

CARACTÉRISATION DES GRANULATS RECYCLÉS ISSUS DE LA DÉMOLITION ET EFFETS SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DES BÉTONS FLUIDES

CHARACTERIZATION OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATES FROM C&DW AND THEIR EFFECTS ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETES

Safiullah OMARY, Elhem GHORBEL, George WARDEH

L2MGC Université de Cergy Pontoise, 5 mail Gay Lussac, Neuville-sur-Oise, 95031, France.
safiullah.omary@etu.u-cergy.fr - Elhem.ghorbel@u-cergy.fr - George.wardeh@u-cergy.fr

1. INTRODUCTION

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet ANR VBD 2013 « ECOREB » en relation étroite avec le PN RECYBETON [1], projet qui implique 43 partenaires entre universitaires, organismes de recherches du public et du privé, syndicats, fédérations et maître d'ouvrages. Le projet ANR ECOREB implique l'IREX, le L2MGC, le CERIB, l'IFSTTAR, le

GeM et Armines. Il s'intéresse à lever certains verrous technologiques concernant l'utilisation des granulats recyclés pour l'élaboration de bétons destinés au secteur du bâtiment afin de rendre commune leur introduction dans un contexte normatif.

Ce besoin d'utiliser de plus en plus ce type de granulats est né du nombre croissant d'ouvrages qui achèvent leur durée de vie et de la réduction des ressources naturelles.

L'utilisation de matériaux issus de la démolition est une solution envisageable pour minimiser l'approvisionnement de ressources naturelles. De ce fait, de nombreuses études expérimentales ont été réalisées à l'échelle mondiale pour étudier les propriétés des bétons à base de granulats recyclés [XIA05][ETX07][CAS08][DEJ09][BEL11][WAR13][WAR15]. Les premières recherches menées se sont intéressées à l'influence des granulats recyclés sur la micro-structure du béton [ETX07][DEJ09] et à l'étude des propriétés mécaniques des bétons en fonction des taux de substitutions en gravillons [XIA05][EVA07][CAS08][WAR13]. Les chercheurs ont conclu qu'il est possible de formuler des bétons qui possèdent des propriétés mécaniques comparables aux propriétés des bétons formulés à l'aide de granulats exclusivement naturels [BEL11][WAR13]. Cependant très peu d'études ont été dédiées à établir des corrélations entre les propriétés des mélanges granulaires (granulats naturels + granulats recyclés) et les propriétés des bétons, corrélations qui nécessitent d'établir des méthodes prédictives des propriétés des mélanges granulaires.

Le présent travail s'inscrit dans ce cadre. Il vise à étudier l'influence de la substitution partielle ou totale des granulats naturels par des recyclés sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons. Pour déterminer les propriétés physiques et mécaniques des granulats, des mesures de masse volumique réelle, d'absorption d'eau (W_A), de porosité accessible à l'eau (n) et du coefficient de Los Angeles (LA) ont été réalisées sur les granulats naturels (GN), les granulats recyclés (GR) et sur les mélanges granulaires utilisés pour l'élaboration de bétons. Deux séries de bétons de classes de résistances C25/30 et C35/45 et de classe de consistance S4 avec un affaissement visé de 18⁺² cm ont été élaborés en utilisant un ciment de type CEM II/A-L 42,5, des fillers calcaire HP-OG et un super plastifiant de type MC-Power Flow-3140. Quatre formulations pour chaque série ont été fabriquées : un béton de granulats naturels, dit de référence, et trois bétons de granulats recyclés avec trois taux de substitution volumique de GN par des GR : 30%, 50% et 100%. Les bétons ont été caractérisés à l'état frais à travers essentiellement la détermination de l'air occlus. A l'état durci, la porosité accessible à l'eau et les caractéristiques mécaniques (résistance à la compression et à la traction par fendage) ont été déterminées.

2. MATÉRIAUX

Deux types de granulats, composé chacun de trois coupures, ont été utilisés pour élaborer les bétons : des granulats naturels (sable semi-concassé lavé et gravillons calcaires concassés) et des granulats recyclés, issus d'une production spécifique du site de Gonesse (Tableau 1).

Pour déterminer la distribution granulaire des GN et GR , l'analyse granulométrique a été réalisée selon la norme NF EN 933-11. Il a été observé que les deux types de gravillons ont approximativement une distribution granulaire similaire. Par contre, les courbes granulométriques montrent que le SR est plus riche en fine (<2mm) que SN . Ceci peut être critique pour la formulation des bétons (Figure 1).

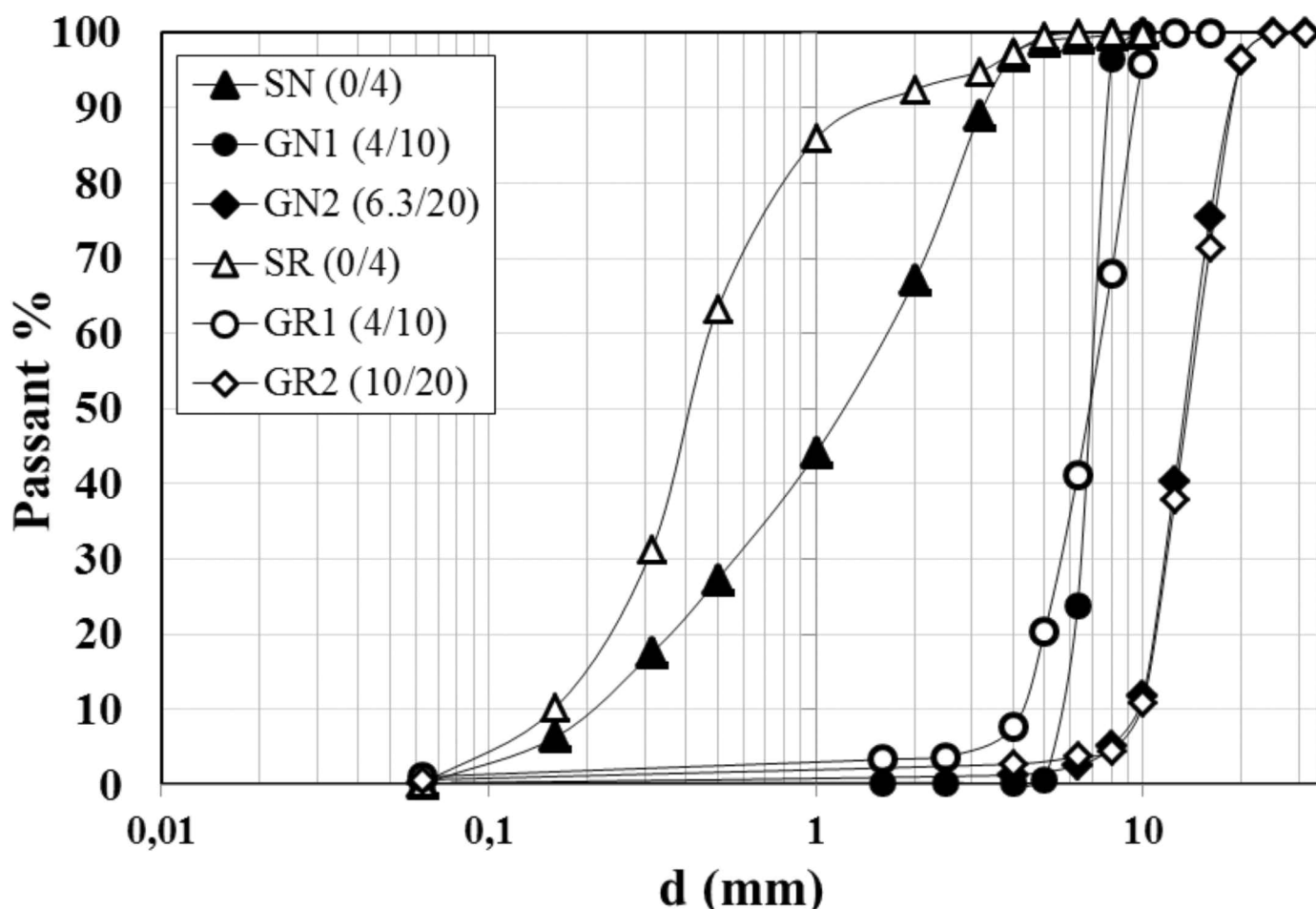
Un ciment de type CEM II/A-L 42,5, des fillers calcaire HP-OG et un superplastifiant de type MC-Power Flow-3140 ont été utilisés pour l'élaboration de deux séries de bétons de classes de résistances C25/30 et C35/45, et de classe de consistance S4 avec un affaissement visé de 18+2cm. La masse volumiques de ciment et filler sont 3,09 et 2,7 (g/cm³). La résistance à la compression du ciment à 28 jours est 51,8 (MPa) [SED 13].

3. MÉTHODE EXPÉRIMENTALES

La masse volumique réelle des granulats a été déterminée par la méthode de pycnomètre selon la norme NF EN 1097-1 et la méthode sous vide, adoptée uniquement pour les gravillons, conformément à la norme de NF P 18-459. La teneur en eau des granulats naturels et recyclés a été déterminée par trois méthodes. La première est la méthode du pycnomètre selon la norme NF EN 1097-6. La seconde est la méthode accessible à l'eau sous vide conforme à la norme de NF P 18-459. Pour cette dernière, les échantillons sont maintenus sous vide pendant 4h et stockés dans l'eau pendant 24 et 48 heures afin de déterminer $W_{A_{24h}}$ et $W_{A_{48h}}$. La troisième méthode est la méthode de la pesée hydrostatique qui se fait en continue dont le concept est fondé sur le principe de la poussée d'Archimède (tout volume immergé dans un liquide subit une poussée verticale ascendante égale au poids du volume de liquide déplacé). Les échantillons placés dans l'eau sont reliés à

| | Type de granulats | Dénomination | Coupures (mm) |
|--------------------|-------------------|--------------|---------------|
| Granulats recyclés | Gravillons | GR1 | 4-10 |
| | | GR2 | 10-20 |
| | Sables | SR | 0-4 |
| Granulats naturels | Gravillons | GN1 | 4-10 |
| | | GN2 | 6,3-10 |
| | Sables | SN | 0-4 |

Tableau 1 : Coupure des granulats naturels et recyclés [SED 13].



