



Projet National de recherche et développement

THEME 2 - Matériaux et Structures

Comportement structurel : effort tranchant

Rédigé par

George WARDEH

Bruno FIORIO

Elhem GHORBEL

Hector GOMART

Prosper PLIYA

L2MGC – Université de Cergy-Pontoise

R/17/RECY/043

LC/15/RECY/78

Juillet 2017

Site internet : www.pnrecybeton.fr

Président : Jacques ROUDIER

Directeur : Horacio COLINA

Directeur Scientifique : François DE LARRARD

Gestion administrative et financière : IREX, 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr

Sommaire

1 Introduction	1
2 Rappel théorique	3
2. 1 Modes de transfert de l'effort tranchant dans les éléments en béton armé	3
2. 2 Rupture à l'effort tranchant	6
2.2. 1 Poutres très élancées ($a/d > 6$).....	6
2.2. 2 Poutres élancées ($2,5 < a/d \leq 6$)	6
2.2. 3 Poutres profondes (poutres-voiles) ($1 < a/d \leq 2,5$)	7
2.2. 4 Poutres très profondes ($a/d \leq 1$)	7
2. 3 Résistance au cisaillement selon l'Eurocode2	8
2. 4 Résistance au cisaillement selon les modèles basés sur la mécanique de la rupture.....	10
2. 5 Revue bibliographique sur le comportement des éléments armés en béton incorporant des gravillons recyclés	11
3 Programme expérimental	13
3. 1 Caractérisation des matériaux	13
3.1. 1 Granulats	13
3.1. 2 Ciment	16
3.1. 3 Filler calcaire.....	16
3.1. 4 Superplastifiant.....	16
3.1. 5 Les aciers	16
3. 2 Formulations des bétons.....	17
3. 3 Description des poutres étudiées	19
3. 4 Instrumentation.....	20
3. 5 Procédures expérimentales	21
4 Résultats expérimentaux et observations	23
4. 1 Propriétés mécaniques des bétons durcis	23

4. 2 Comportement global des poutres sans armature transversale.....	23
4. 3 Courbes Force-flèche	26
4. 4 Observations macroscopiques des surfaces de rupture	30
4. 5 Comparaison des résultats avec les prédictions	32
5 Conclusions et perspectives	32

RÉSUMÉ

Les résultats d'un programme expérimental sur le comportement à l'effort tranchant du béton formulé avec des granulats naturels et avec 100 % des granulats recyclés sont présentés dans cette étude. Des poutres en béton armé de dimensions 20x25x190 cm ont été confectionnées sans armatures transversales en utilisant deux formulations C35/45-0R-0R et C35/45-100R-100R. Les poutres ont été soumises à la flexion 4 points pour deux rapports a/d (portée du cisaillement/hauteur utile) de 1,5 et 3. Les propriétés mécaniques des deux formulations ont été déterminées en termes de résistance à la compression, de résistance à la traction par fendage et de module d'élasticité dynamique.

Les résultats expérimentaux montrent que, pour la même classe de résistance à la compression, les mécanismes de rupture par effort tranchant du béton des granulats recyclés sont identiques à ceux du béton conventionnel de granulats naturels. On note aussi une résistance au cisaillement plus faible ; une diminution qui est compatible avec la réduction de la résistance à la traction du béton C35/45-100R-100R par rapport à celle du béton C35/45-100R-100R. De plus, les courbes force-déplacement des poutres en béton de granulats recyclés ont montré une pente plus faible que celles en béton des granulats naturels.

Les surfaces de ruptures ont été observées macroscopiquement et microscopiquement pour les poutres testées avec un rapport $a/d = 3$. Il a été constaté que la rupture se fait majoritairement par le décollement des granulats dans le cas des bétons de granulats naturels alors qu'elle se produit par la rupture des granulats avec un réseau de fissures plus dense dans le cas des bétons de granulats recyclés.

