 100$$

Les résultats sont illustrés par la **Figure 35**. Nous remarquons que toutes les courbes présentent la même allure. L'effet de l'incorporation du sable recyclé sur les pertes de masse lors du séchage est peu significative. Les échantillons atteignent l'état sec après environ 10 jours.

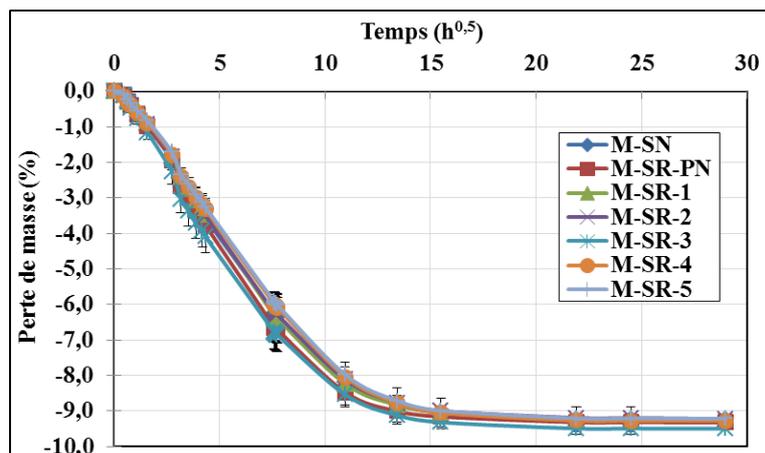


Figure 35. La perte de masse en fonction du temps.

4.1.3 Retrait

La mesure du retrait total des différents mortiers a été effectuée selon la norme NFP 15-433. Les mesures ont été réalisées après 24h de confection des mortiers. Cette mesure du retrait total est effectuée sur 3 éprouvettes pour chaque type de mortier (la référence est prise après le démoulage). Le schéma de principe et l'appareillage sont décrits par la figure 36.

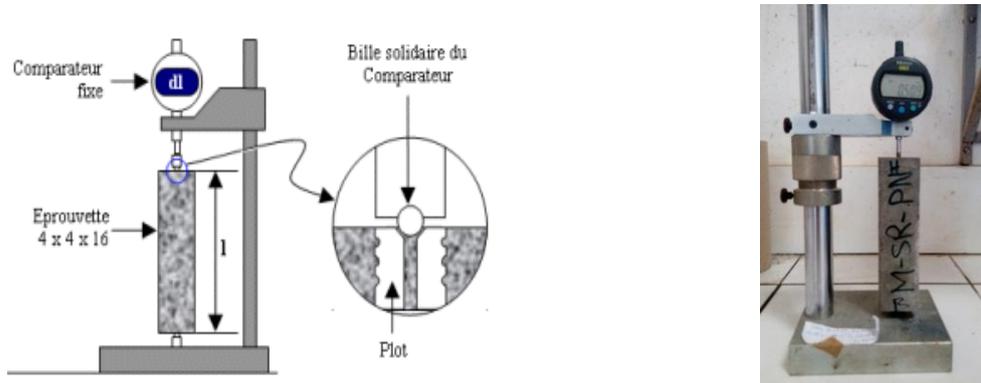


Figure 36. Dispositif expérimental pour la mesure du retrait total.

Les résultats expérimentaux du retrait total sont illustrés dans la Figure 37. Il en ressort que tous les mortiers sont sujets au retrait. Au jeune âge le mortier avec SR4 est sujet à un fort retrait comparé aux autres mortiers. A 28 jours certains mortiers avec sables recyclés (SR1, SR2 et SR3) ont un retrait plus faible que le mortier avec sable naturel.

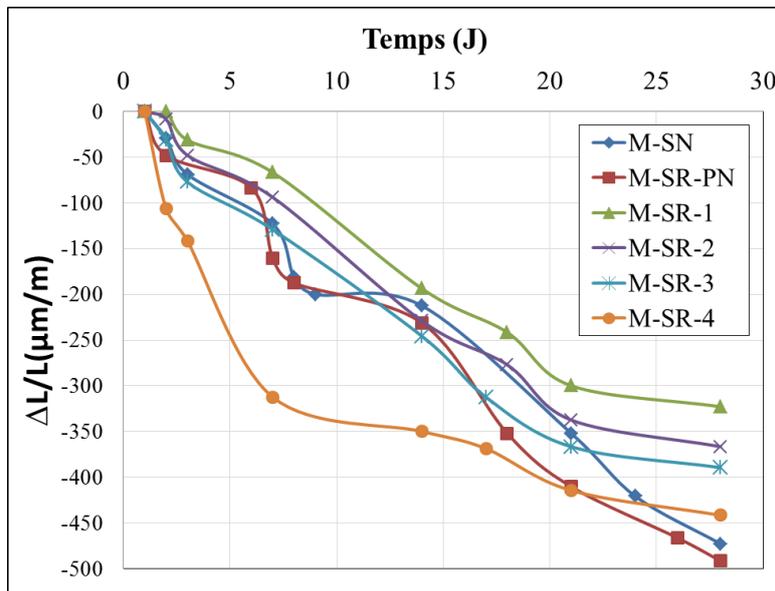


Figure 37. Evolution du retrait total.

4.1.4 Conductivité thermique

Le dispositif est constitué d'une sonde à placer entre deux échantillons du matériau à caractériser (Figure 38). Le principe de la sonde est de produire localement un échauffement faible du matériau (quelques degrés au-dessus de la température ambiante) et de mesurer cette élévation de température au cours du temps (durée de quelques minutes). Par un traitement mathématique de ce signal, l'identification de la conductivité thermique est réalisée. La durée de l'essai est de 120 secondes avec une puissance $W=0,49$ watt.

Les résultats obtenus sont illustrés par la Figure 39.



Figure 38. Conductimètre.

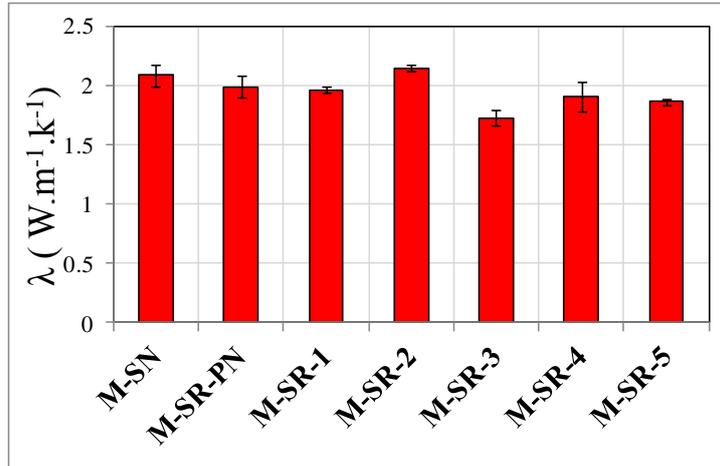


Figure 39. Conductivités thermiques des différents mortiers.

Il apparaît que le mortier M-SR-3 a la conductivité thermique la plus faible avec M-SR-4 et M-SR-5 comparée à celle du M-SN. A noter qu'une augmentation de 5% de la porosité (entre M-SN et M-SR-3) engendre une baisse de la conductivité thermique de 17%. Toutefois ces variations restent peu significatives.

4.2 Propriétés mécaniques des mortiers

4.2.1 Module d'élasticité dynamique

Le module d'élasticité dynamique, E_D , a été mesuré en utilisant un appareil de type E-Meter MK II (Figure 40). Le principe utilisé dans l'électromètre Mk II est basée sur la détermination de la fréquence de résonance fondamentale de la vibration d'un échantillon générée par un impact et détectée par un accéléromètre. Le spectre de fréquence est calculé et affiché par le compteur.



Figure 40. Dispositif de mesure du module d'élasticité dynamique.

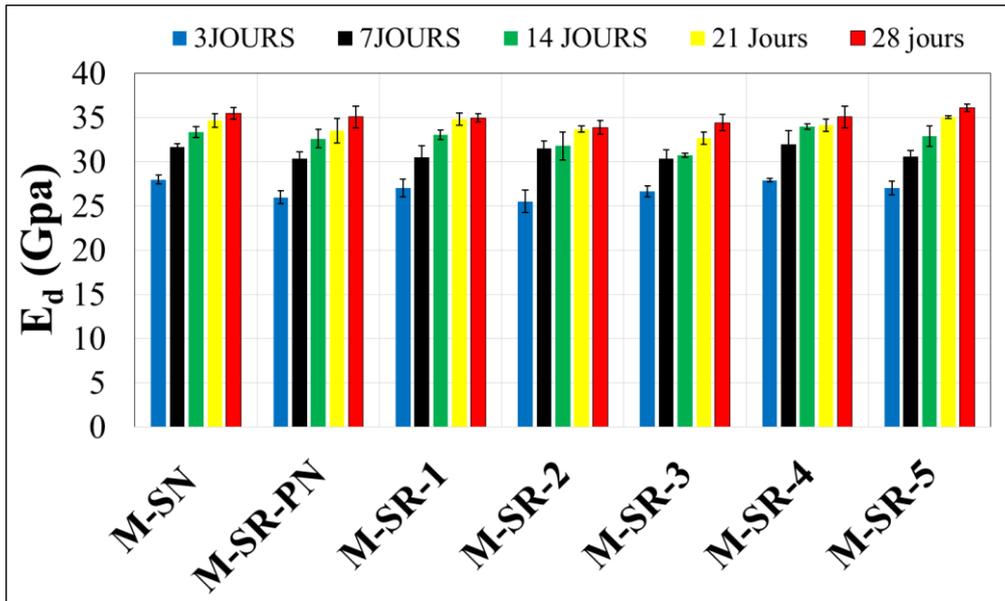


Figure 41. Module d'élasticité des différents mortiers étudiés.

Les résultats sont présentés dans la **Figure 41**. Nous remarquons que la substitution de 10% du sable naturel par les différents sables recyclés entraîne la diminution du module d'élasticité dynamique à 28 jours mais les résultats restent comparables et les variations relatives par rapport au mortier de référence n'excèdent pas 5% ($-2 < \frac{E_d^{M-SN} - E_d^{M-SR-i}}{E_d^{M-SN}} \times 100 < 4.5$). Le mortier M-SR-2 présente le plus faible module alors que pour le mortier M-SR-5 la résistance aux déformations élastique se trouve améliorée.

4.2.2 Résistance à la flexion : [NF EN 196-1]

Les essais de flexion 3 points ont été réalisés à l'aide d'une presse INSTRON de capacité de 100 KN en imposant une vitesse de mise en charge de 50 ± 10 N/s (**Figure 42**).



Figure 42. Essais de flexion 3 points.