| Méthodes | | GR1 | | GR2 | | SR | | GN1 | | GN2 | | SN | |
|---------------------------------|-----------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Durée d'immersion | | 24h | 48h | 24h | 48h | 24h | 48h | 24h | 48h | 24h | 48h | 24h | 48h |
| Pycnomètre [NF EN 1097-6] | WA | 5,6 \pm 0,2 | 5,7 \pm 0,1 | 5,7 \pm 0,2 | 5,8 \pm 0,2 | 7,3 \pm 0,1 | 7,7 \pm 0,2 | 0,5 \pm 0,1 | 0,6 \pm 0,1 | 0,4 \pm 0,1 | 0,5 \pm 0,2 | 1,3 \pm 0,1 | 1,5 \pm 0,2 |
| | n_p^G | 13,0 \pm 0,2 | | 12,7 \pm 0,2 | | 16,1 \pm 0,1 | | 1,4 \pm 0,1 | | 1,1 \pm 0,1 | | 2,2 \pm 0,2 | |
| Sous vide [NF P 18-459] | WA | 6,1 \pm 0,1 | 6,4 \pm 0,1 | 6,2 \pm 0,1 | 6,2 \pm 0,1 | - | - | 0,6 \pm 0,1 | 0,7 \pm 0,1 | 0,5 \pm 0,1 | 0,6 \pm 0,1 | - | - |
| | n_v^G | 13,4 \pm 0,2 | | 13,7 \pm 0,2 | | - | | 1,6 \pm 0,1 | | 1,2 \pm 0,1 | | - | |
| Pesée hydrostatique (HWC) | WA ^G | 5,4 \pm 0,2 | 5,7 \pm 0,1 | 5,6 \pm 0,0 | 5,6 \pm 0,1 | 7,3 \pm 0,1 | 7,8 \pm 0,1 | 0,5 \pm 0,1 | 0,6 \pm 0,0 | 0,4 \pm 0,0 | 0,5 \pm 0,0 | 1,3 \pm 0,1 | 1,4 \pm 0,1 |

Tableau 2 : Absorption d'eau et porosité accessible à l'eau des granulats.

On montre que WA peut être estimé à 24 heures en toute confiance comme préconisé par les normes sauf pour le sable recyclé. On note, également, que le coefficient d'absorption atteint un seuil de saturation égal à 8,1% au bout de 7 jours quel que soit la méthode expérimentale utilisée, soit une augmentation de 11% par rapport aux valeurs mesurées à 1 jour. Par ailleurs, la porosité des granulats recyclés est nettement plus importante que celle des granulats naturels du fait de la présence de la pâte cimentaire enrobant les granulats d'origine naturelle.

Par la suite nous adopterons la méthode sous vide pour estimer le coefficient d'absorption d'eau à 24 heures et la

porosité des mélanges granulaires. Les résultats des essais réalisés sur les mélanges granulaires montrent que ces deux propriétés peuvent être prédites en utilisant la loi des mélanges $WA_{24} = r_m^G WA_{24}^{GR} + (1 - r_m^G) WA_{24}^{GN}$ et $n_v^G = r_m^G n_v^{GR} + (1 - r_m^G) n_v^{GN}$ (Figure 3).

On remarque que la porosité totale augmente avec le coefficient d'absorption des mélanges granulaires et ce de façon linéaire : $N_v^G(\%) = 2,2WA_{24h}(\%)$ (Figure 4).

4.1.2. Masse volumiques

Les valeurs des masses volumiques réelles des granulats déterminées en utilisant la méthode de pycnomètre et la

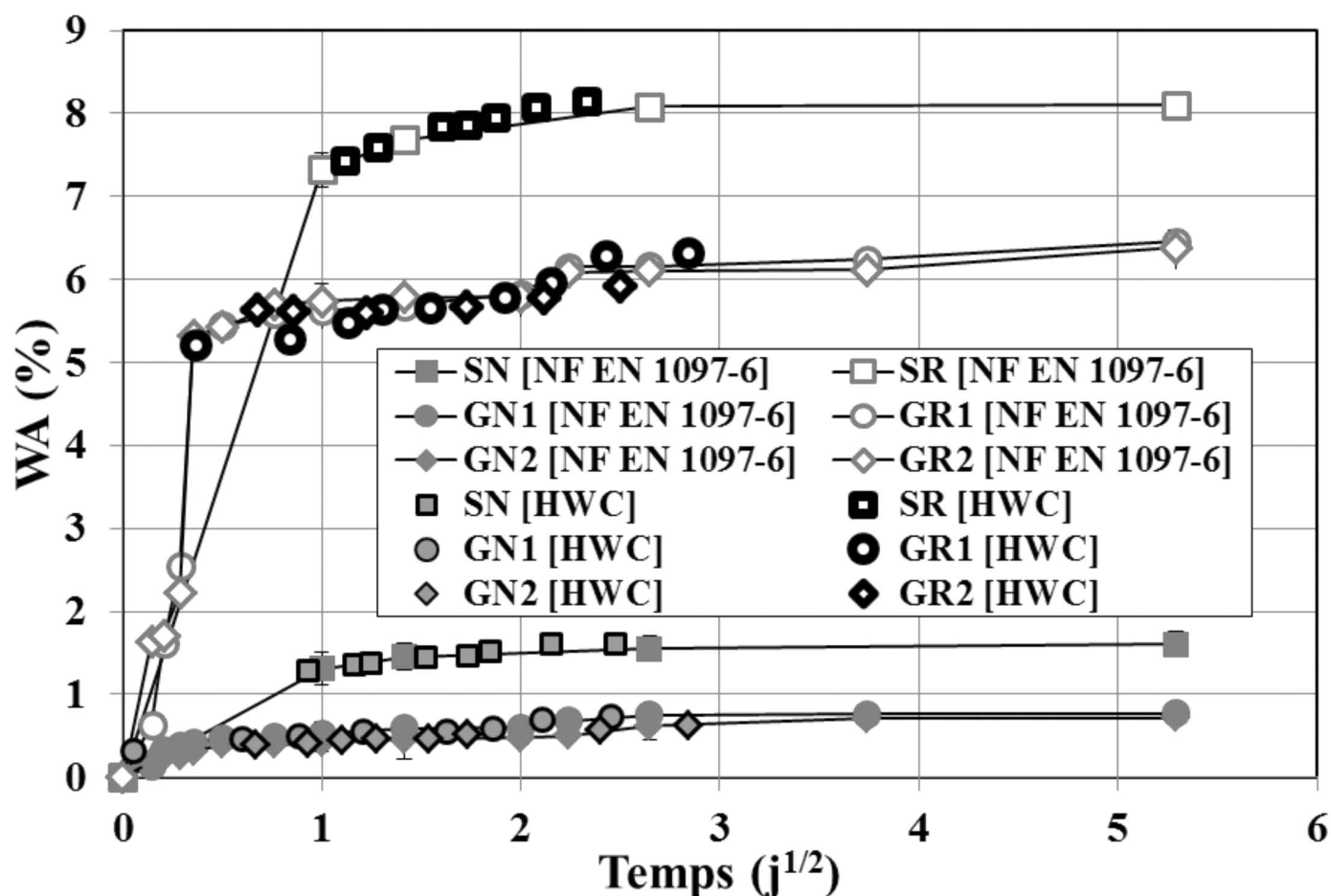


Figure 2 : Le coefficient d'absorption d'eau en fonction du temps.

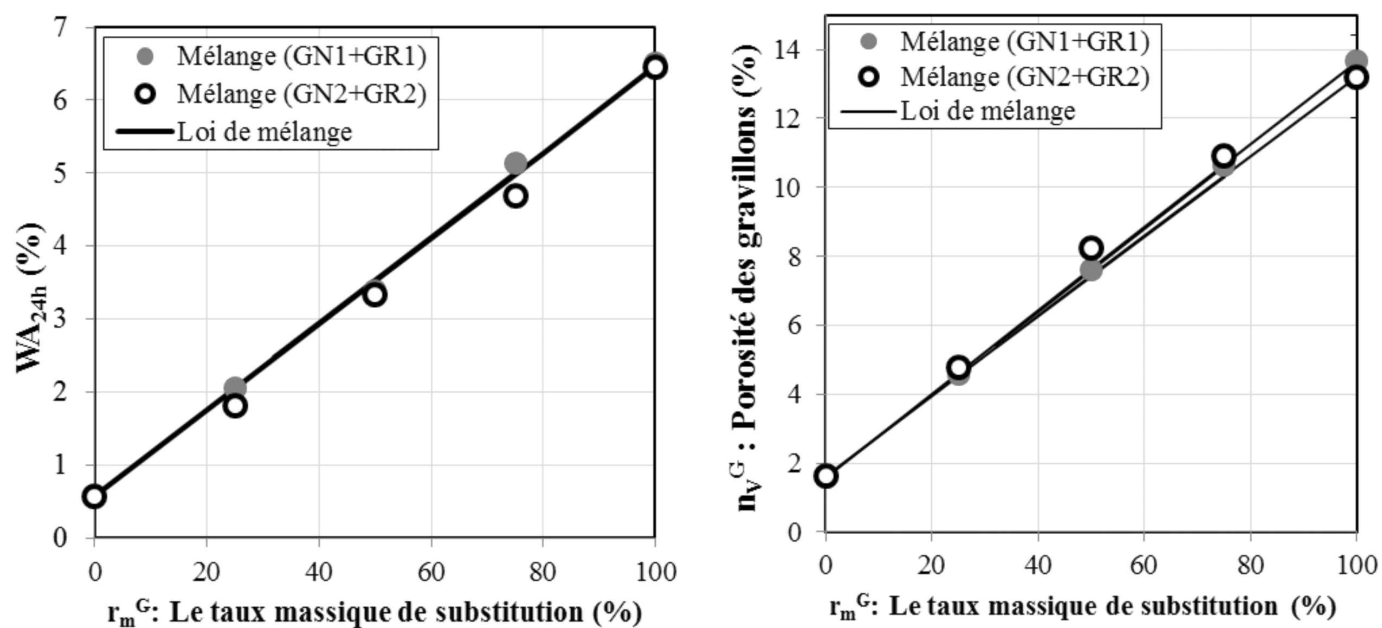


Figure 3 : Le coefficient d'absorption d'eau et la porosité en fonction du taux de substitution.