Enfin, les résultats expérimentaux ont été comparés aux valeurs prédites par les relations proposées dans l'Eurocode 2 et dans quelques références bibliographiques et il a été trouvé que ces équations pourraient s'appliquer aux bétons de granulats recyclés en toute sécurité.

ABSTRACT

The results from an experimental on the shear behavior of concrete made with natural aggregates (NAC) and 100% recycled aggregates (RAC) are presented in this study. Full scale 20x25x190 cm reinforced concrete beams without stirrups were manufactured from two mixtures C35/45-0R-0R et C35/45-100R-100R. The beams were tested under 4 points bending for shear span-to-depth ratios (a/d) equal to 1.5 and 3.0. The mechanical properties of the two mixtures were characterized in terms of compressive strength, splitting tensile strength, and modulus of elasticity.

The experimental results show that, for the same class of compressive strength, the shear failure mechanisms in recycled aggregate concretes are the same compared to the natural aggregate concretes while the shear strength is lower. The decrease in the shear strength is consistent with the decrease in the splitting tensile strength of C35/45-100R-100R mixtures compared to the C35/45-0R-0R mixtures. In terms of load–deflection response, RAC beams showed flatter slopes compared to the NAC beams. Fracture surfaces of beams with $a/d = 3$ were observed by using an optical microscope for both NAC and RAC. It was found that the failure of NAC beams is done mainly by the detachment of natural aggregates whereas it occurs by the rupture of recycled ones with a denser cracking network in the case of RAC beams.

The experimental shear strengths were compared with the shear provisions of design standard Eurocode 2 and some references. It is found that the design equations remain applicable to reinforced recycled aggregate concretes.

1 INTRODUCTION

Cette étude s'inscrit dans le cadre du thème 2 du projet national Recybéton. Elle a pour objectif d'analyser l'effet de la substitution des granulats naturels par des granulats recyclés sur la capacité des éléments de structure à résister aux contraintes dues à l'effort tranchant sans armatures transversales.

La rupture due à l'effort tranchant est une rupture fragile qui se produit si la résistance du béton au cisaillement est insuffisante. Lorsque le niveau de chargement est élevé, des fissures inclinées apparaissent près des appuis vers le point d'application de la charge (Figure 1).



Figure 1 : Rupture par effort tranchant (cours BA, G. WARDEH IUT GC Toulouse III 2006).

Trois modes de rupture peuvent se présenter en fonction du rapport (a/d) où a représente la distance entre le point d'application d'une charge et le nu de l'appui le plus proche tandis que d représente la hauteur utile de la section transversale (Figure 2). Ces modes sont expliqués en détail dans le paragraphe 2.2.

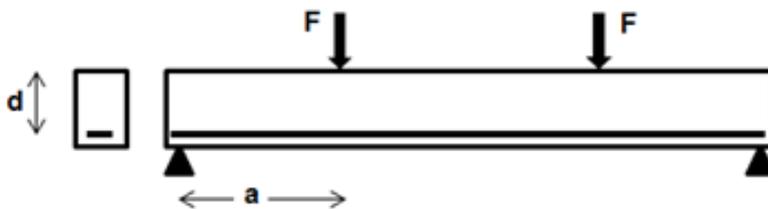


Figure 2 : Caractéristiques géométriques des poutres.

La résistance à l'effort tranchant d'un élément de structure est assurée par plusieurs contributions : le béton comprimé, l'armature transversale, l'engrènement des granulats le long de la fissure et l'effet goujon de l'armature longitudinale.

L'objectif du présent programme de recherche est d'étudier l'effet de la substitution des granulats naturels par des granulats recyclés sur la capacité des éléments de structure à reprendre les contraintes liées à l'effort tranchant sans armatures transversales. L'étude proposée permet ainsi d'accéder à une caractérisation fine du comportement à l'effort tranchant des poutres confectionnées à partir de granulats recyclés et d'approfondir la connaissance des mécanismes de rupture en fonction de la longueur de cisaillement. Les résultats permettront de répondre aux questions liées à l'utilisation des granulats recyclés vis-à-vis de la vérification de la résistance à l'effort tranchant :

- I. L'Eurocode 2 risque-t-il de surestimer la résistance du béton de granulats recyclés sans armatures transversales du fait de l'affaiblissement relatif de la résistance à la traction qui est d'autant plus marqué que le taux de substitution des granulats normaux par des granulats recyclés soit élevé ?
- II. Au niveau microscopique, y a-t-il une modification des modes de rupture par effort tranchant du fait de la faible rigidité des granulats recyclés ?