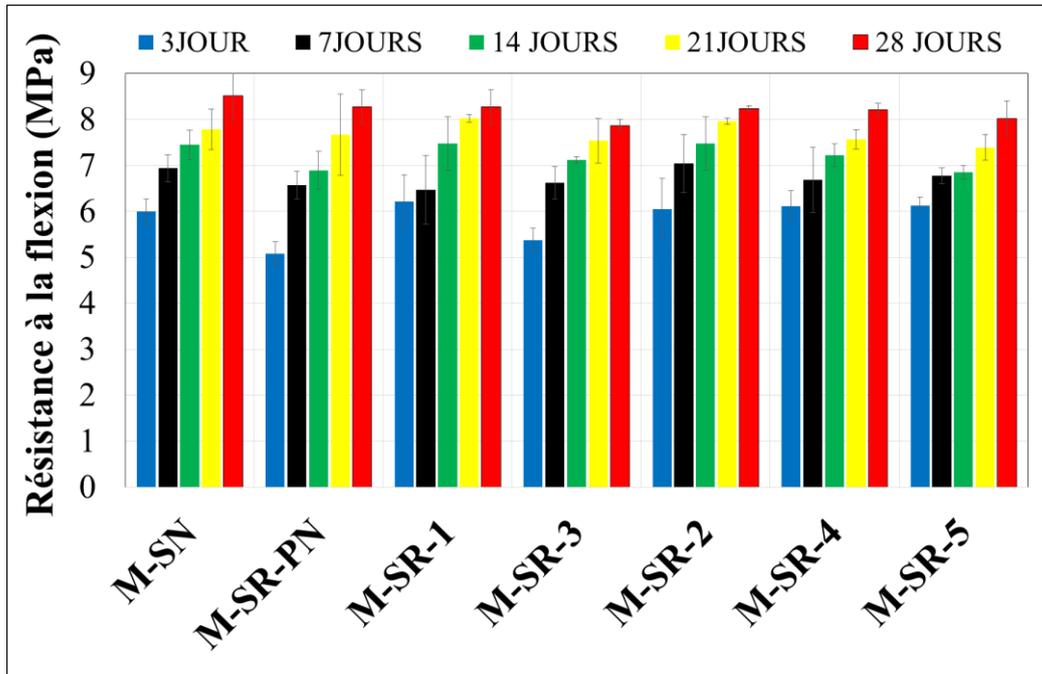


Figure 43. Comparaison de la résistance à la flexion des différents mortiers

Les résultats présentés dans la **Figure 43** montrent que la substitution du sable naturel par 10% de sable recyclé provoque la diminution de la résistance à la flexion à 28 jours. La plus faible résistance est obtenue pour le

mortier M-SR-2. Néanmoins cette diminution reste non significative puisque $3 \leq \frac{R_{f_{28j}}^{M-SN} - R_{f_{28j}}^{M-SR-i}}{R_{f_{28j}}^{M-SN}} \times 100 \leq 8$.

Au jeune âge ($t \leq 3 \text{ jours}$), le mortier M-SR-PN accuse la perte de résistance la plus importante.

4.2.3 Résistance à la compression : [NF EN 196-1]

Selon la norme EN 196-1, l'essai de la résistance à la compression est effectué sur les demi-prismes obtenus après l'essai de flexion. Dans le cadre de ce travail ils ont été conduits à l'aide d'une presse SCHENCK de capacité de 3000 kN à asservissement hydraulique en imposant une vitesse de chargement de $2400 \pm 200 \text{ N/s}$ (**Figure 44**).



Figure 44. Presse de compression.

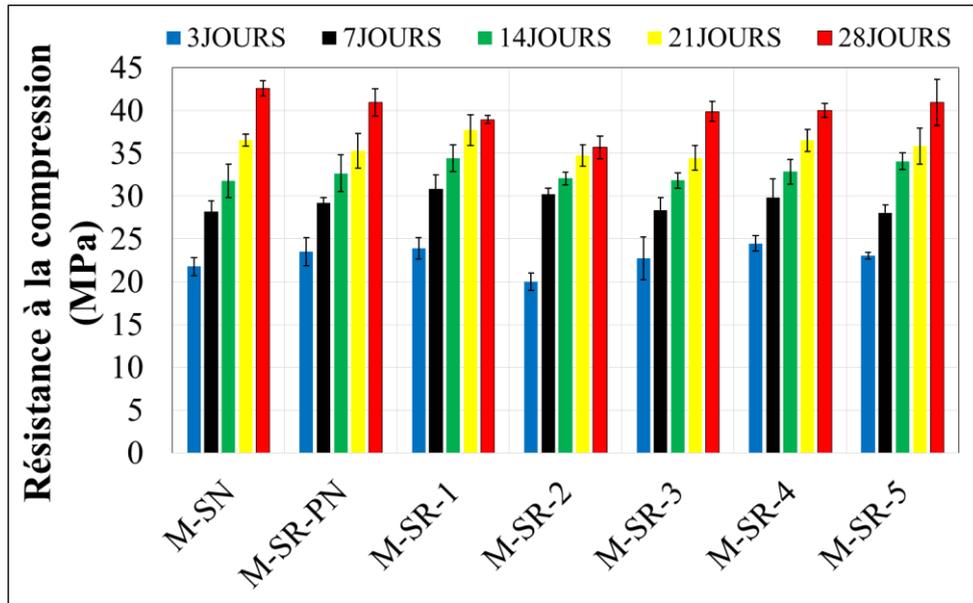


Figure 45. Comparaison de la résistance à la compression des différents mortiers.

Les résultats illustrés par la **Figure 45** montrent que la substitution de 10% du sable naturel par les sables recyclés entraîne la diminution des résistances mécaniques à la compression à 28 jours mais ces résistances

restent comparables et les variations faibles : $4 \leq \frac{R_{c_{28j}}^{M-SN} - R_{c_{28j}}^{M-SR-i}}{R_{c_{28j}}^{M-SN}} \times 100 \leq 16$. La résistance à la compression la

plus faible est obtenue pour les mortiers M-SR-2 qui accuse une perte de 16%.

Discussion

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que l'introduction de 10% de sable recyclé dans le mortier quelque soit sa nature et provenance n'affecte pas ses propriétés mécaniques à 28 jours (**Figure 46**).

Ce sont essentiellement les propriétés à l'état frais (**Figure 47**) et durcissant (**Figure 48**) qui sont le plus affectées.

Pour estimer l'effet de l'incorporation nous avons calculé les variations relatives de chaque propriétés, P , telle que $V = \frac{P^{M-SN} - P^{M-SR-i}}{P^{M-SN}} \times 100$. Des valeurs négatives indiquent une augmentation de la propriété considérée alors que les valeurs positives une diminution.

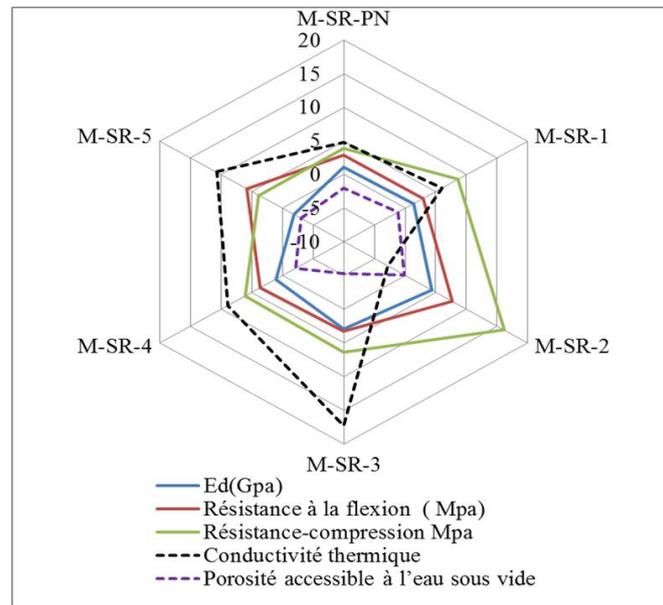


Figure 46. Propriétés à l'état durci à 28 jours.

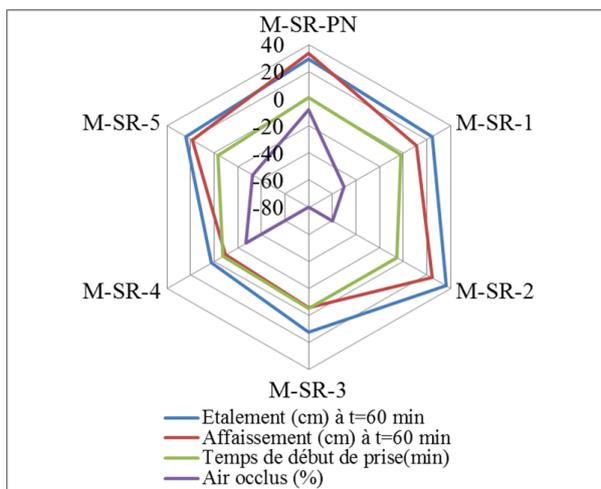


Figure 47. Propriétés à l'état frais.

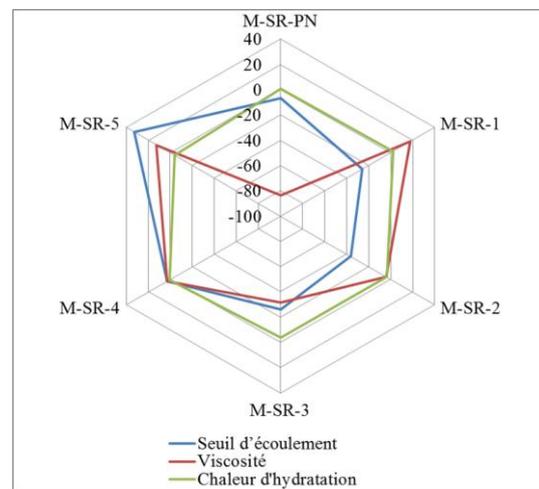
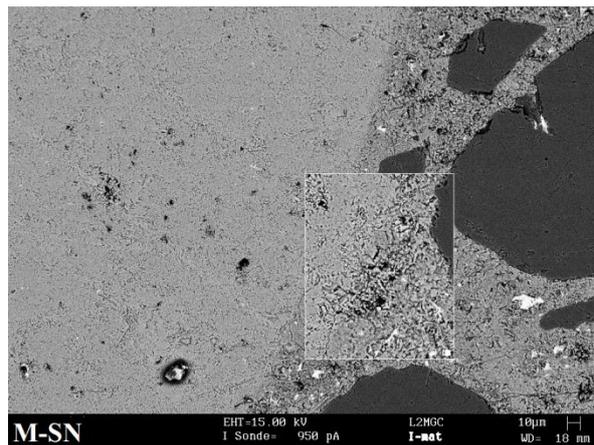
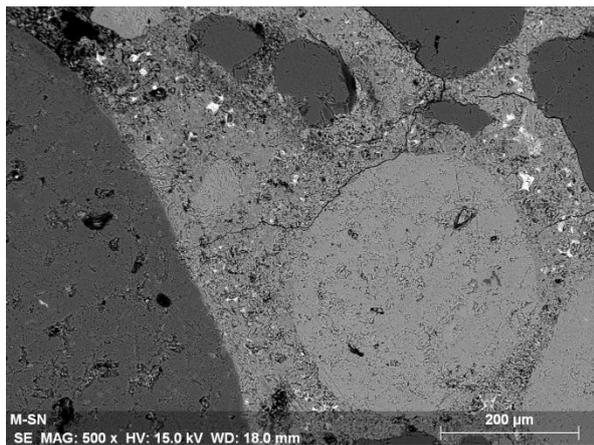