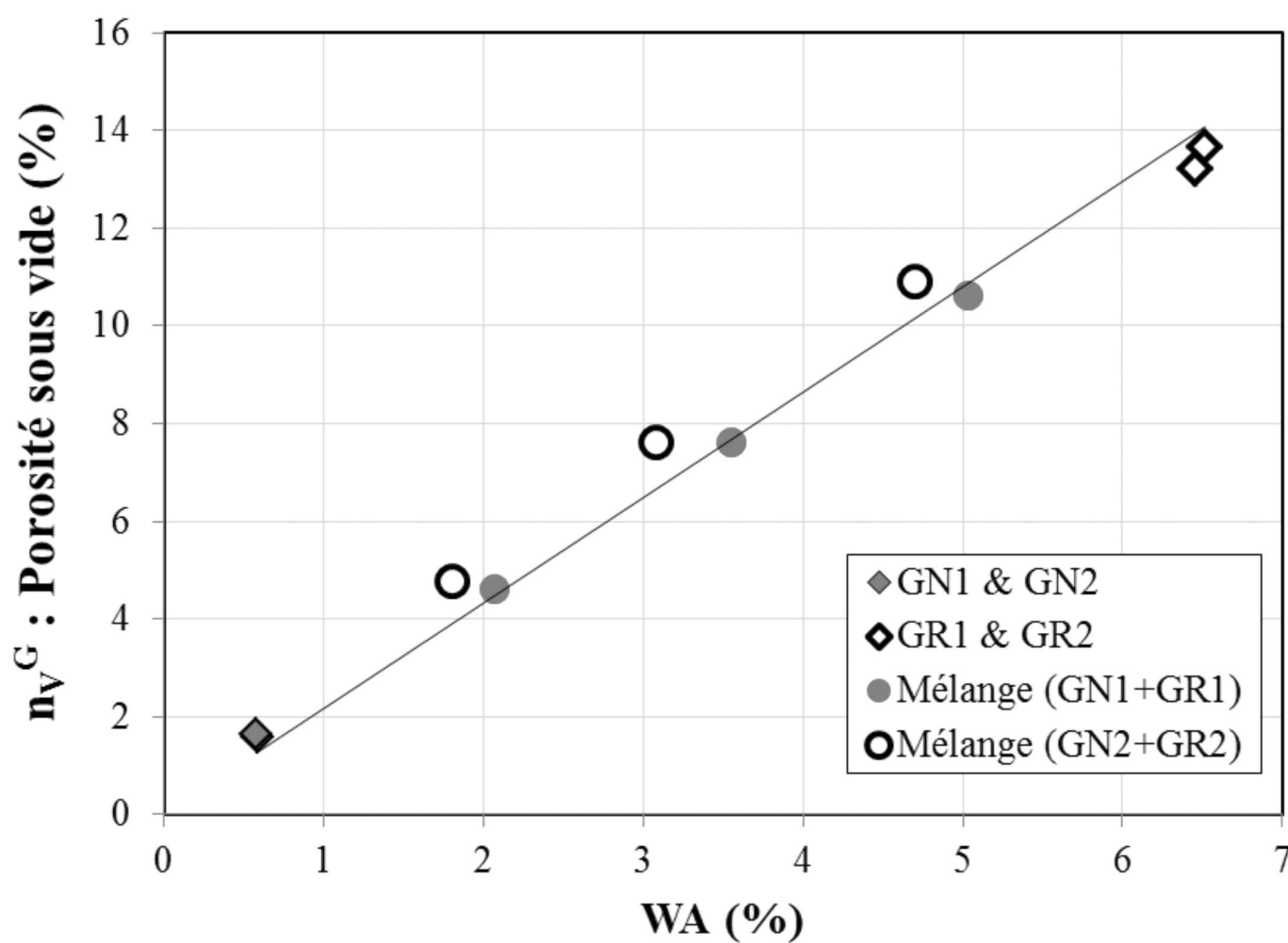


Figure 4 : La porosité des gravillons en fonction d'absorption d'eau.

méthode sous vide sont regroupées dans le **Tableau 3**. On remarque que la méthode adoptée n'affecte guère les valeurs obtenues pour les granulats naturels alors qu'elles

sont légèrement différentes pour les gravillons recyclés avec des valeurs plus importantes avec la méthode du pycnomètre.

| Masse volumique réelle (g/cm ³) | ρ_{rd}^{GR1} | ρ_{rd}^{GR2} | ρ_{rd}^{Sg} | ρ_{rd}^{GN1} | ρ_{rd}^{GN2} | ρ_{rd}^{Sg} |
|---|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| Pycnomètre [NF EN 1097-6] | 2,29 | 2,26 | 2,20 | 2,72 | 2,72 | 2,57 |
| Sous vide [NF P 18-459] | 2,23 | 2,22 | – | 2,72 | 2,71 | – |

Tableau 3 : Masse volumique des granulats.

La méthode du pycnomètre sera adoptée pour la détermination de la masse volumique des mélanges granulaires. On définit par la suite le taux de substitution des granulats naturels (GN) par les granulats recyclés (GR) par l'expression

$$r_m^G = \frac{M^{GR}}{M^{GR} + M^{GN}} \quad \text{Figure 5 montre que la loi des}$$

mélanges s'applique bien pour la prédiction de la masse volumique des mélanges granulaires (GN1et GR1 ainsi que GN2 et GR2) [2].

$$\rho_{rd}^G = r_m^G \rho_{rd}^{GR} + (1 - r_m^G) \rho_{rd}^{GN} \quad [2]$$

Sur la base des résultats expérimentaux de cette étude et ceux de la littérature [SED13] [PNR13] [ZEG 10] [CAK14] [YOU13] [WAR13&15] [DIL14] [JUA09] [MAL10] [ETX07] [MAN13] [DEJ 09] [SOA 14] [YUE 06] on montre que la masse volumique réelle des granulats augmente quand le coefficient d'absorption diminue quelque soit la nature minéralogique des granulats (Figure 6). Une loi reliant ces deux propriétés physiques a été établie [3].

$$\rho_{rd}^A = 2.72 - 0.07 \times WA_{24h}(\%) \text{ et } R^2=0,92 \quad [3]$$

$$\text{où } WA_{24} = 0 \quad \rho_{rd}^A \geq 2.72$$

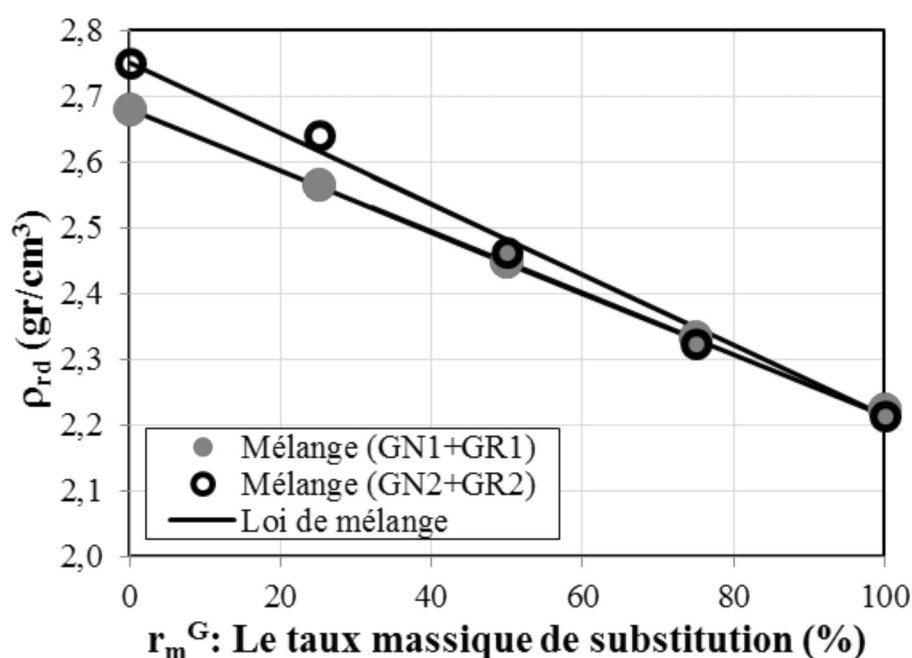
4.2. Propriétés mécaniques

Pour déterminer la résistance des granulats recyclés à la fragmentation par choc, des essais de Los Angeles ont été effectués sur les granulats de calibre 10/14 et d'autres fractions granulaires conformément à la norme NF EN 1097-2. Par ailleurs nous avons évalué la quantité de fines produites après cet essai.

On remarque que les gravillons recyclés ont un coefficient LA plus élevé que celui des gravillons naturels mais conforme aux prescriptions de la norme (Figure 7 et Tableau 4).

| Gravillons | LA (%) | LA pour $f_{ck} \geq 36 \text{ MPa}$ |
|--------------|----------------|--------------------------------------|
| GN1 (4/10) | $18,4 \pm 1,2$ | ≤ 30 |
| GN2 (6,3/20) | $17,8 \pm 0,8$ | |
| GR1 (4/10) | $30,7 \pm 0,6$ | ≤ 40 |
| GR2 (10/20) | $32,8 \pm 0,9$ | |

Tableau 4 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et préconisées pour les fractions normalisées.

Figure 5 : ρ_{rd} en fonction de taux du substitution.