Pour répondre à ces questions, des poutres sans armatures transversales ont été confectionnées à partir de formulations de béton de classe C35/45-0R-0R et C35/45-100R-100R. Ces formulations ont été retenues sur la base des résultats issus de la tranche 2 sur l'adhérence béton recyclé/armatures HA.

Douze poutres sans armatures transversales, de section transversale 200x250 mm et de longueur 1900 mm, sont étudiées de la manière suivante :

- 3 poutres C35/45-0R-0R avec un ratio $a/d = 1,5$;
- 3 poutres C35/45-100R-100R avec un ratio $a/d = 1,5$;
- 3 poutres C35/45-0R-0R avec un ratio $a/d = 3,0$;
- 3 poutres C35/45-100R-100 avec un ratio $a/d = 3,0$.

Les poutres sont fortement ferrillées au niveau des armatures longitudinales (4HA16) afin d'obtenir une rupture par effort tranchant .Au cours de chaque essai, l'évolution de la fissuration, la flèche à mi-travée, ainsi que la déformation du béton et celle de l'acier sont enregistrées afin d'étudier le comportement global des poutres en régime pré-pic et post-pic,

puis d'identifier l'influence des matériaux recyclés sur le comportement. Enfin, la zone de l'effort tranchant est filmée jusqu'à la rupture.

Chaque essai est complété par une analyse macroscopique et microscopique de la surface de rupture pour étudier l'effet des granulats recyclés sur les modes de ruptures par effort tranchant. Afin de pouvoir interpréter les résultats obtenus, le comportement mécanique des matériaux aciers et bétons est caractérisé. Pour les bétons, il s'agit de préparer des éprouvettes cylindriques qui sont testées à la même échéance que les poutres afin de déterminer les résistances à la compression et à la traction par fendage, ainsi que le module d'élasticité.

2 RAPPEL THEORIQUE

2. 1 Modes de transfert de l'effort tranchant dans les éléments en béton armé

Le comportement d'une poutre en béton armé est élastique linéaire avant la fissuration. Les contraintes dues à l'effort de flexion sont linéairement réparties sur la section, avec leurs valeurs maximale et minimale au niveau des deux fibres extrêmes. Les contraintes de cisaillement, par contre, suivent une répartition parabolique, avec une valeur maximale sur l'axe neutre et nulle aux fibres extrêmes. Sur l'axe neutre, la contrainte de cisaillement coïncide avec deux contraintes principales, une de traction et l'autre de compression, inclinées de 45° dans les deux sens par rapport à l'axe de la poutre (Figure 3).

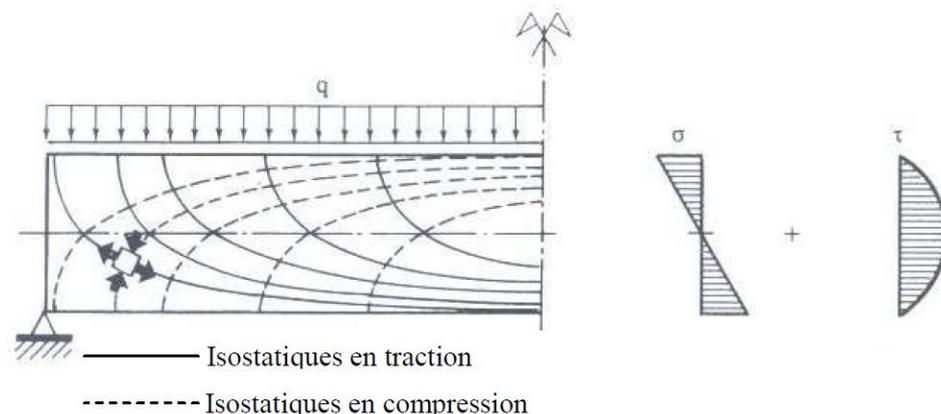


Figure 3 : Contraintes principales dans une poutre non fissurée.