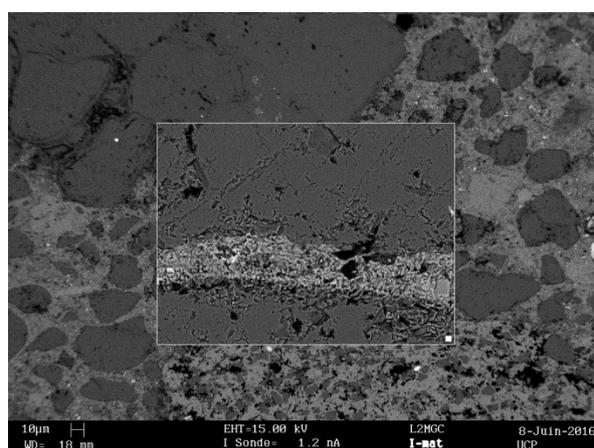
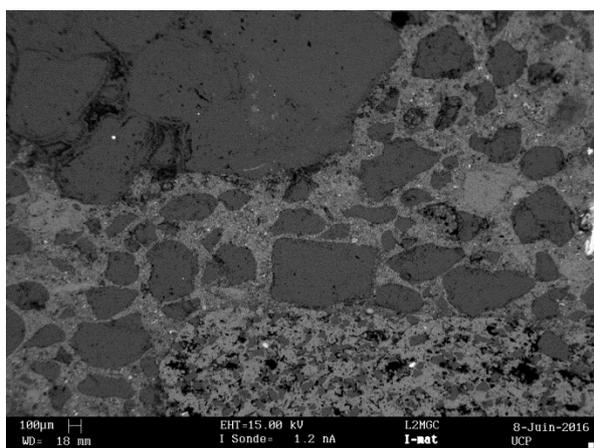
Figure 48. Propriétés à l'état durcissant.

Le choix du sable s'est porté sur le sable SR4 pour la fabrication des bétons car il existe en plus grandes proportions (**Figure 46**, **Figure 47** et **Figure 48**).

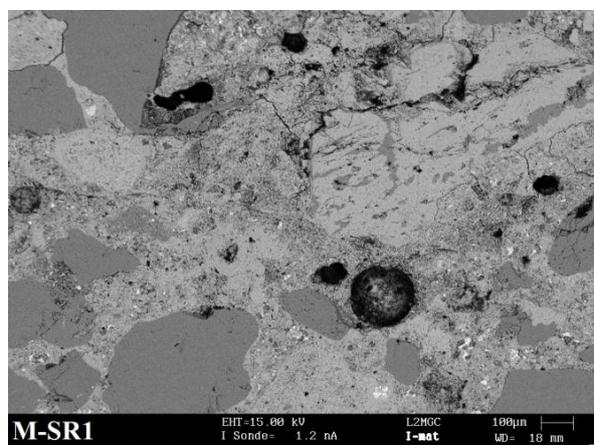
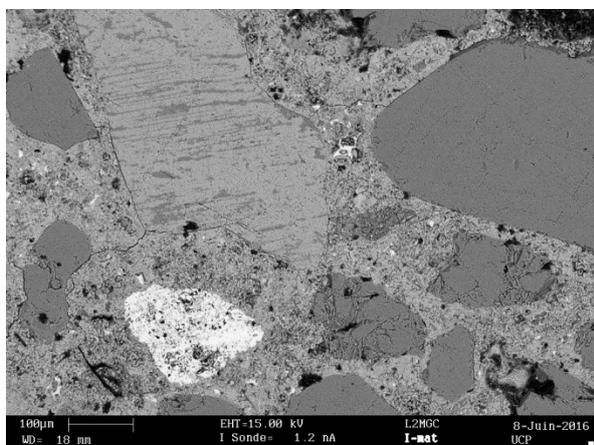
Les observations au MEB conduites sur les différents mortiers ont montré que l'interface entre le sable recyclé et la matrice cimentaire est de bonne qualité (**Figure 49**).



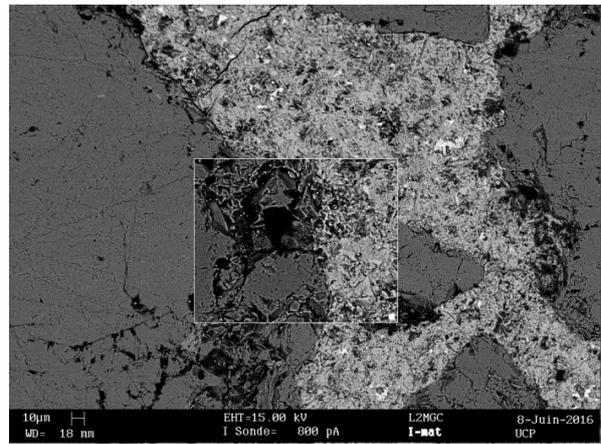
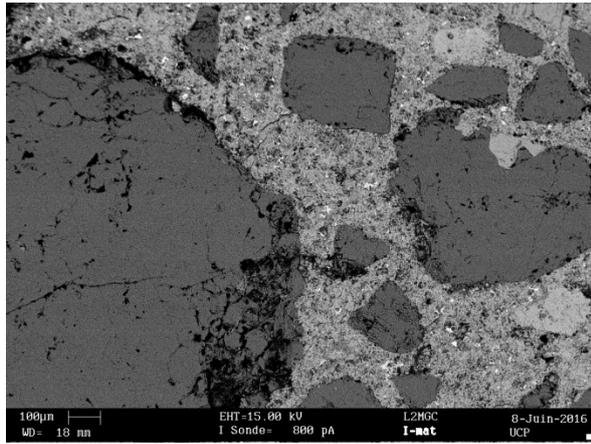
M-SN



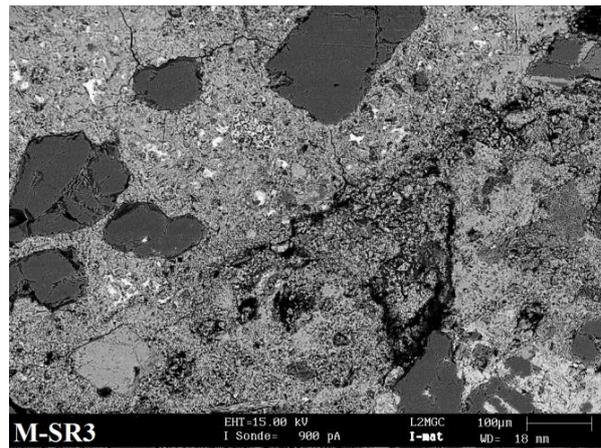
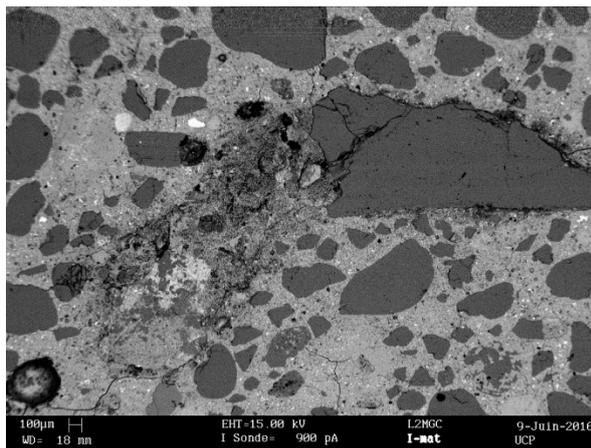
M-SR-PN



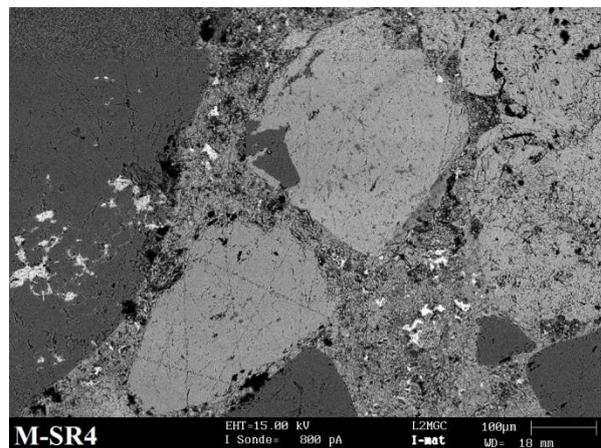
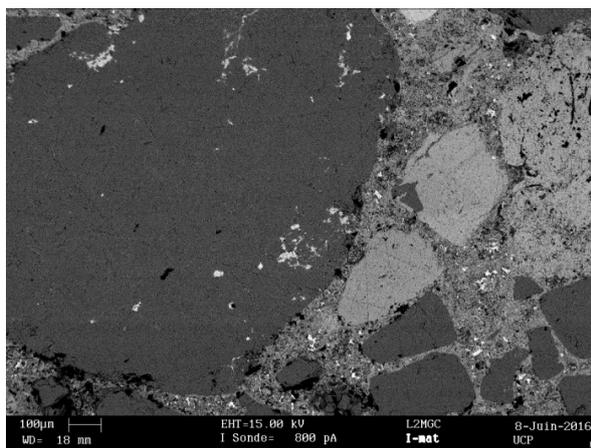
M-SR-1



M-SR-2



M-SR-3



M-SR-4

Figure 49. Images de MEB.

Chapitre 4 : Formulation et propriétés des

Bétons à l'état frais et à l'état durci

1. Formulation des bétons

Les compositions des différents bétons de cette étude sont élaborées en substituant les granulats naturels par des granulats recyclés. (**Tableau 18** et **Tableau 19**). Une classe de résistance est considérée C35/45. La désignation des 5 formules (C35/45 **xR-yR-W**) fait référence à la classe de résistance suivie du taux de substitution volumique du sable naturel par le sable recyclé (**x**%) et des gravillons naturels par les gravillons recyclés (**y**%) et également le **W** présente la plateforme de production de gravillons recyclés.