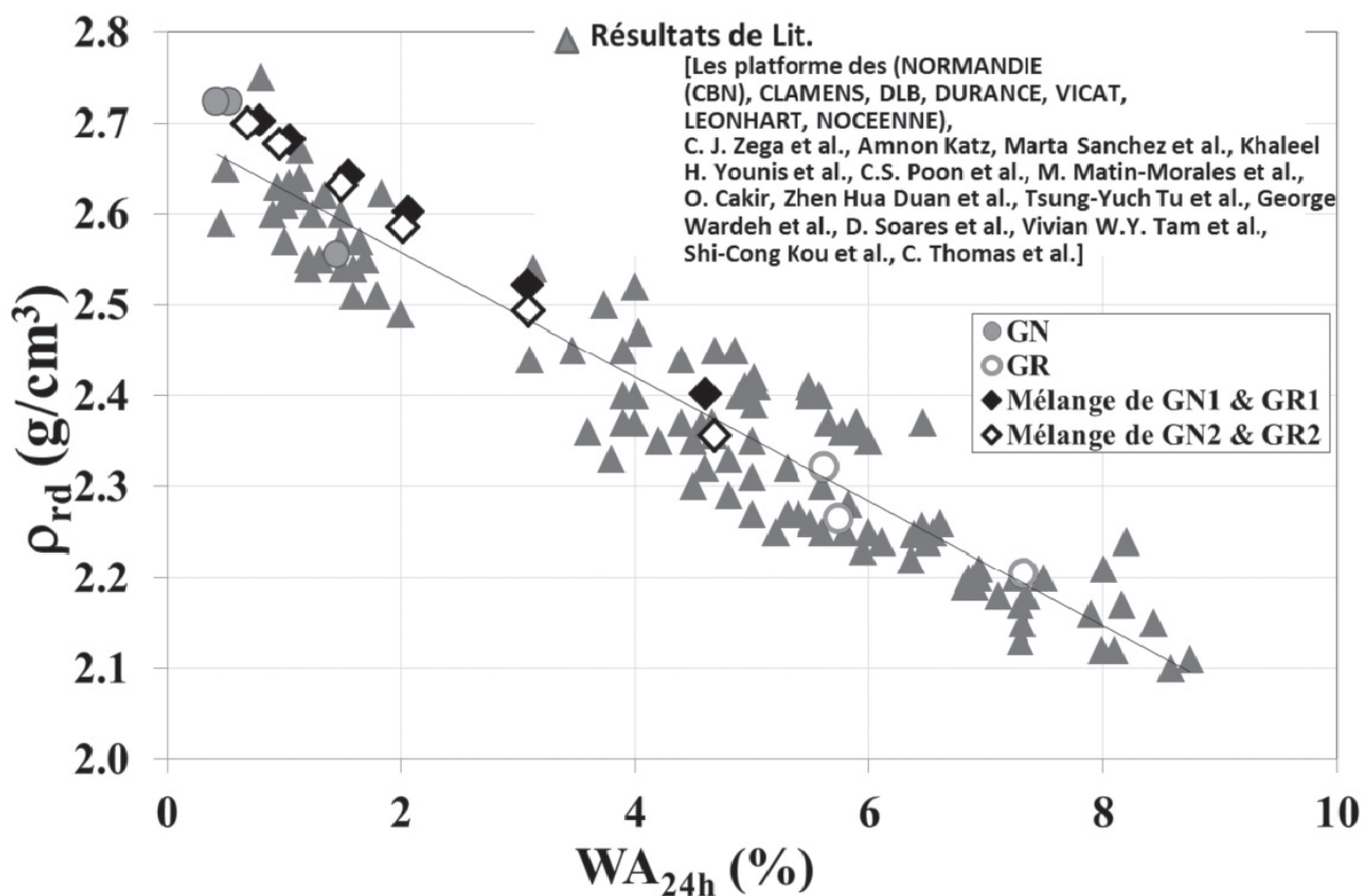


Figure 6. ρ_{rd} en fonction d'absorption d'eau.

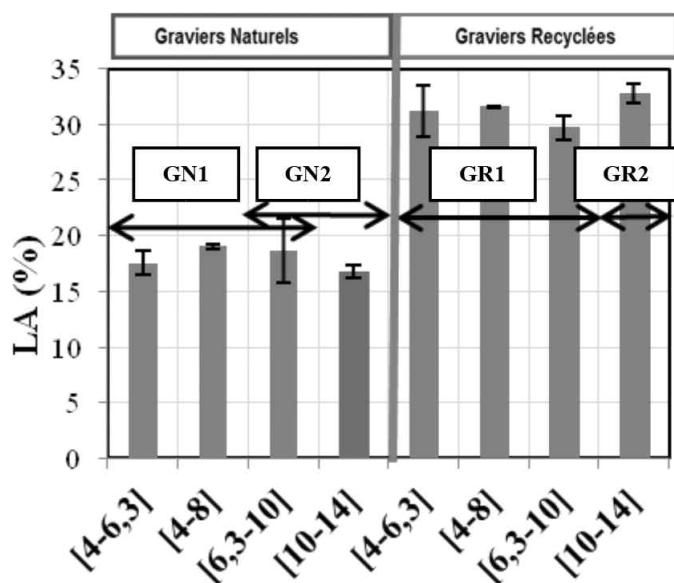


Figure 7 : LA pour les fractions des gravillons.

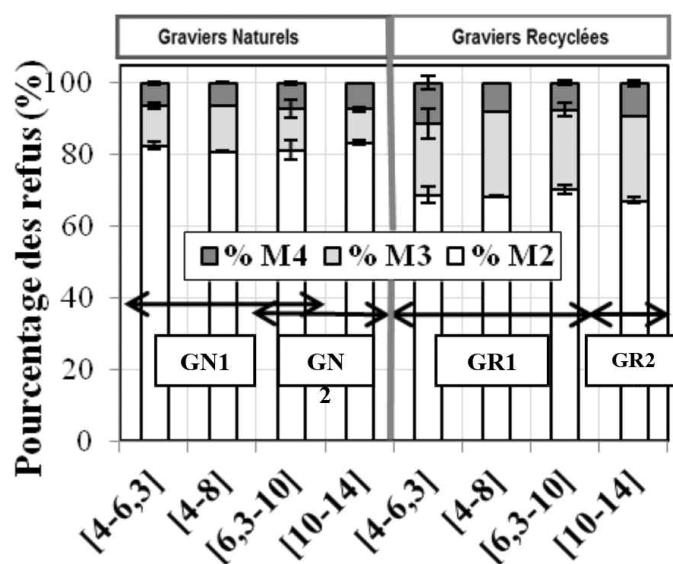


Figure 8 : M2 refus sur le tamis de $\phi 6$ mm, M3 refus sur $63\mu m$ et M4 passant sur $63\mu m$.

Les gravillons recyclés produisent deux fois plus d'éléments fins (taille inférieure à 1,6 mm) que les gravillons naturels (Figure 8) pour la coupure [4-6,3] et deux fois plus d'éléments de fraction [1,6-0,063]. Ceci prouve que les gravillons recyclés sont moins résistants au choc et au frottement que les gravillons naturels, phénomène qui

s'explique essentiellement par la présence de l'ancienne pâte cimentaire.

Les essais de LA ont été, également, réalisés sur des mélanges granulaires. On montre que la loi des mélanges [4] s'applique pour la prédiction de la résistance mécanique du mélange (Figure 9). Par ailleurs on établit que la

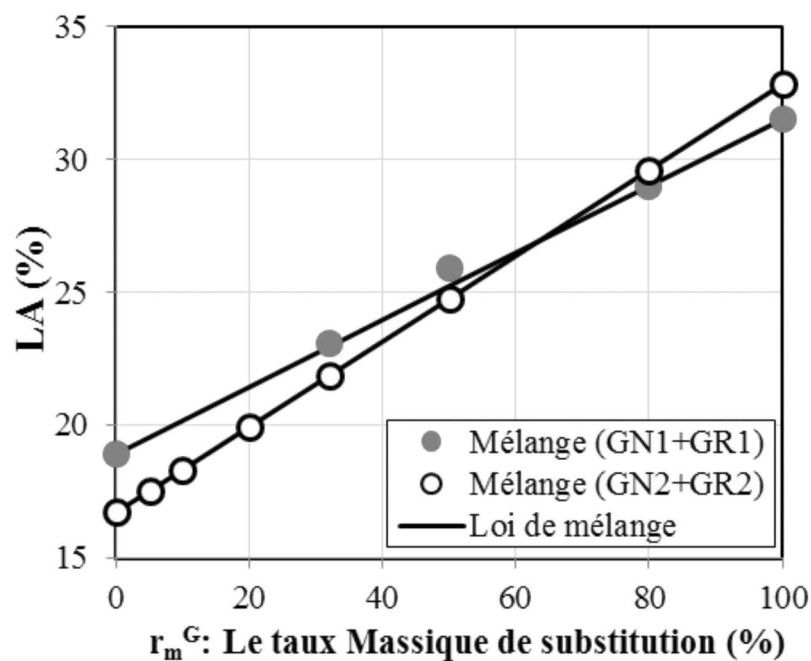


Figure 9 : Évaluation de LA en fonction du taux de substitution.

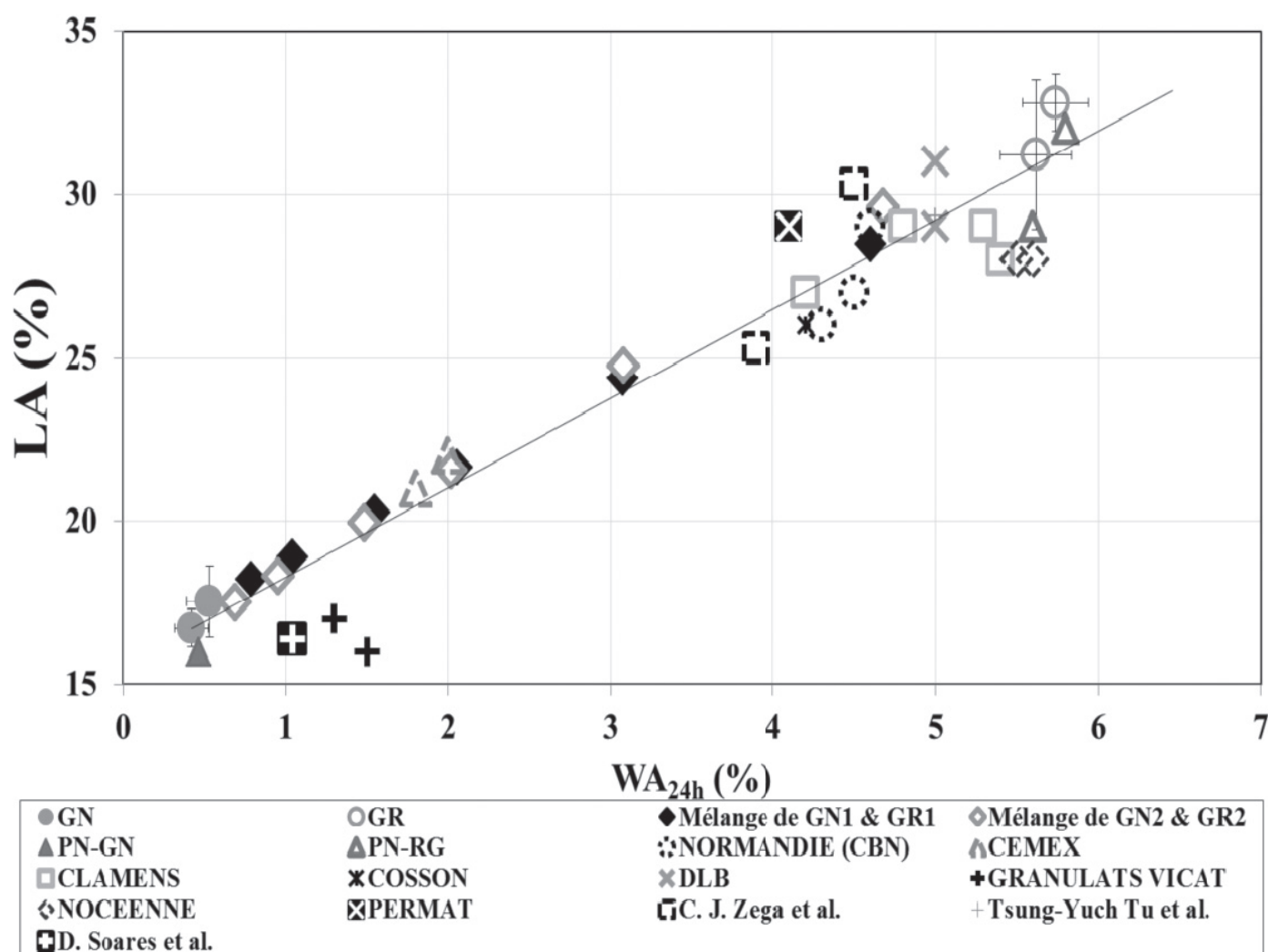


Figure 10 : LA en fonction d'absorption d'eau.