Sous chargement croissant, lorsque de traction atteint la résistance du béton à la traction, la première fissure, dite de flexion, s'initie. L'augmentation de la charge appliquée élargit la zone où le moment fléchissant dépasse la valeur caractéristique de fissuration et provoque la

formation d'autres fissures de flexion. Ces fissures sont contrôlées par l'armature longitudinale et le béton comprimé.

Pour garantir la transmission de l'effort tranchant aux appuis, les principaux modes de transmission sont les suivants :

- **Contribution du béton comprimé** : un effort tranchant peut être transmis vers les appuis par le développement d'une bielle inclinée au-delà de la zone fissurée.
- **L'effet d'engrènement (aggregate interlock)** : le frottement entre les deux lèvres d'une fissure permet la transmission d'efforts de part et d'autre de celle-ci. Les contraintes transmises sont inversement proportionnelles à l'ouverture de la fissure.
- **L'effet goujon de l'armature longitudinale (dowel effect)** : l'armature longitudinale dispose d'une certaine rigidité au cisaillement. Cette rigidité permet la transmission de l'effort de part et d'autre de chaque fissure.

Les trois mécanismes sont représentés sur la Figure 4 pour une poutre sans armatures transversales. L'effort de cisaillement, noté V_{ex} , est compensé par trois contributions de forces internes, à savoir : (i) la force de cisaillement dans le béton comprimé, V_{cz} , (ii) l'engrènement des granulats, V_a , ainsi que (iii) l'effet goujon des aciers longitudinaux, V_d . L'équilibre statique du tronçon étudié s'exprime par la relation suivante :

$$V_{ex} = V_{Cz} + V_a + V_d . \quad \text{Equation 1}$$

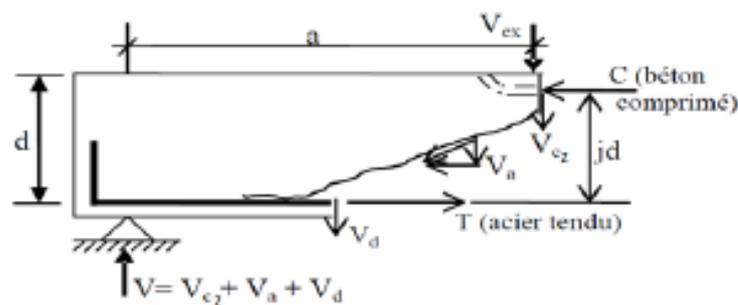


Figure 4 : Mécanismes de transmission de l'effort tranchant.

Avec l'ouverture de la fissure diagonale, V_a et V_d deviennent négligeables ce qui force V_{cz} à reprendre tout l'effort et donc la rupture de la poutre se produit par écrasement du béton. De nombreux chercheurs ont tenté de déterminer la contribution de chaque mécanisme pour résister à la force de cisaillement. Il a été conclu que les proportions sont les suivantes :

- $V_{cz} = 20$ à 40 % de V_{ex} ;
- $V_d = 15$ à 20 % ;
- $V_a = 15$ à 50 %.

D'après l'étude de Fenwick et Paulay [1], une poutre rectangulaire sans armatures transversales peut résister au cisaillement et à la flexion au moyen de l'effet voûte (Figure 5). La poutre se comporte en effet comme se comporte comme un arc-tirant.

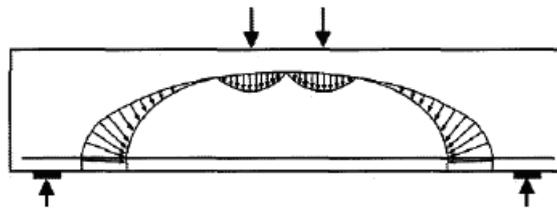


Figure 5 : Fonctionnement d'une poutre rectangulaire sans armatures transversales.