Le taux de substitution volumique est calculé selon la formule suivante : $r_v = \frac{V_{sable}^{recyclé} + V_{gravillons}^{recyclés}}{V_{granulats}^{recyclé} + V_{granulats}^{naturels}}$ où les volumes

sont en m^3/m^3 de béton.

Tableau 18. Compositions des différentes formulations par volume (m^3/m^3).

Constituant (m^3/m^3)	C35/45	C35/45	C35/45	C35/45	C35/45
	OR-OR	10SR-4 10GR-1 (DLB)	10SR-4 10GR-2 (Neuilly)	10SR-4 10GR-3 (Leonhart)	10SR-4 10GR-4 (Ancycla)
Eau totale	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182
Eau d'ajout (GR saturée)	0,182	0,178	0,172	0,174	0,172
Cem II/A-L 42,5 N	0,095	0,095	0,095	0,095	0,095
Filler Calcaire	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
SN	0,293	0,264	0,264	0,264	0,264
SR	0	0,029	0,029	0,029	0,029
GN1	0,096	0,086	0,086	0,086	0,086
GR1	0	0,010	0,010	0,010	0,010
GN2	0,293	0,264	0,264	0,264	0,264
GR2	0	0,029	0,029	0,029	0,029
SP	0,0021	0,002	0,002	0,002	0,002
Air occlus (%)	0,0177	0,0177	0,018	0,018	0,018
Eau efficace	0,175	0,175	0,175	0,175	0,175
VOLUME (m^3/m^3)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
r_v (%)	0	10	10	10	10

Les formulations en masse ont été récapitulées par masse dans le **Tableau 19**.

Tableau 19. Compositions des différentes formulations et caractéristiques physiques à l'état frais.

Constituant (kg/m ³)	C35/45	C35/45	C35/45	C35/45	C35/45
	0R-0R	10SR-4 10GR-1 (DLB)	10SR-4 10GR-2 (Neuilly)	10SR-4 10GR-3 (Leonhart)	10SR-4 10GR-4 (Ancycla)
Eau totale	182	182	182	182	182
Eau d'aj (GR saturée)	182	178	172	174	172
Cem II/A-L 42,5 N	294	293	293	293	293
Filler Calcaire	57	57	57	57	57
SN	757	680	680	680	680
SR	0	65	65	65	65
GN1	259	233	233	233	233
GR1	0	22	24	27	24
GN2	795	714	714	714	714
GR2	0	66	73	80	74
SP	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
Air occlus	1,8	2,0	2,0	2,0	2,0
Eau efficace	175	175	175	175	175
$\rho_{theo.}$ (Kg/m³)	2347	2316	2325	2335	2326
E_{totale}/C	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
$E_{totale}/Liant$	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
Affaissement (cm)	19	19	18	19	19

2. Propriétés du béton à l'état frais

2.1 Air occlus

La teneur en air occlus des bétons à l'état frais a été déterminée selon la norme NF EN 12350-7 à l'aide d'un aéromètre cylindrique d'une capacité de 8 litres (diamètre de 215 mm et hauteur de 560 mm). L'aéromètre est constitué d'un récipient étanche en aluminium et d'un couvercle rigide muni d'un manomètre gradué. L'ensemble couvercle/cuve est fixé par un mécanisme étanche et l'ensemble est rempli d'eau (**Figure 50**). Une pression est ensuite appliquée sur l'échantillon en utilisant une pompe à air installée en partie supérieure du couvercle. Cette pression provoque une baisse du niveau d'eau proportionnelle à la diminution des vides d'air. L'appareil est calibré de façon à donner la teneur en air totale en % par lecture directe du niveau d'eau sur l'échelle graduée. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure ci-dessous.

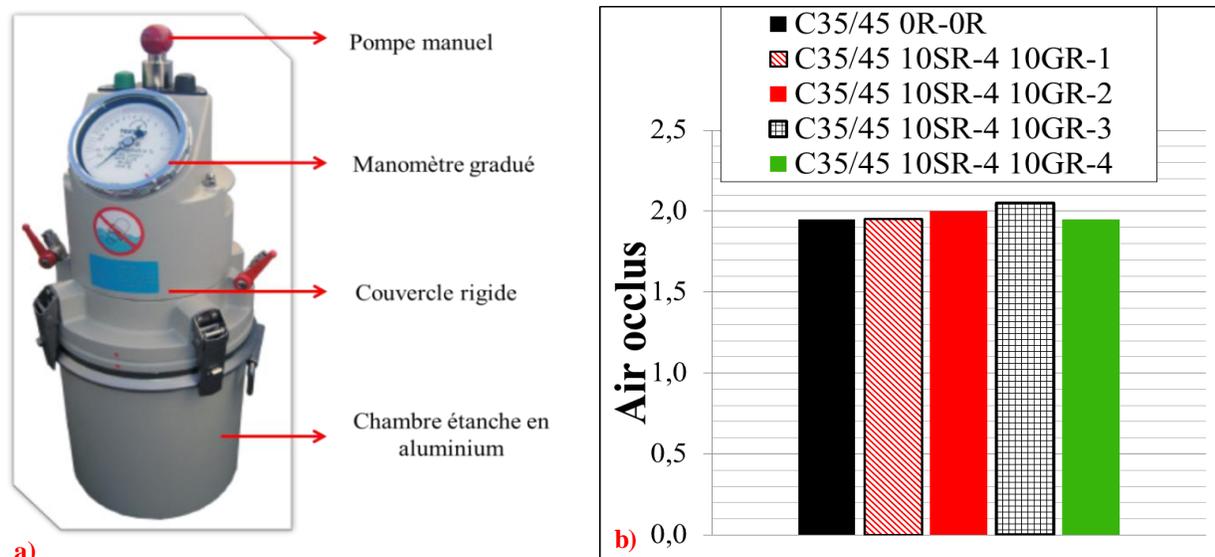


Figure 50. Détails des différents constituants d'un Aëromètre (a) et les résultats d'air occlus (b)

D'après ces résultats, nous constatons que le béton formulé entièrement de granulats naturels a montré le pourcentage d'air occlus le plus faible, tandis que ceux formulés avec l'incorporation de 10 % de granulats recyclés (sable et gravillons recyclés) ont montré un pourcentage légèrement élevé, à l'exception du béton à base des granulats de PN (C35/45 10SR-4/10GR-1) qui a montré un pourcentage identique à celle du béton de référence (0R-0R). Ce premier résultat est bel et bien attendu vue que les granulats recyclés sont connus par leur forte porosité qui, par conséquent, puisse influencer la porosité des bétons. Le pourcentage d'air occlus le plus élevé est appartenu au béton formulé avec 10% de granulats issus de la plate-forme NEUILLY (C35/45 10SR-4/10GR-2).

3. Propriétés des bétons à l'état durci

3.1 Porosité accessible à l'eau

La méthode permettant la mesure de la porosité accessible à l'eau et de la masse volumique apparente ainsi que du coefficient d'absorption est la méthode dite sous vide, dont le mode opératoire est décrit dans la norme française NF P 18-459.

Les mesures ont été effectuées sur des disques 15 x 5 cm découpés des cylindriques 15 x 30 cm à l'aide d'une scie. Les échantillons ont été placés sous vides pendant 4 heures à une pression égale à 25 mbar puis ils ont été immergés dans l'eau à cette pression pendant 44 heures (**Figure 51**). Au bout de 48 heures la masse est mesurée par pesée hydrostatique puis la masse sèche est déterminée après un séchage à une température de 105 ± 5 °C pendant une période permettant l'obtention d'une masse constante (différence de 0,05% entre deux pesées successives réalisées à 24h d'écart).

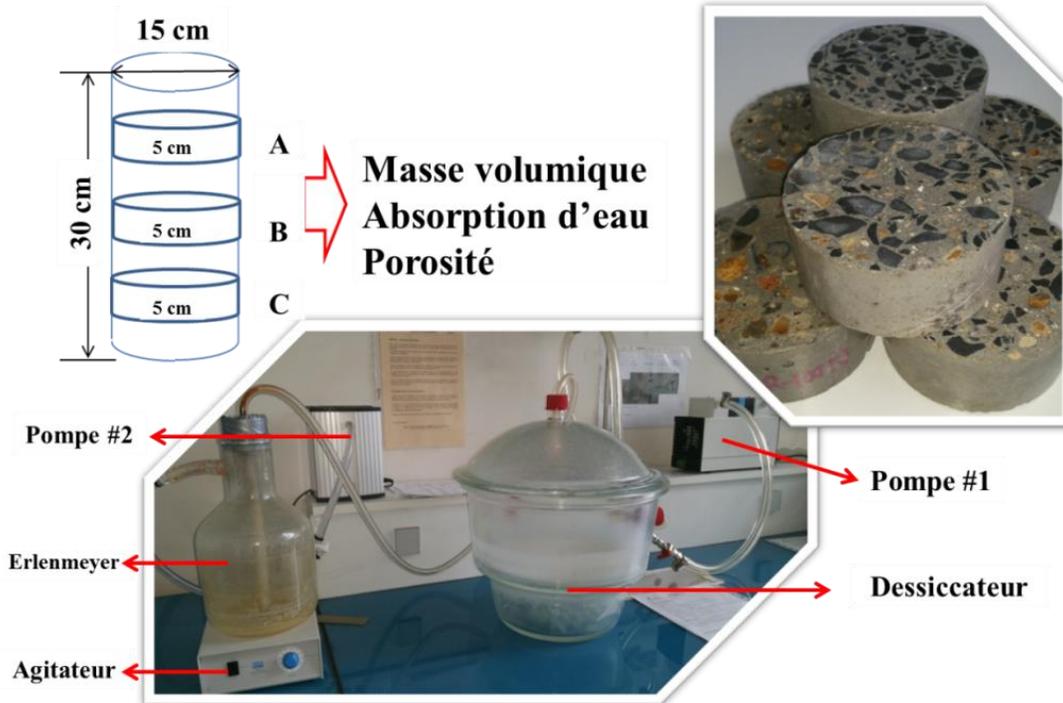


Figure 51. Schéma illustratif du système de mesure de la porosité sous vide

Ainsi, les propriétés sont calculées à l'aide des formules suivantes :

→ La masse volumique apparente, ρ_{APP} , exprimée en kg/m^3

$$\rho_{APP} = \frac{M_{Sec}}{M_{Air} - M_{Eau}} \rho_{eau}$$

→ Le coefficient d'absorption d'eau, WA_{48h} , exprimé en %

$$WA_{44h} (\%) = \frac{M_{Air} - M_{Sec}}{M_{Sec}} 100$$

→ La porosité accessible à l'eau sous vide, n_V^B , exprimée en % :

$$n_V^B (\%) = \frac{M_{Air} - M_{Sec}}{M_{Sec} - M_{Eau}} 100$$

M_{Eau} est la masse de l'éprouvette en kg plongée dans l'eau ;

M_{Air} est la masse dans l'air de l'échantillon saturé en kg ;

M_{Sec} est la masse de l'échantillon séché à 105°C en kg

Les résultats de la masse volumique apparente, le coefficient d'absorption et la porosité à l'eau sont illustrés dans la **Figure 52**.