résistance mécanique du mélange granulaire est proportionnelle au coefficient d'absorption d'eau (**Figure 10**) quelque soit la nature minéralogique des gravillons. En effet, l'expression qui relie LA au WA_{24} [5] est établie sur la base des résultats expérimentaux de cette étude et ceux de la littérature [SED13] [PNR13] [SOA 14] [YUE 06] [ZEG 10].

$$LA(\%) = r_m^G LA_{\text{graviers_recyc}} + (1 - r_m^G) LA_{\text{graviers_nat}} \quad [4]$$

$$LA = 2,73WA_{24} + 15,58 \quad [5]$$

La résistance à la fragmentation par choc des gravillons augmente avec leur porosité totale (**Figure 11** et [6]) et diminue avec l'augmentation de la masse volumique réelle (**Figure 12** et [7]). Ces lois d'évolution ont été établies en utilisant les résultats expérimentaux de cette étude et ceux issus de la littérature [SED13] [PNR13] [SOA 14] [YUE 06].

$$LA(\%) = 1,25(n_v^G + 12) \quad [6]$$

$$LA(\%) = 28,72(3,31 - \rho_{rd}^G) \text{ avec } R^2=0,91 \quad [7]$$

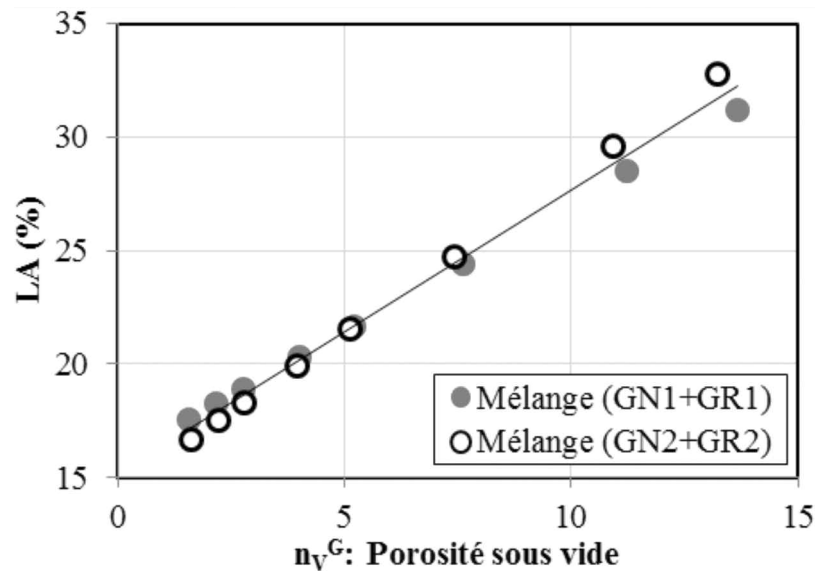


Figure 11 : Évaluation du coefficient de LA en fonction de la porosité sous vide des gravillons.

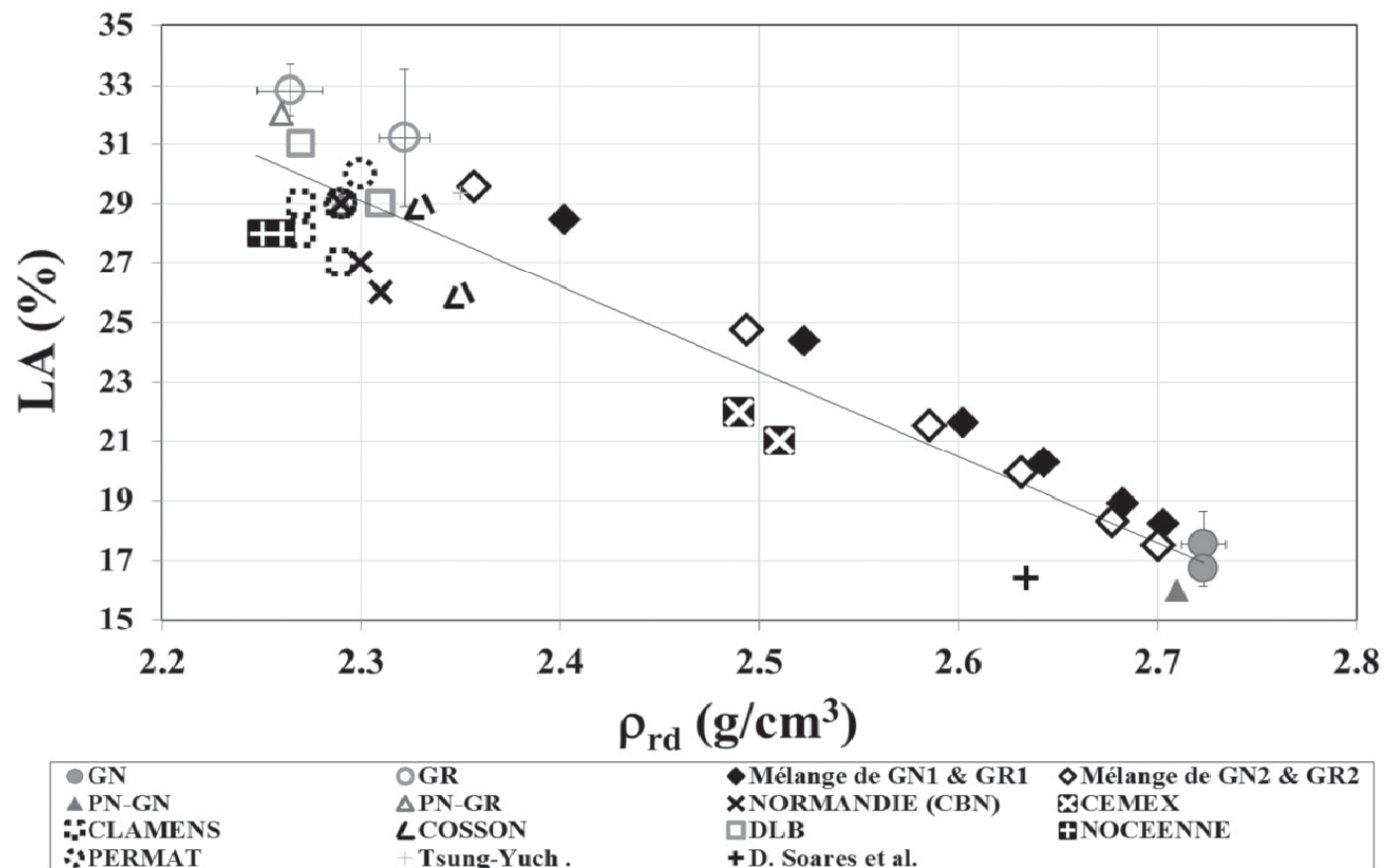


Figure 12 : LA en fonction de la masse volumique.

5. FORMULATION DES BÉTONS

Les compositions des différents bétons de cette étude sont fournies par le PN RECYBETON (**Tableau 4**). Deux classes de résistances sont considérées C25/30 et C35/40. La désignation des 8 formules (CX/Y xR-yR) fait référence à la classe de résistance suivie du taux de substitution massive du sable naturel par le sable recyclé (x%) et du gravillons naturels par les gravillons recyclés (y%).

Le taux de substitution volumique est calculé selon la

formule suivante : $r_v = \frac{V_{sable}^{recyclé} + V_{graviers}^{recyclés}}{V_{granulats}^{recyclé} + V_{granulats}^{naturels}}$ où les volumes

sont en m³/m³ de béton.

La teneur en Air Occlus, notée a, a été mesurée et on remarque qu'elle augmente avec le taux de substitution pour une classe de résistance donnée (**Tableau 5**). On sait que l'air occlus dépend fortement du rapport E/C et plus particulièrement de la classe de consistance du béton. Il décroît avec l'augmentation de l'affaissement imputée à l'influence du rapport E/C. L'un des effets les plus importants de l'air occlus est la création de vides au sein du béton durci affectant les résistances mécaniques. L'analyse des résultats obtenus, et le fait que la classe de consistance des bétons élaborés dans le cadre de cette étude est constante, montrent que l'augmentation de l'air occlus est attribuée essentiellement à la présence des granulats recyclés qui favoriserait la création de vides dans le mélange à l'état frais. Cette diminution est accrue par la diminution du rapport E/C.

5.1. Propriétés physiques des bétons durcis

La porosité totale accessible à l'eau sous vide des bétons durcis a été évaluée à 28 jours. On montre qu'elle augmente de façon proportionnelle avec la teneur en air occlus (**Figure 13**). De même, elle croît quand le taux de substitution des granulats naturels par les granulats recyclés augmente (**Figure 14**) mais avec une cinétique moins importante comparée à l'air occlus. Cette porosité est due à l'augmentation de la porosité totale des mélanges granulaires quand le taux de substitution augmente (**Figure 15**) mais également à l'augmentation du volume de la pâte (**Figure 16**).

Une analyse de cette évolution en fonction des paramètres de formulation indique que la porosité des bétons est plus impactée par le volume de la pâte (ciment+eau+air occlus) que par la porosité du squelette granulaire qui augmente avec le taux de substitution des granulats naturels par les granulats recyclés. On montre qu'une augmentation de 11% du volume de la pâte entraîne une augmentation de la porosité du béton de l'ordre de 5%. Par ailleurs, cette augmentation n'est atteinte que lorsque la porosité du mélange granulaire augmente de 200%.