Leonhard et Walter [2] étaient parmi les premiers chercheurs qui se sont intéressés au comportement des éléments armés à l'effort tranchant. Ils ont trouvé que la charge de rupture par le cisaillement dépendait de plusieurs paramètres tels que le ferrailage principal, l'adhérence acier/béton, ainsi que le type de chargement (ponctuel ou réparti). Enfin, ils ont tenté d'étudier l'effet de la taille de l'élément sur sa résistance au cisaillement et ont conclu que cette résistance diminuait si la taille de l'élément augmentait. Quelques années plus tard, Kani [3] a pu montrer que la rupture par effort tranchant dépend du rapport entre la longueur de la portée d'effort tranchant a et la hauteur utile de la section d lorsque tous les autres paramètres sont maintenus constants. Il a montré, en regroupant toutes les données, que les ruptures prématurées s'observent généralement pour des élancements a/d compris entre 2 et 3 (Figure 6). Il peut être observé sur cette figure, que lorsque le taux de ferrailage diminue, ce point de transition disparaît et la résistance de l'élément à l'effort tranchant augmente. Par ailleurs, pour un rapport a/d au-delà du point critique, une fissure critique peut se propager d'une façon instable et provoquer une rupture fragile de la zone comprimée alors qu'en deçà dudit point, la propagation des fissures est stable.

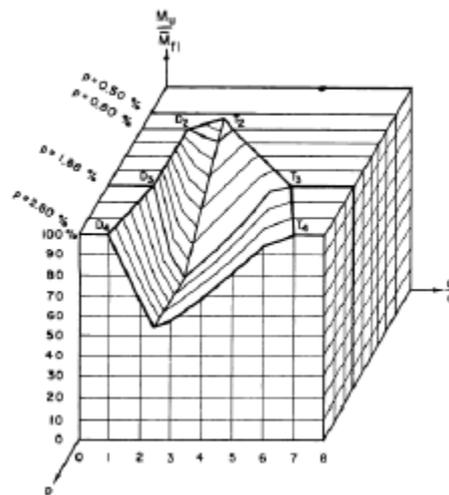


Figure 6 : Résistance relative des poutres en fonction de a/d et de ρ selon Kani [3].

2. 2 Rupture à l'effort tranchant

Les différents modes de rupture sont décrits dans ce paragraphe en fonction du rapport a/d .

2.2. 1 Poutres très élancées ($a/d > 6$)

Pour cette configuration la rupture est due au moment fléchissant même avant l'apparition d'une fissure inclinée (Figure 7). Si la poutre est sous ferrailée la rupture se fait par la plastification de l'acier tendu tandis qu'elle se fait par l'écrasement du béton comprimé si l'élément est sur ferrailé.

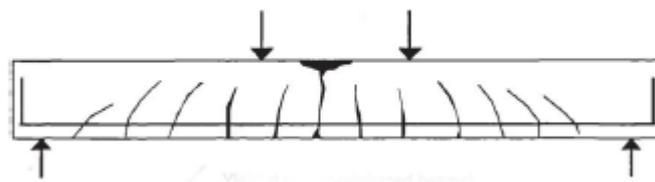


Figure 7 : Rupture due au moment fléchissant.

2.2. 2 Poutres élancées ($2,5 < a/d \leq 6$)

Une fissure diagonale s'amorce à partir de la dernière fissure formée en flexion et se propage brutalement vers la zone du béton comprimé. Si le rapport a/d est suffisamment grand, on aura une rupture par traction diagonale (« *diagonal tension failure* », en anglais) (Figure 8).

Si a/d est proche de 2,5, des fissures secondaires peuvent se propager le long de l'armature longitudinale en provoquant la rupture de l'adhérence armature/béton. Ce mode de rupture est appelé rupture par tension-cisaillement (« *shear tension failure* ») ou rupture par adhérence-cisaillement ("shear bond failure").