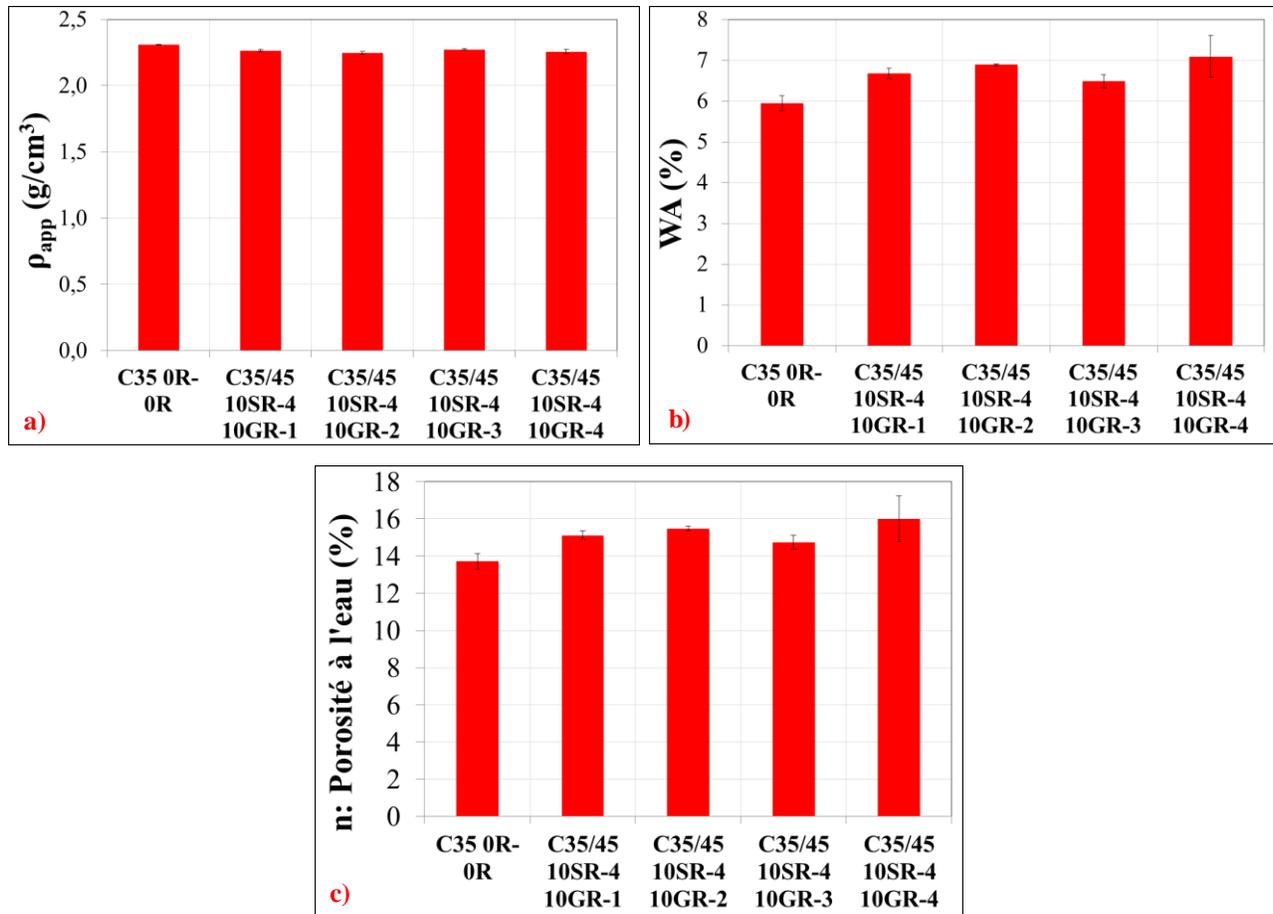


Figure 52. Masse volumique (a), coefficient d'absorption d'eau (b) et porosité accessible à l'eau (c) des bétons.

En observant la **Figure 52**, nous remarquons que la masse volumique apparente de tous les bétons à base de 10% de granulats recyclés (bétons recyclés) ainsi que celle de référence (Béton naturel) sont plus au moins identiques, ce qui nous permet de constater que l'incorporation de granulats recyclés à 10% n'a pas une influence importante sur la masse volumique de béton à l'état final (durci). Contrairement à la masse volumique apparente, la porosité et le coefficient d'absorption semblent avoir une sensibilité remarquable à l'incorporation des granulats recyclés d'une part, et à la nature de ces derniers d'autre part. Une porosité à l'eau de moins de 14% a été obtenue pour le béton naturel (0R-0R), alors que tous les restes ont montré une porosité supérieure à 14%, variant entre 14.75% pour celle de LEONHART (C35/45 10SR-4/10GR-4) et 16% pour celle formulé en utilisant les granulats recyclés issus de la plateforme ANCYCLA (C35/45 10SR-4/10GR-4). Si l'influence d'incorporation de granulats recyclés sur la porosité de béton est bien claire et logique de point de vue général, l'influence de la nature des granulats reste difficile à déterminer vue de l'hétérogénéité et la variété de la matrice granulaire des graviers recyclés vis-à-vis le type de matériaux qui composent ces derniers.

Par ailleurs, en comparant la porosité des bétons à l'état frais et celle à l'état durci, nous remarquons une certaine cohérence, et nous pouvons dire, que la porosité à l'état frais peut être considéré comme un bon indicateur de la porosité finale du béton.

3.2 Cinétique de séchage

L'essai a été effectué sur 3 échantillons de chaque type du béton. Les échantillons (préalablement saturés) ont été mis dans l'étuve à 80 °C jusqu'à atteindre une masse constante. Au début de l'essai des pesés pour suivre la perte de masse ont été réalisés à des intervalles de temps de 1h. Après les premières 24h une mesure par jour a été effectuée.

La perte de masse est calculée par rapport à la masse initiale saturée selon l'équation suivante :

$$Perte\ de\ masse(\%) = \frac{M_{saturée} - M_t}{M_{saturée}} \times 100$$

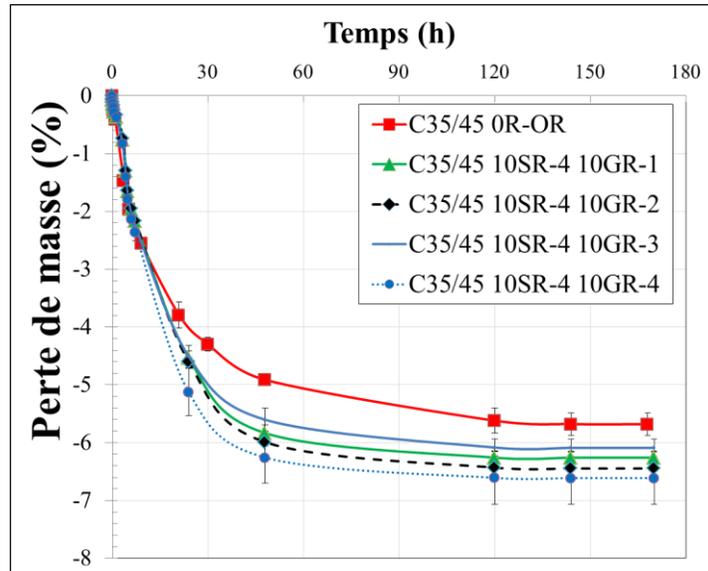


Figure 53. Cinétique de séchage à $105 \pm 5^\circ C$.

D'après la **Figure 53**, nous remarquons que tous les échantillons des bétons naturels et recyclés, ont perdu plus de 70 % de leur eau initiale après 24 heures de séchage tout en gardant une cinétique quasiment identique. Cette première perte est due à l'évaporation d'eau existée dans les gros pores, dont la cinétique de séchage est rapide et ni l'incorporation de graviers recyclés, ni la nature de ces graviers, ont montré un effet significatif sur la cinétique. Au-delà de 24 heures, cette dernière devient progressivement faible à cause de la difficulté d'éliminer les traces d'eau dans les micropores. Par ailleurs, un retard remarquable sur la cinétique de séchage du béton naturel par rapport aux bétons recyclés est à noter, tandis que ces derniers gardent une cinétique comparable. Cela peut être expliqué par la porosité, d'où la cinétique de séchage la plus faible appartient au béton naturel qui possède la porosité la plus faible en comparant aux autres bétons (recyclés). Ainsi, Le béton qui a montré une porosité élevée, celui formulé à base de 10% de granulats recyclés ANCYCLA (C35/45 10SR-4/10GR-4) et représenté par des cercles bleus dans la Figure 54, a confirmé ce résultat par une cinétique de séchage très rapide. A l'issue de ces résultats nous pouvons constater que les résultats de la cinétique de séchage ont confirmé les résultats de l'essai de porosité en soulignant l'effet considérable sur structure de béton qui puisse être avoir en incorporant 10% de granulats recyclés.

3.3 Perméabilité au gaz

La perméabilité à l'air a été mesurée à l'aide d'un perméamètre CEMBUREAU conformément à la norme XP P 18-463 et à la loi de Darcy. La mesure a été effectuée sur les disques 15x5 cm (**Figure 54**) prélevés dans la partie centrale des cylindres 15 x 30 cm préparés lors de la confection des bétons et démoulés après 24 heures. Les cylindres ont été stockés dans l'eau pendant 28 jours à une température $20 \pm 2^\circ C$ puis ils ont été sciés pour obtenir des disques 15 x 5 cm à l'aide d'une scie de béton. Les disques ont été ensuite séchés dans une étuve ventilée à une température de $105 \pm 5^\circ C$ afin d'éliminer toute trace d'eau et les essais de perméabilité ont été réalisés 2 jours après la fin du séchage. Pour éliminer le flux de gaz par pourtour des échantillons, les disques ont été rendus étanches par un film aluminium autocollant afin d'assurer un flux monodimensionnel.