5.2. Propriétés mécaniques des bétons durcis

Les résistances mécaniques des bétons à 28 jours sont représentées en fonction du coefficient LA du mélange gra-

| Constituant (kg/m ³) | C25/30 OR-OR | C25/30 30R-30R | C25/30 OR-100R | C25/30 100R-100R | C35/45 OR-OR | C35/45 30R-30R | C35/45 OR-100R | C35/45 100R-100R |
|----------------------------------|--------------|----------------|----------------|------------------|--------------|----------------|----------------|------------------|
| Eau | 172 | 179 | 183 | 200 | 167 | 172 | 179 | 183 |
| Ciment | 270 | 277 | 282 | 326 | 299 | 321 | 336 | 381 |
| Filler | 45 | 31 | 31 | 50 | 58 | 44 | 53 | 70 |
| SN | 791 | 507 | 817 | 0 | 782 | 498 | 793 | 0 |
| SR | 0 | 237 | 0 | 733 | 0 | 233 | 0 | 722 |
| GN1 | 269 | 172 | 0 | 0 | 266 | 169 | 0 | 0 |
| GR1 | 0 | 153 | 172 | 321 | 0 | 150 | 167 | 316 |
| GN2 | 826 | 556 | 0 | 0 | 816 | 546 | 0 | 0 |
| GR2 | 0 | 177 | 742 | 468 | 0 | 174 | 722 | 460 |
| SP | 1,31 | 1,08 | 1,4 | 1,18 | 2,1 | 1,64 | 2,18 | 2,78 |
| E _{eff} /C | 0,67 | 0,67 | 0,67 | 0,61 | 0,59 | 0,56 | 0,55 | 0,48 |
| E _{d'aj} /C | 0,64 | 0,65 | 0,65 | 0,61 | 0,56 | 0,54 | 0,53 | 0,48 |
| Air occlus, a (%) | 1,9 ±0,1 | 2,4 ±0,2 | 2,7 ±0,1 | 3,1 ±0,1 | 1,8 ±0,2 | 2,1 ±0,1 | 2,4 ±0,1 | 2,9 ±0,1 |
| r _v (%) | 0 | 36 | 56 | 100 | 0 | 36 | 56 | 100 |

Tableau 5 : Compositions des différentes formulations [SED13] et caractéristiques physiques à l'état frais.

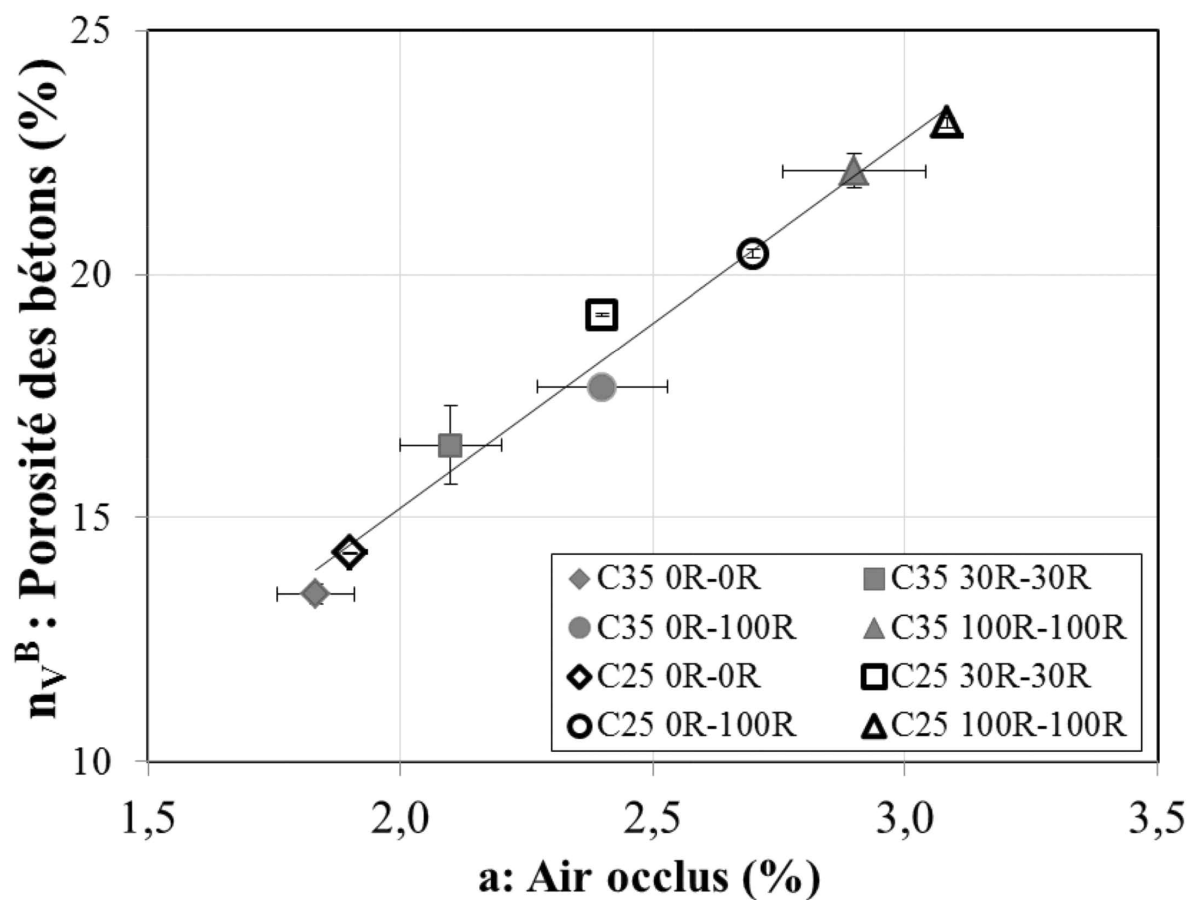


Figure 13 : Porosité sous vide en fonction de l'air occlus des bétons.

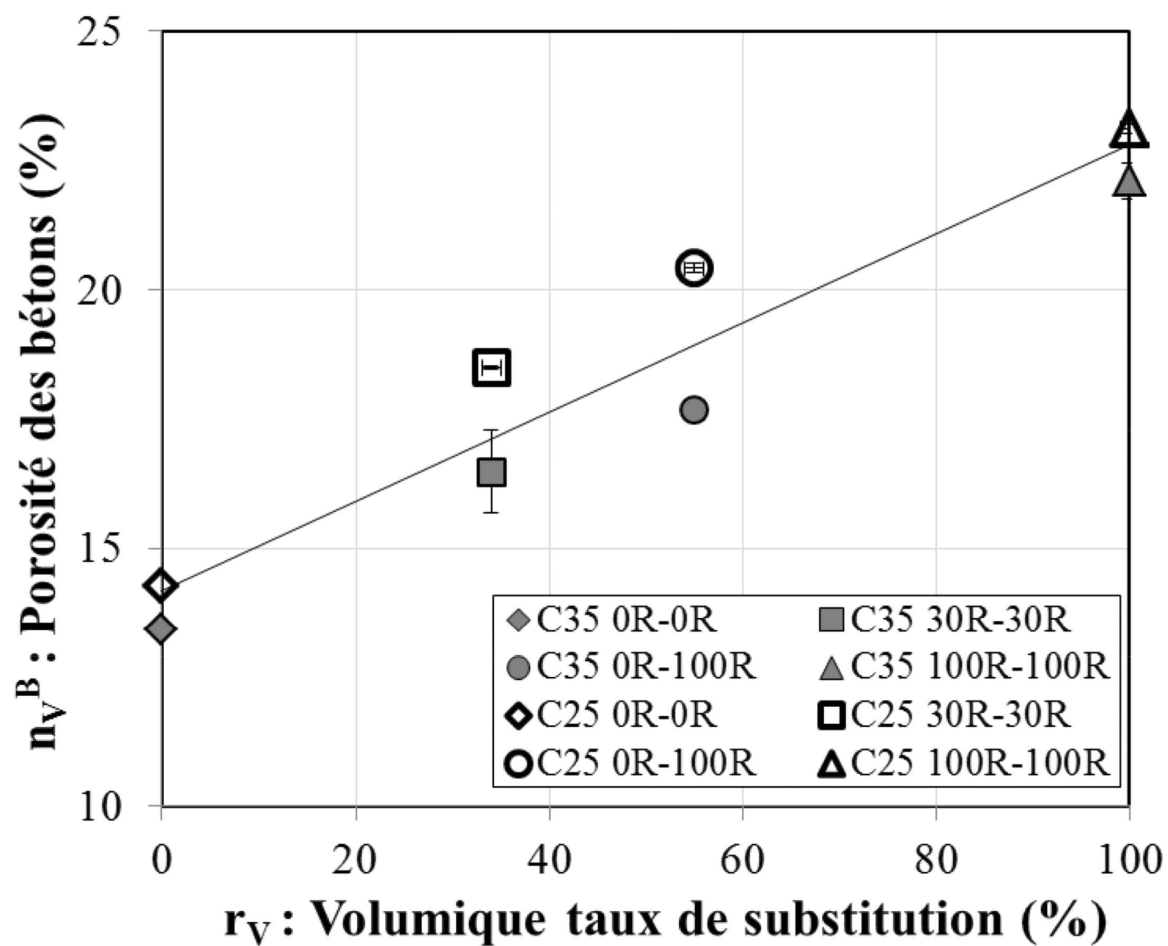


Figure 14 : Porosité sous vide des bétons en fonction de la masse volumique.

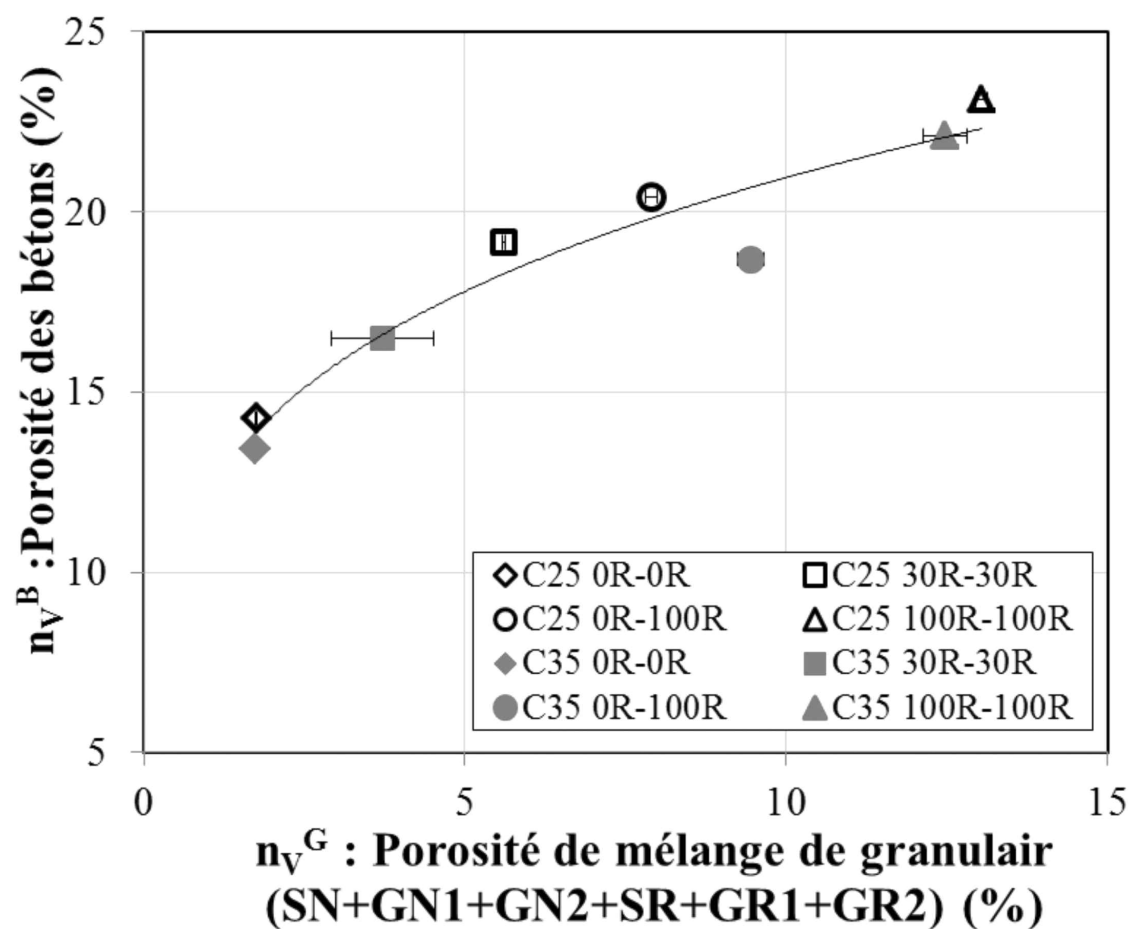


Figure 15 : Porosité sous vide de bétons en fonction de la porosité sous vide des granulats.