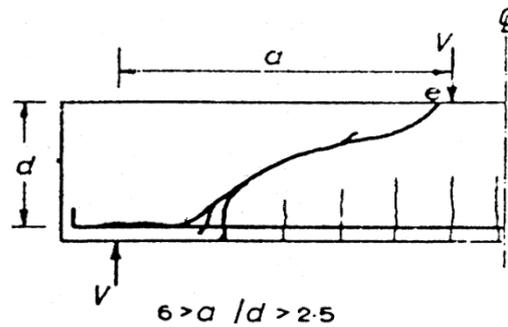


Figure 8 : Poutre élancée ($2,5 < a/d \leq 6$).

2.2. 3 Poutres profondes (poutres-voiles) ($1 < a/d \leq 2,5$)

Le mode est parfois appelé rupture par compression-cisaillement (« *shear compression failure* ») si la fissure diagonale atteint la zone comprimée sans le développement des fissures secondaires. La résistance à l'effort tranchant dans ce cas est supérieure à la résistance relative à la rupture par traction diagonale en raison de l'effet voûte (Figure 9).

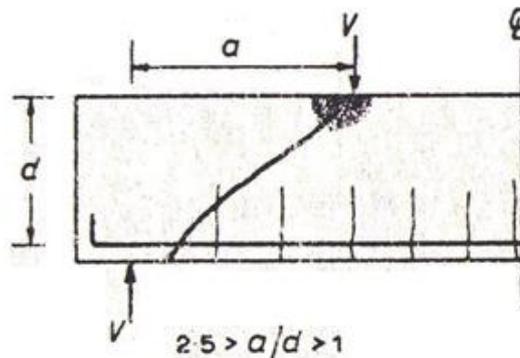


Figure 9 : Poutre profonde ($1 < a/d \leq 2,5$).

2.2. 4 Poutres très profondes ($a/d \leq 1$)

Pour les poutres dites profondes, la fissuration se forme le long d'une ligne reliant la charge et l'appui. Ce mode de rupture est appelé mode de rupture d'une poutre profonde « *deep beam failure mode* ».

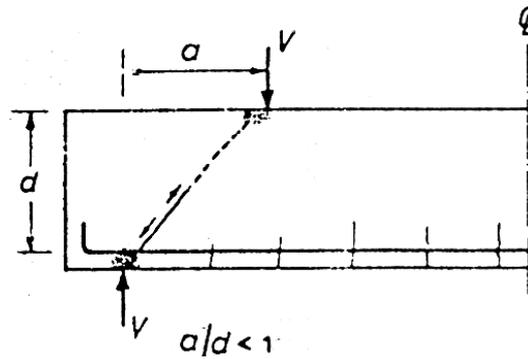


Figure 10 : Poutres très profondes ($a/d \leq 1$).

2. 3 Résistance au cisaillement selon l'Eurocode2

L'effort tranchant résistant de calcul, $V_{Rd,c}$, est donné par l'Equation 2 qui tient compte de l'effet d'échelle et de l'effet de goujon [4] :

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3}] b_w d , \quad \text{Equation 2}$$

avec une valeur minimale :

$$V_{Rd,c} = [0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}] b_w d$$

avec :

- f_{ck} : la résistance caractéristique en compression du béton en MPa, mesurée sur cylindre à 28 jours ;
- $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$;
- $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0,02$ le taux d'armatures longitudinales ;
- A_{sl} : l'aire de la section des armatures tendues prolongées sur appuis ;
- b_w : la plus petite largeur de la section droite dans la zone tendue, en mm ;
- d : la hauteur utile de la section en mm ;
- $C_{Rd,k} = \frac{0,18}{\gamma_c}$ avec $\gamma_c = 1,5$.

L'effet d'échelle est pris en compte au moyen du paramètre $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$ qui traduit le fait que lorsque la hauteur utile d , est supérieure à 200 mm, la résistance à l'effort tranchant diminue.