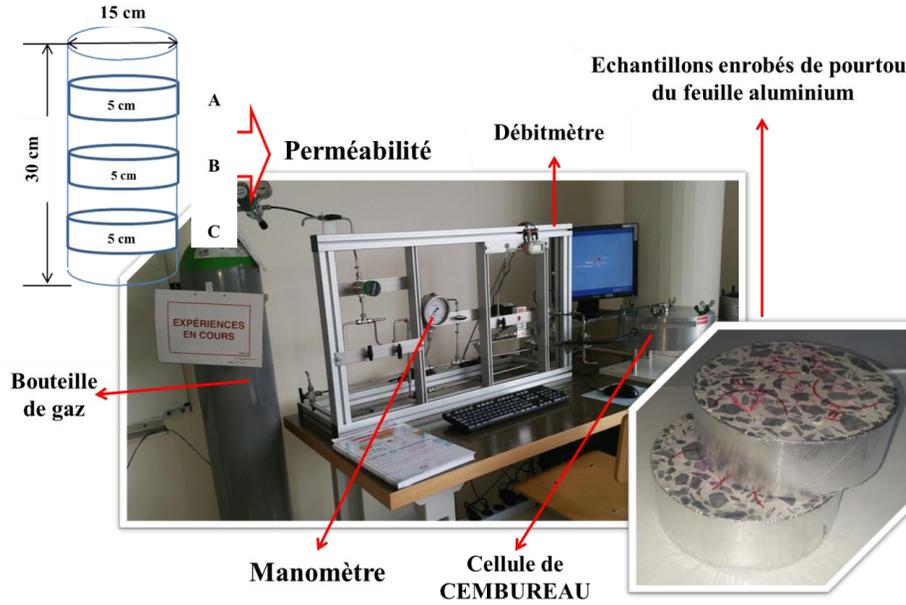


Figure 54. Système de mesure de la perméabilité au gaz.

Les mesures de perméabilités ont été réalisées en choisissant trois pressions d'entrée différentes, P_e , : 1 bars, 3 bars et 5 bars. La perméabilité apparente, K_{App} , a été calculée en utilisant l'équation de Darcy en régime stationnaire (**Figure 55**).

$$K_{App} (m^2) = \frac{2\mu Q L P_{atm}}{A (P_e^2 - P_{atm}^2)}$$

où, μ est la viscosité dynamique de l'azote ($1,76 \cdot 10^{-5}$ Pa.s), P_{atm} la pression atmosphérique ($1,01^E+05$ Pa), P_e : la pression appliquée (Pa), L : l'épaisseur de l'échantillon (m) et A : la section de l'éprouvette (m^2).

La perméabilité apparente diminue lorsque la pression moyenne du gaz dans l'échantillon augmente. Elle varie linéairement en fonction de l'inverse de la pression moyenne, P_m comme illustré schématiquement dans la **Figure 55**. Le point d'intersection entre cette droite et l'axe des ordonnées permet la détermination de la perméabilité intrinsèque du matériau, K_{int} (**Figure 55**).

$$P_m = \frac{P_e + P_{atm}}{2} \quad \text{et} \quad K_{App} = K_{int} \left(1 + \frac{\beta}{P_m} \right)$$

où β est le coefficient de Klinkenberg. C'est une constante qui dépend principalement de la structure poreuse du béton considéré.

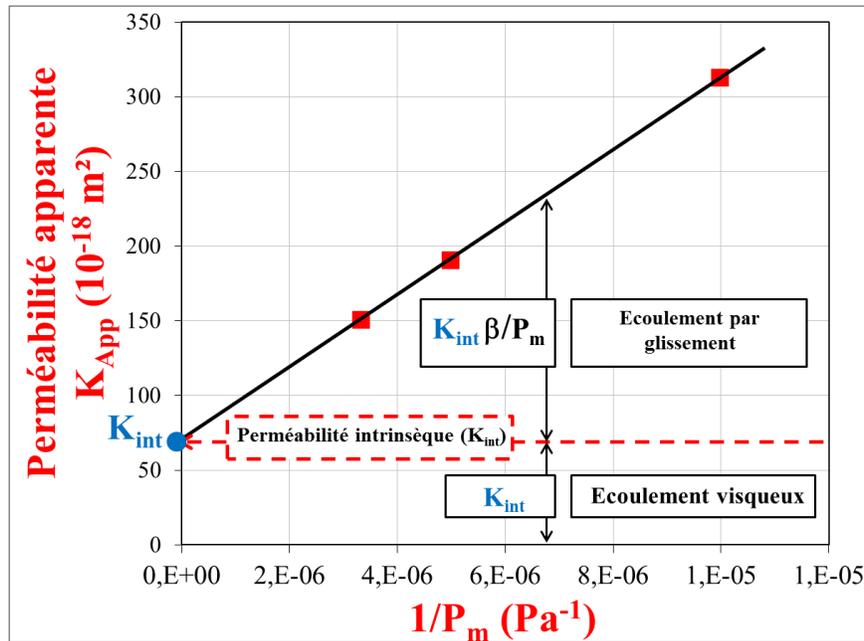


Figure 55. Le schéma illustrant l'évolution de la perméabilité apparente (K_{App}) en fonction de l'inverse de la pression moyenne (P_m).

La perméabilité intrinsèque en fonction du taux de saturation est illustrée par la Figure 56.

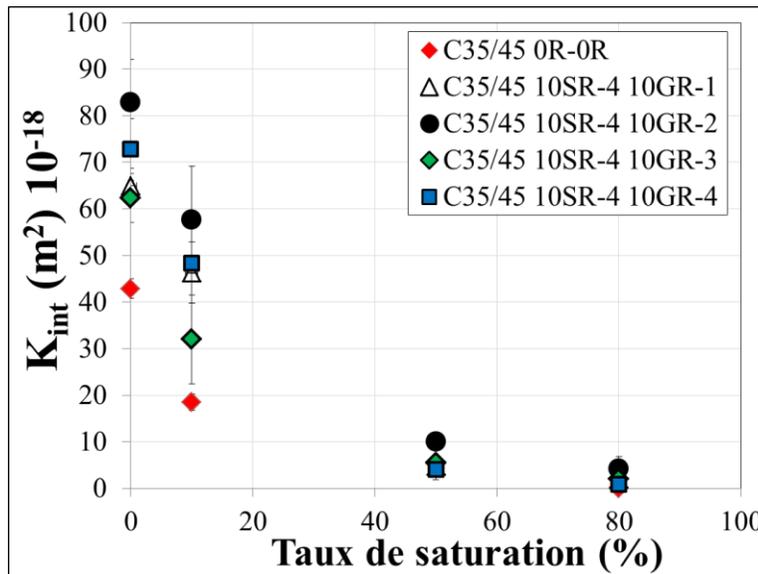


Figure 56. Perméabilité intrinsèque en fonction de l'inverse de pression moyenne

Tout comme la cinétique de séchage, les résultats présentés dans la Figure 56 confirment l'effet d'incorporation de 10% de granulats recyclés sur la structure poreuse du béton. Le béton de référence, de faible porosité, est caractérisé par une faible perméabilité plus faible que celle des bétons incorporant 10% de granulats recyclés. L'effet du degré de saturation sur cette propriété de transfert est très important. En effet, on remarque que la perméabilité des bétons à 0 et à 10% de saturation dépend de la variabilité géographique des gravillons recyclés. Cependant, en augmentant le degré de saturation, l'écart devient de plus en plus faible à cause de l'eau qui bloque la circulation de gaz dans les pores connectés. A un degré de saturation de 80% les perméabilités intrinsèques atteignent un seuil.

3.4 Propriétés mécaniques du béton durci

3.4.1 Module d'élasticité dynamique

Un appareil, E-Meter MK II, est utilisé pour déterminer le module élastique dynamique des bétons (Figure 58) selon la norme P18-414. Les essais ont été conduits sur des éprouvettes cylindriques de 11 x 22 cm (Figure 57).

La technique est basée sur la mesure des fréquences de résonance de trois différents modes de vibration, longitudinal, transversal (flexion) et de torsion. De ces fréquences peuvent être calculées certaines caractéristiques du matériau, telles que le module d'élasticité, le coefficient de poisson et la constante d'amortissement. Le module d'élasticité dynamique, $E_{dynamique}$, se calcule par la relation suivante :

$$E_{dynamique} = 4 \cdot f_{longi} \cdot L^2 \cdot \rho \cdot 10^{-9}$$

Avec

f_{longi} : fréquence propre de résonance longitudinale [Hz], L : longueur de l'éprouvette [m], ρ : masse volumique du matériau [kg/m³].

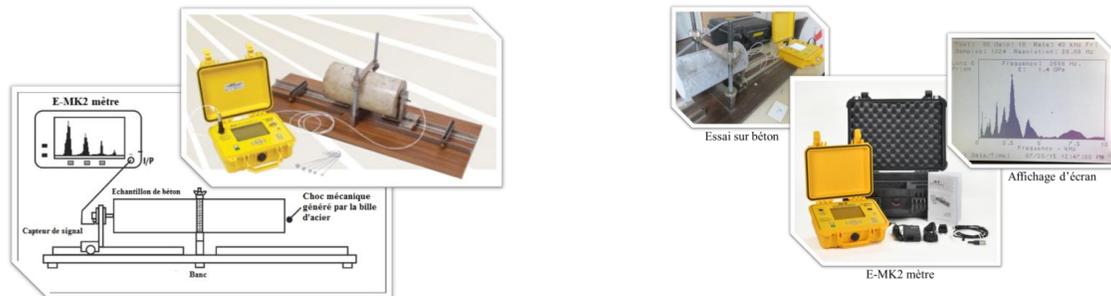


Figure 57. Photo illustrant le fonctionnement d'E- MK2 Mètre

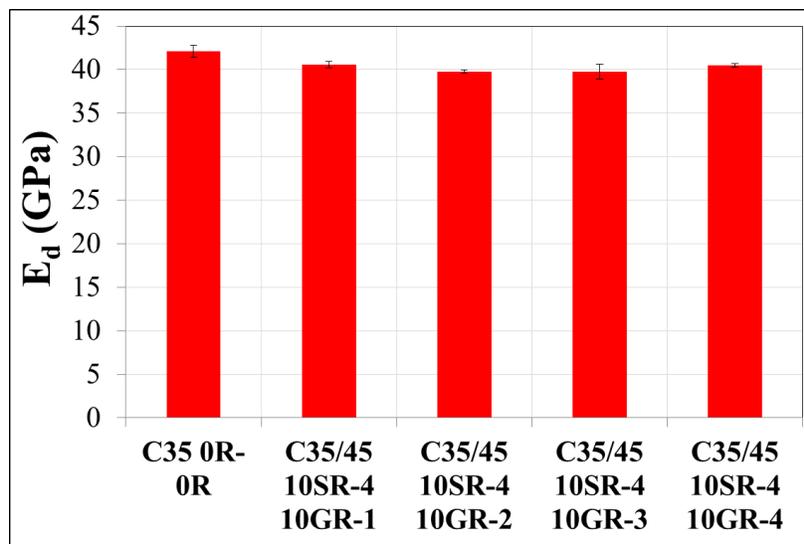


Figure 58. Module d'élasticité dynamique des bétons

Les résultats de module dynamique de chaque béton sont résumés dans la Figure 58. Nous remarquons un écart de l'ordre de 3 GPa entre la valeur de module dynamique d'un béton naturel et celles des bétons recyclés. Ces derniers ont montré une capacité quasiment identique. Sachant que tous les bétons possèdent la même matrice cimentaire

(sans prendre en compte l'ancienne pate de ciment de graviers recyclés), la différence est clairement due à la nature de granulats, dont l'utilisation de 10% de granulats recyclés a conduit à un béton relativement faible.