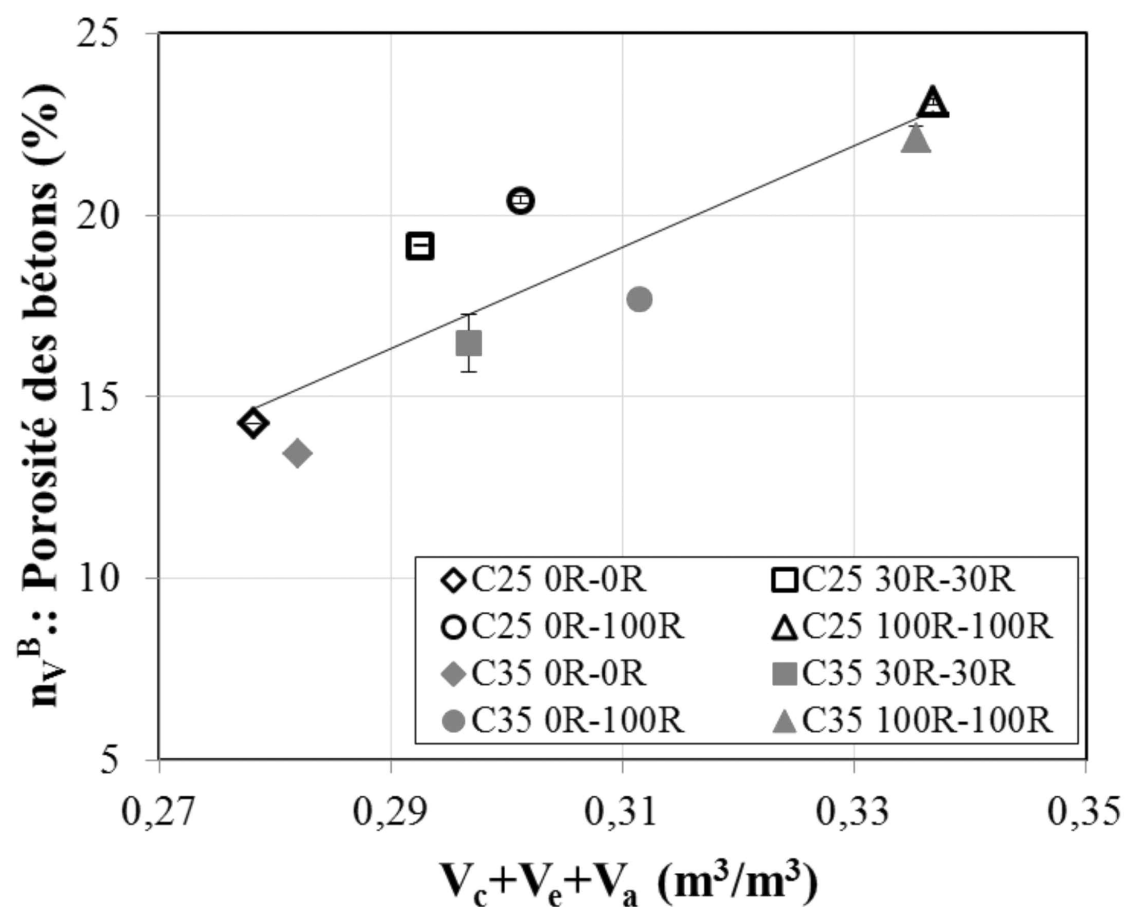


Figure 16 : Porosité sous vide en fonction du volume de ciment, de l'eau et de l'air occlus.

nulaire de chaque formulation, calculé en utilisant la loi des mélanges. On observe une bonne corrélation entre ces deux propriétés permettant de conclure que pour une classe de résistance donnée, la résistance à la compression décroît avec la diminution de la résistance à la fragmentation et au frottement des gravillons. Afin de confirmer ce constat et de l'étendre, des résultats de la littérature ont été analysés et la résistance de bétons de différentes classes de résistance a été reportée en fonction du coefficient de LA des gravillons rentrant dans la formulation (**Figure 17**). Tous les bétons étudiés ont été formulés avec des sables naturels mais des gravillons naturels et/ou recyclés. On remarque qu'une relation décroissante univoque existe entre ces deux propriétés validant le constat selon lequel la résistance à 28 jours du béton à gravillons recyclés $(f_c)_{28j}^{graviers_recyc}$ est d'autant plus faible que le taux de substitution est important [8].

$$\frac{(f_c)_{28j}^{graviers_recyc}}{(f_c)_{28j}^{graviers_nat}} = 2,8 \quad [8]$$

$$\left[r_m^G LA_{graviers_recyc} + (1 - r_m^G) LA_{graviers_nat} \right]^{-0,34} \text{ avec } R^2=0,8$$

Des essais de traction par fendage ont été également réalisés sur les bétons à 28 jours et l'effet de la substitution des gravillons naturels sur cette caractéristique a été étudié. On remarque qu'aucune corrélation n'a pu être établie avec le coefficient LA par manque de données. En effet, on ne dispose que de deux formulations ayant des taux de substitution de gravillons différents par classe de résistance. Par ailleurs, aucun résultat n'est disponible dans la littérature. Toutefois, il apparaît que la résistance au fendage diminue quand le LA augmente. En revanche on montre que la résistance à la traction décroît quand la porosité accessible à l'eau des bétons augmente (**Figure 18**).

Une relation a pu être établie [9] sur la base de nos résultats et de ceux de la littérature [CAK14][THO 13][DIL14][KOU 14][MAN13][YOU 13]. Le fait de substituer les gravillons naturels par les gravillons recyclés a pour effet d'augmenter la porosité totale des bétons et de réduire la résistance à la traction si la porosité induite est supérieure à 11% :

$$\frac{f_t^{recyclé} - f_t^{référence}}{f_t^{référence}} = 0,14 \langle n(\%) - 11 \rangle \text{ avec } R^2=0,74 \quad [9]$$

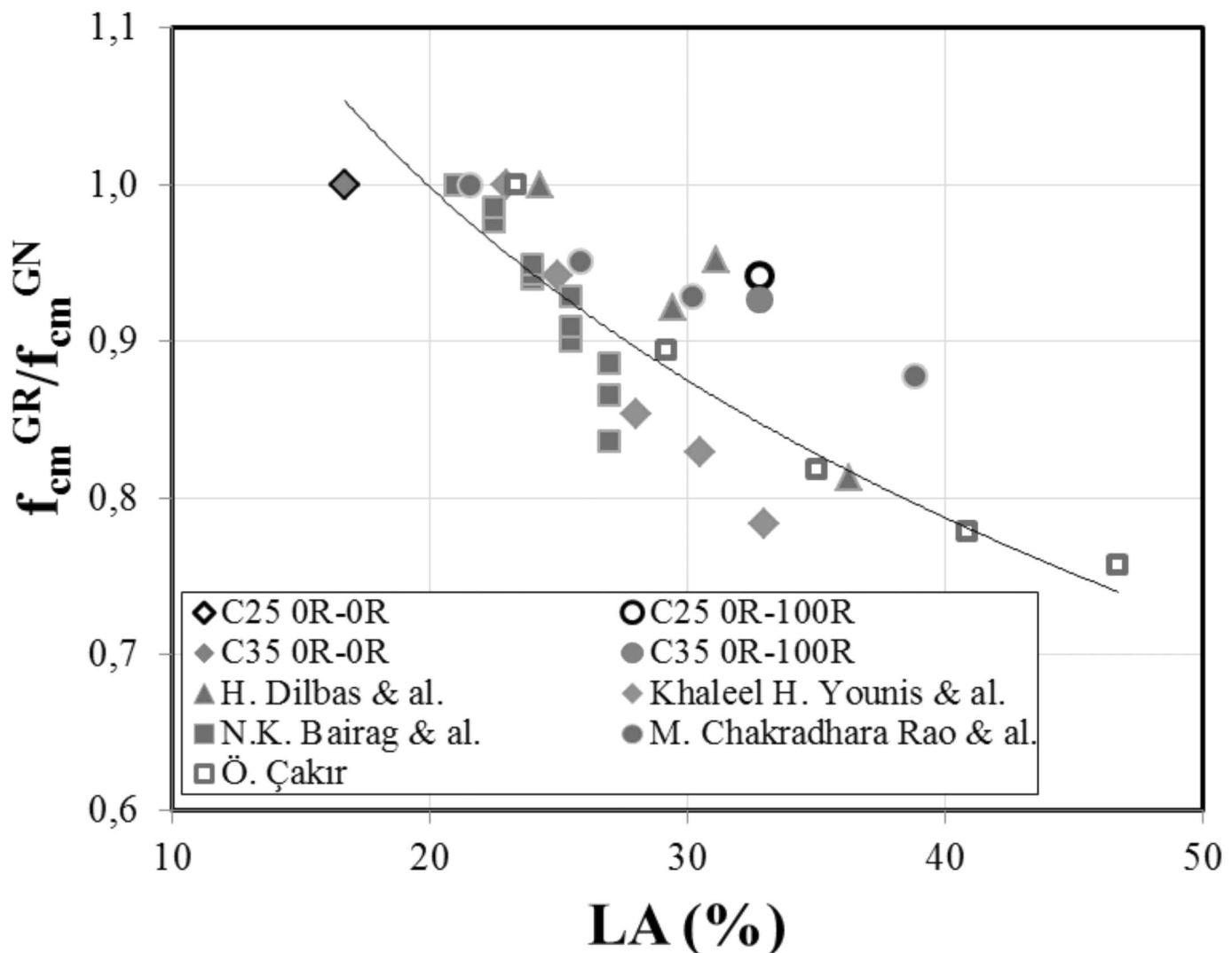


Figure 17 : Résistance à la compression de bétons en fonction de coeff. de LA des gravillons.