3.4.2 Résistance à la compression

Les tests de la résistance à la compression (f_{cm}) à l'état durci ont été réalisés conformément à la norme NF EN 12390-3 sur des éprouvettes cylindriques 11x22 cm. Les essais ont été effectués à l'aide d'une presse SCHENCK à asservissement hydraulique d'une capacité de 3500 kN, et ont été conduits à une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s (**Figure 59**).



Figure 59. Photo illustrant le fonctionnement d'essai de compression à l'aide de SCHENCK

Les éprouvettes ont été préalablement surfacées avec un mortier de surfacage, certifié ISO-9001. Ce mortier a été porté jusqu'à 180 °C pour sa liquéfaction dans un bain d'huile de la marque MAGMAX-3R. Le souffre chaud est versé sur l'équerre de surfacage et l'échantillon vient se placer verticalement (**Figure 60**).



Figure 60. Dispositif pour surfacage d'une éprouvette.

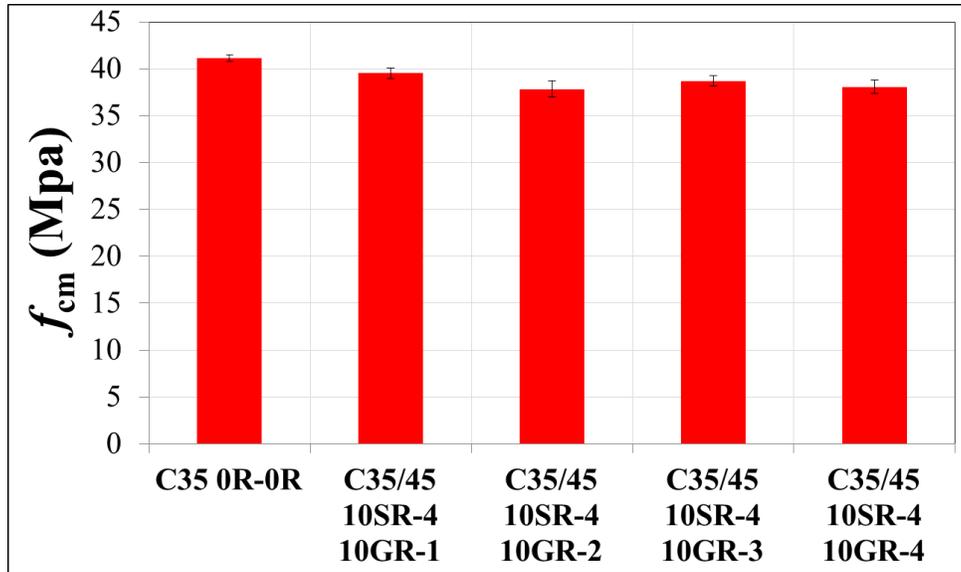


Figure 61. Résistance à la compression des bétons.

Comme nous pouvons le voir à partir de la **Figure 61**, l'incorporation de 10% de granulats recyclés dans la formulation de béton a provoqué une chute de la résistance à la compression. En revanche tous les bétons recyclés ont permis d'obtenir une résistance supérieure à 35 MPa. Ces bétons ont largement répandu au critère. Par ailleurs, en revenant aux résultats de porosité et de module dynamique, nous constatons que malgré que les valeurs obtenues pour les bétons recyclés étaient relativement élevées pour la porosité et légèrement faibles pour le module dynamique, cela n'a pas empêché d'obtenir des bétons mécaniquement résistants.

3.4.3 Résistance à la traction par fendage

Les essais de résistance à la traction par fendage, $f_{ctm,sp}$, ont été effectués, à l'aide de la presse SCHENCK, sur des éprouvettes cylindriques 11 x 22 cm³ selon la norme NF EN 12390-6 à une vitesse de chargement égale à 0.05 MPa/s. L'essai consiste à comprimer un cylindre de béton placé horizontalement entre les plateaux de la presse (**Figure 62**).



Figure 62. Dispositif pour l'essai de traction par fendage.

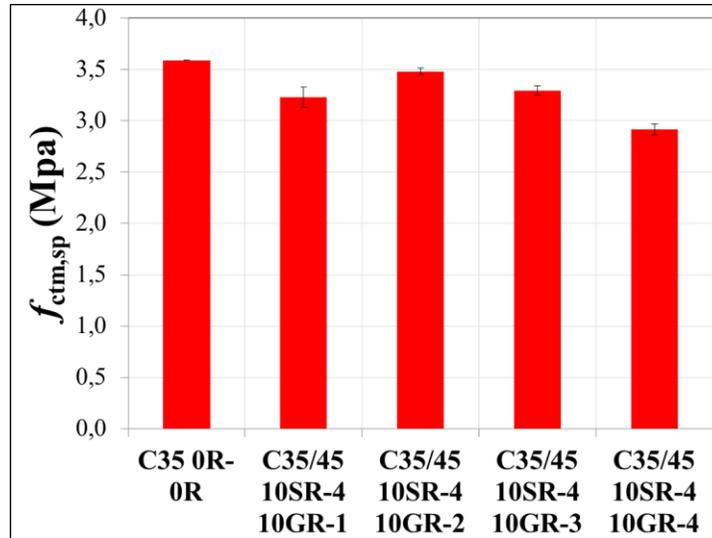


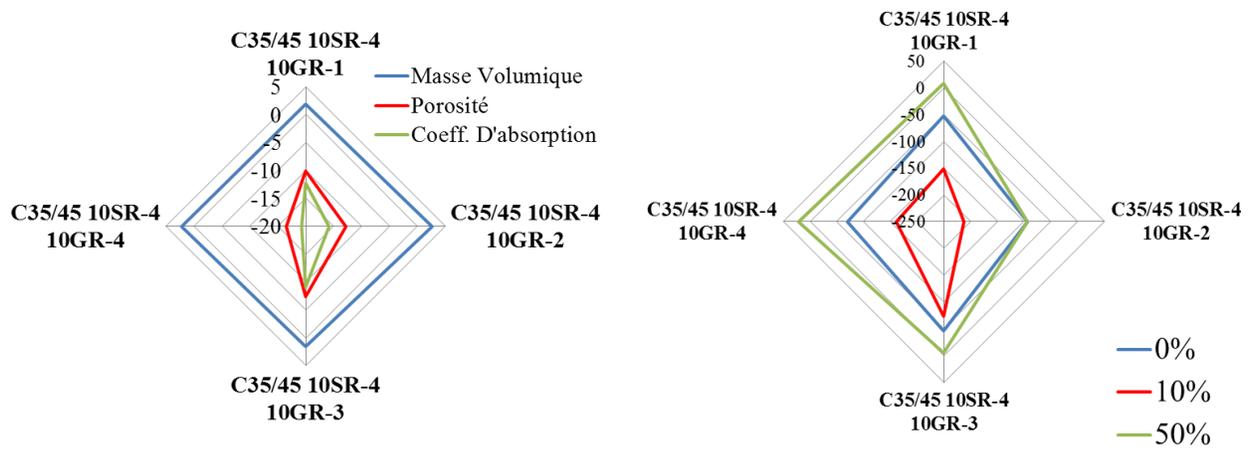
Figure 63. Résistance à la traction par fendage des bétons.

Les résultats de la résistance à la traction par fendage de tous les bétons, même de celui de béton naturel (**Figure 63**), n'ont pas dépassés 4 MPa. La valeur la plus élevée est notée pour le béton naturel, ce qui confirme les résultats de la résistance à la compression. Il est important aussi de noter que le béton recyclés à base de granulats NEUILLY (C35/45 10SR-4/10GR-2) a montré une résistance proche de celle du béton naturel tandis que la plus faible est obtenue pour le béton recyclés ANCYCLA (C35/45 10SR-4/10GR-4). A l'instar des résistances à la compression, celles à la traction ont montré une sensibilité remarquable à l'origine, autrement dit à la nature des granulats recyclés tout en possédant des performances acceptables.

Discussion

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que l'introduction de 10% en volume de sable recyclé de type SR- 4 (plateforme d'Ancycla) et 10% en volume de gravillons de la même plateforme conduisent à des bétons de résistance à la traction par fendage la plus faible bien qu'elle demeure inférieure à 20%.

Pour estimer l'effet de l'incorporation de 10% en volume de granulats recyclés nous avons calculé les variations relatives de chaque propriétés P telle que $V = \frac{P^{M-SN} - P^{M-SR-i}}{P^{M-SN}} \times 100$. Des valeurs négatives indiquent une augmentation de la propriété considérée alors que les valeurs positives une diminution. On remarque que toutes les propriétés ont diminué (**Figure 64**).



Perméabilités intrinsèque en fonction du degrés de saturation

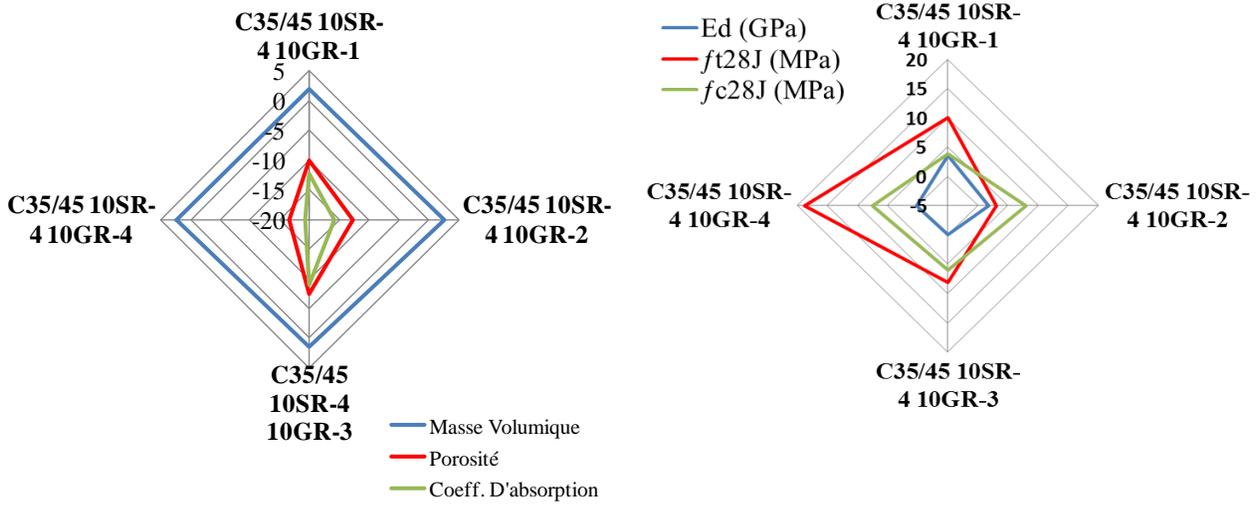


Figure 64. Propriétés physiques et mécanique des bétons.