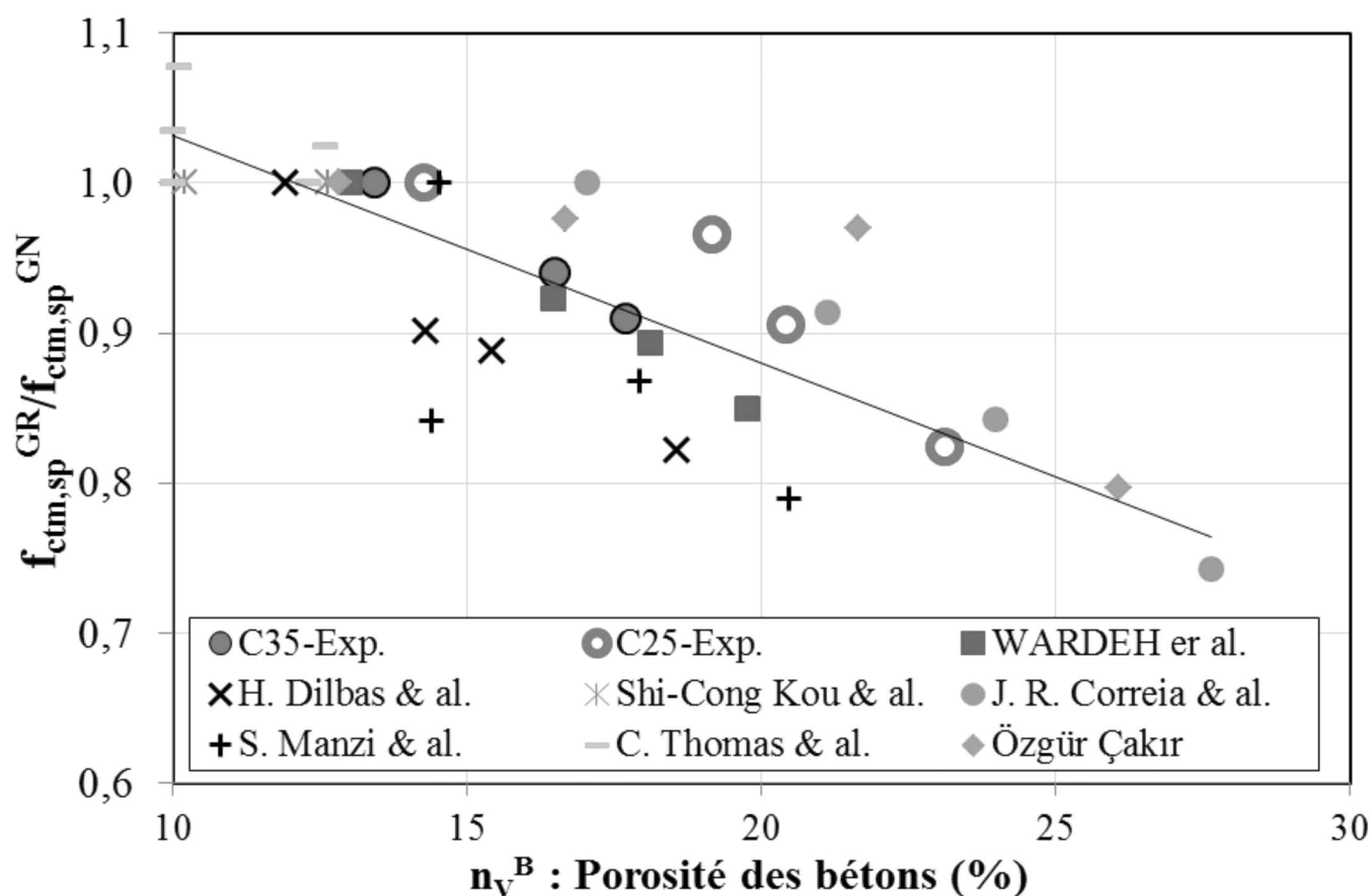


Figure 18 : Résistance à la traction de bétons en fonction la porosité des bétons.

6. CONCLUSION

On montre dans ce travail, à partir d'une caractérisation complète de granulats, l'influence de la substitution partielle ou totale des granulats naturels par des recyclés sur les propriétés physiques et mécaniques de deux séries de bétons de classe de consistance S4 mais de classe de résistance C25/30 et C35/45. Un des résultats les plus marquants consiste à annoncer que la loi des mélanges permet de prédire en toute confiance certaines propriétés physiques et mécaniques (LA , WA_{24h} et ρ_{rd}) des mélanges granulaires si on connaît celles des granulats naturels (GN) et recyclés (GR).

Pour les bétons, les essais réalisés à 28 jours, on montre que la porosité des bétons est plus impactée par le volume de la pâte (ciment+eau+air occlus) que par la porosité du squelette granulaire qui augmente avec le taux de substitution des granulats naturels par les granulats recyclés. La résistance à la compression est fonction du coefficient LA du mélange granulaire de chaque formulation, calculé en utilisant la loi des mélanges, et du taux de substitution. Une loi a été établie permettant de les relier sur la base de nos résultats expérimentaux et ceux de la littérature. Par ailleurs, la résistance à la traction décroît quand la porosité accessible à l'eau des bétons augmente. Une relation a pu être établie.

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [SED 13] T. Sédran, Mise au point des formules de béton de référence, PN Recybéton (2013).
- [PNR 13] PN Recybeton – Theme 2-1 – programme d'essai – variabilité géographique résultats 02/2013.
- [SIL 12] R.V. Silva, J. de Brito, R.K. Dhir. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. In: Construction and Building Materials 65 (2012) 201-217.
- [KOU 13] Shi-Cong Kou, Chi-sun Poon. Long term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. Cement & Concrete Composites 37 (2013) 12-19.
- [SOA 14] D. Soares, J. De Brito, J. Ferreira, J. Pacheco. Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance. Construction and Building Materials 71 (2014) 263-272.
- [YOU 13] Khaleel H. Younis, Kypros Pilakoutas. Strength prediction model and methods for improving recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials 49 (2013) 688-701.
- [ETX 07] Etxeberria M, Vaguez E, Mari A, Barra M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. Cement Concrete Res 2007;37:735-42.
- [JUA 09] De Juan MS, Gutierrez PA. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete

- aggregate. *Construction and Building Materials* 2009;23: 872-7.
- [DIL14] H. Dilbas, M. Şimşek, Ö. Çakır "An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume" *Construction and Building materials* 61 (2014) 50-59.
- [CAK 14] Ö. Çakır "Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (RAC) concrete with mineral additives" *Construction and Building Materials* 68 (2014) 17-25.
- [THO 13] C. Thomas, J. Setien, J.A. Polanco, P. Aljaejes, M. Sanchez de Juan, "Durability of recycled aggregates concrete" *Construction and Building Materials*, 40 (2013) 1054-1063.
- [KOU 14] Shi Cong Kou, Chi Sun Poon, Miren Etxeberria. "Residue strength, water absorption and pore size distributions of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures" *Cement & Concrete Composites* 53 (2014) 73-82.
- [MAN13] S. Manzi, C. Mazzotti, M.C. Bignozzi "Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate" *Cement & Concrete Composites* 37 (2013) 312-318.
- [BEL 11] Belén, G.-F., Fernando, M.-A., Carro Lopex, D., and Seara-Paz S. "Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate." *Construction and Building materials* 25(5), 2335-2342 (2011).
- [BEL 13] Belin, P., Habert, G. and Thiery, M., 'Cement paste content and water absorption of recycled concrete coarse aggregates' *Construction and Building materials* 1-15 10.1617/s11527-013-0128-z (2013).
- [JUA 09] Marta Sánchez de Juan a, Pilar Alaejos Gutiérrez, "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate" *Construction and Building Materials* 23 (2009) 872-877.
- [MAL10] Mirjana Malešev, Vlastimir Radonjanin and Snežana Marinković, "Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production" *Sustainability* (2010), 2, 1204-1225; doi:10.3390/su2051204.
- [KOU 12] S.C. Kou, C.S. Poon. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials* 35 (2012) 69-76.
- [CHA 11] M. Chakradhara Rao, S. K. Bhattacharyya. Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures* (2011) 44:205-220. DOI 10.1617/s11527-010-9620-x.
- [BAI 93] N.K. Bairag, Kishore Ravande and V.K. Pareek. Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates. *Conservation and Recycling*. 9 (1993) 109-126.
- [WAR 13] G. Wardeh, E. Ghorbel, « EUROCODE 2 : Application aux bétons à graviers recyclés ». *Annales du bâtiment et des travaux publics*. Août 2013. pp 1-6.
- [WAR 15] George Wardeh, E. Ghorbel, H. Gomart. "Mix Design and Properties of Recycled Aggregate Concretes: Applicability of Eurocode 2", *International Journal of Concrete Structures and Materials* Vol.9, No.1, pp.1-20, Mar2015.
- [XIA 05] Xiao, J., J. Li, et al. (2005). "Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading." *Cement and Concrete Research* 35(6): 1187-1194.
- [YUE 06] T. T-sung-Yueh, C. Yuen-Yuen et H. Chao-Lung, "Properties of HPC with recycled aggregates," *Cement and Concrete Research*, vol. 36, pp. 943-950, 2006.
- [ZEG 10] C. J. Zega, Y. A. Villagran-Zaccardi et A. A. Di-Maio, "Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates," *Materials and Structures*, vol. 43, no. DOI 10.1617/s11527-009-9480-4, pp. 195-202, 2010.
- [CAS 08] Casuccio, M., M. C. Torrijos, et al. (2008). "Failure mechanism of recycled aggregate concrete." *Construction and Building Materials* 22(7): 1500-1506.
- [DEJ 09] de Juan, M. S. n. and P. A. Gutiérrez (2009). "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate." *Construction and Building Materials* 23(2): 872-877.
- [EVA 07] Evangelista, L. and J. de Brito (2007). "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates." *Cement and Concrete Composites* 29(5): 397-401.