CONCLUSION

Les travaux présentés dans ce rapport ont été menés dans le but d'évaluer l'impact de la variabilité des granulats recyclés sur les propriétés des mortiers et bétons. Le taux de substitution des granulats naturels par les recyclés est de 10% sur les propriétés des bétons.

Afin de répondre aux objectifs fixés, un programme expérimental a été élaboré dans un premier temps pour étudier les propriétés à l'état frais et durci de mortiers de béton dont 10% du sable naturel est substitué par cinq types de sable recyclé. La composition des mortiers est dérivée de la formulation du béton C35/45-OR-OR à l'aide de la méthode du mortier de béton équivalent MBE. Pour tous les mortiers développés, les paramètres de la formulation ont été conservés à savoir : la quantité du ciment et du filler, le rapport eau efficace sur ciment aussi bien que le dosage en superplastifiant. Des campagnes expérimentales ont été menées pour étudier les propriétés des mortiers aux états frais, durcissant et durci. Sur la base des résultats expérimentaux, nous montrons que le sable recyclé n'affecte pas les propriétés mécaniques à l'état mais affecte les propriétés à l'état frais et durcissant. De plus, les observations au MEB conduites sur les différents mortiers ont montré que l'interface entre le sable recyclé et la matrice cimentaire est de bonne qualité. Enfin, le sable disponible en grande proportion, sable de la plateforme d'Ancykla (nommé SR-4), a été utilisé avec 4 lots de graviers recyclés pour formuler les bétons de l'étude où 10% des granulats naturels sont substitués en volume par des granulats recyclés.

Les mêmes campagnes de mesures à l'état frais et à l'état durci ont été menées à l'échelle du béton en plus des essais de perméabilité au gaz à plusieurs taux de saturation. Les résultats obtenus ont permis de conclure que l'incorporation de 10 % de granulats recyclés (sable et gravillons recyclés) :

- n'affecte pas le volume d'air occlus des bétons quelque soit l'origine des gravillons recyclés. La valeur moyenne obtenue est $a = 1.96^{\pm 0.1}$;
- conduit à la diminution de la masse volumique apparente des bétons à 28 jours. Cependant cette diminution relation est de l'ordre 2%. Elle ne dépend pas ou peu de la variabilité géographique des gravillons ;
- est à l'origine de l'augmentation de la porosité et du coefficient d'absorption des bétons. L'augmentation la plus significative est observée pour les bétons élaborés avec les gravillons 4 provenant de la plateforme d'Ancykla (17% pour la porosité et 19% pour le coefficient d'absorption) et pour les bétons élaborés avec les gravillons 2 issus de la plateforme de Neuilly (13% pour la porosité et 16% pour le coefficient d'absorption) ;
- entraîne une augmentation importante de la perméabilité intrinsèque des bétons testés à l'état sec révélant un changement dans la structure porale des bétons, changement affecté par la provenance géographique des gravillons recyclés. L'augmentation la plus significative est observée pour les bétons élaborés avec les gravillons 2 (plateforme de Neuilly) puis pour les bétons élaborés avec les gravillons 4 (plateforme d'Ancykla). Elle est de 93% et 70% respectivement. L'augmentation du taux de saturation des bétons avant les essais a pour effet d'estomper les écarts observés d'un béton à un autre ;
- provoque une légère chute relative de la résistance à la compression qui varie entre 4 et 8%. La baisse la plus élevée est enregistrée pour les bétons élaborés avec les gravillons 4 provenant de la plateforme d'Ancykla. En revanche tous les bétons avec 10% de gravillons recyclés ont une résistance moyenne $f_{cm} = 38.5MPa$;
- n'influence pas ou peu le module dynamique quelque soit l'origine géographique des gravillons recyclés ;
- affecte les résistances à la traction par fendage. Une diminution est observée. Cette diminution dépend fortement de l'origine géographique des gravillons recyclés. Ainsi, ce sont les bétons élaborés avec 10% de gravillons recyclés de la plateforme d'Ancykla (G4) qui enregistrent la baisse relative la plus élevée (chute de 18% par rapport du béton référence);

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abbas Abdelgadir [et al.] Durability of Recycled Aggregate Concrete Designed with Equivalent Mortar Volume Method. [Revue]. - 2009.

Akash Rao: Kumar, N., Jha et Sudhir Misra Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete [Revue]. - [s.l.] : Resources, Conservation and Recycling, 2007. - 50 : Vol. 71-81.

Amon Katz Properties of concrete made with recycled aggregates from partially hydrated old concrete [Revue] // Cement and Concrete Research. - 2003. - Vol. 33. - pp. 703-711.

C. Hansen T. Recycled of demolished and masonry [Ouvrage]. - London : E & FN SPON, 1992.

Debieb Farid [et al.] Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates [Revue]. - [s.l.] : Cement and Concrete Composites, 2010. - 32 : Vol. 6.

De-Larrard F., Structures granulaires et formulation des bétons [Revue]. - Paris : Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2000. - Vol. OA34,.

Etxeberia M. [et al.] Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete [Journal] // Cement and Concrete Research. - 2007. - 42 : Vol. 735. - p. 37.

Evangelista L., J. de et Brito Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates [Revue] // Cement & Concrete Composites. - 2007. - Vol. 29. - pp. 397-401.

Fabbri A., Physico-mécanique des matériaux cimentaires soumis au gel-dégel. [Ouvrage]. - Paris : Université de Marne-La-Vallée, 2006.

FAGERLUND G. Studies of the destruction mechanisms at freezing of porous materials, Proceeding of the sixth international congress on the problems raised by frost action [Rapport]. - Le Havre, France : Fondation française d'études nordiques, p.. 166-196, 1975.

Ferreira J., de, Brito et M. Barra Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties [Revue]. - 2011 : Magazine of Concrete Research. - 617 -627 : Vol. 63.

Gomart H., Ghorbel E. et Wardeh G. ETUDE DE L'OUVRABILITE ET DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE MORTIERS À BASE DE SABLE RECYCLÉ [Revue]. - 2013, August.

Hansen T., C. Recycling of demolished concrete and masonry [Revue]. - [s.l.] : CRC Press, 2004. - Vol. 6.

Ilker B., T. et Selim Sengel, Properties of concretes produced with waste concrete aggregate [Revue] // Cement and Concrete Research. - 2004. - Vol. 34. - pp. 130-1312.

J. de, Brito Properties of recycled concrete, presentation lors du Workshop Recycling concrete into concrete : a scientific and industrial perspective [Revue]. - Juillet 2014.

Jianzhuang Xiao [et al.] An overview of study on recycled aggregate concrete in China [Revue] // Construction and Building Materials. - June 2012. - Vol. 31. - pp. 364–383.

Jin Wu, Xianhang Jing et Zhe Wang Uni-axial compressive stress-strain relation of recycled coarse aggregate concrete after freezing and thawing cycles [Revue] // Construction and Building Material. - 2017. - Vol. 134. - pp. 210–219.

Jose M., V., Gomez Soberon Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate An experimental study [Journal] // Cement and Concrete Research. - 2002. - Vol. 32. - pp. 1301–1311.

Juan M., S., De and Gutierrez P., A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate [Journal] // Construction and Building Materials. - 2009. - 7 : Vol. 872. - p. 23.

Kou S., C. and Poon C., S. Long term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash [Journal] // Cement & Concrete Composites. - 2013. - Vol. 37. - pp. 12-19.

L. Evangelista et J.De Brito Concrete with fine recycled aggregates: a review, [Revue] // Eur. J. Environ. Civ. Eng., - 2014. - 2 : Vol. 8. - pp. 129-172.

Levy S.M., Helene, P. Durability of recycled aggregate concrete: A safe way to sustainable developmen [Revue]. - [s.l.] : Cement and Concrete Research, 2004. - 1975-1980 : Vol. 34.

Manzi S., Mazzotti C. and Bignozzi M., C. Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate [Journal] // Cement & Concrete Composites. - 2013. - Vol. 37. - pp. 312–318.

Nixon P., J. Recycled concrete as an aggregate for concrete—a review [Revue]. - [s.l.] : Matériaux et Construction, 1978. - 371-378 : Vol. 11-5.

Omary S., Ghorbel E. et Wardeh G. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties [Revue]. - [s.l.] : Construction and Building Materials, 2016. - 163-174 : Vol. 108.

OMARY Safiullah, GHORBEL Elhem and WARDEH George Influence de l'incorporation des granulats recyclés de démolition sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons fluides [Conference] // AUGC2015 - <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01167632v1>.. - France : [s.n.], 2015.

Padmini A., K., Ramamurthy K. et Mathews M., S. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete [Revue]. - [s.l.] : Construction and Building Materials, 2009. - 829-836 : Vol. 23.

PN-Recybéton LE RECYCLAGE DU BETON DANS LE BETON, TOUT NATURELLEMENT [Rapport]. - Paris : SMABTP, 16 juin 2015.

Poon C., S., Kou S., C. and Lam L. Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete [Journal] // Materials and Structures. - 2007. - DOI 10.1617/s11527-006-9192-y : Vol. 40. - pp. 981-988.

R. Sri, Ravindrarajah et C. T., Tam Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregat [Revue] // UDC. - 123.017'620.17 : Vol. 97. - p. 666.

Schwartzentruber A. et Catherine C. La méthode du mortier de béton équivalent (MBE)—Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvés [Revue] // Mat. Struct. - 2000. - p. 33: 475 doi:10.1007/BF02480524.

Wang XT et Yang DJ. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading [Revue]. - [s.l.] : Civil engineering in china – current practice and research report, 2010. - 787–90.

Waugh W.R. Selection and Use of Aggregates for Concrete [Revue] // Journal of the American Concrete Institute. - 1961. - 5 : Vol. 58. - pp. 513-542.

Zhen-Hua Duan and Chi-Sun Poon Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars [Journal] // Materials and Design. - 2014. - Vol. 58. - pp. 19-29.