Lorsque des charges sont appliquées sur la face supérieure de l'élément à une distance a_v du nu de l'appui telle que $0,5d \leq a_v < 2d$, la contribution de cette charge à l'effort tranchant agissant V_{Ed} , peut être multipliée par $\beta = \frac{a_v}{2d}$ (Figure 11). Cette réduction peut être appliquée pour la vérification de $V_{RD,c}$ dans l'Equation 2 (cf. équation 6.2 de l'EC2). Ceci n'est valable que si les armatures longitudinales sont totalement ancrées au droit de l'appui.

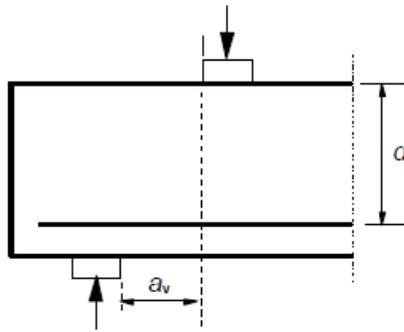


Figure 11 : Poutre avec appui direct.

Pour la valeur de V_{Ed} calculée sans appliquer le facteur de réduction β , il convient de satisfaire la condition :

$$V_{Ed} = 0,5b_w \cdot d \cdot \nu \cdot f_{cd}, \quad \text{Equation 3}$$

où ν est le facteur de réduction de la résistance du béton fissuré à l'effort tranchant. La valeur recommandée pour ce facteur est donnée par :

$$\nu = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right], \quad \text{Equation 4}$$

avec f_{cd} la valeur de calcul de la résistance en compression du béton $f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c}$,

où :

- α_{cc} est un coefficient tenant compte des effets à long terme sur la résistance en compression et des effets défavorables résultant de la manière dont la charge est appliquée. La valeur recommandée est $\alpha_{cc} = 1$.
- γ_c est le coefficient partiel relatif au béton et est égal à 1,5.

Selon le projet de norme PrEN 1992-1-1 [5], l'effort tranchant résistant de calcul, $V_{Rd,c}$, s'exprime par l'Equation 5 qui tient compte explicitement du rapport (a/d) lorsqu'il est inférieur à 2,5.

$$V_{Rd,c} = \left[\frac{0,0525}{\gamma_c} (f_{cm})^{2/3} \left(\frac{2,5d}{a} \right) (1,6-d)(1,2+40\rho_l) \right] b_w d \quad \text{si } \frac{a}{d} < 2,5$$

$$V_{Rd,c} = \left[\frac{0,0525}{\gamma_c} (f_{cm})^{2/3} (1,6-d)(1,2+40\rho_l) \right] b_w d \quad \text{si } \frac{a}{d} \geq 2,5$$

Equation 5

2. 4 Résistance au cisaillement selon les modèles basés sur la mécanique de la rupture

Certains chercheurs [6-8] ont employé les notions de la mécanique de la rupture afin de prédire la résistance à l'effort tranchant des éléments en béton armé sans armature transversale. Par exemple, Bazant et Yu [6] ont proposé l'expression suivante :

$$V_C = 3,5 \sqrt{f_{cm} \frac{D_0}{d}} b_w d \leq 3,5 \sqrt{f_{cm}} b_w d \quad ,$$

Equation 6

avec $D_0 = 7\rho^{2/3}$. Gastebled et May [7] ont présenté un modèle analytique (Equation 7) basé sur l'énergie de rupture en mode I de l'interface acier longitudinal / béton :

$$V_C = 0,15 \frac{37,41}{\sqrt{d}} \left(\frac{3d}{a} \right)^{1/3} (100\rho)^{1/6} (1-\sqrt{\rho})^{2/3} f_{cm}^{0,35} b_w d .$$

Equation 7

Zsutty [8] a proposé la relation suivante en se basant sur une analyse statistique :

$$V_C = 2,21 \left(f_{cm} \rho \frac{d}{a} \right)^{1/3} b_w d .$$

Equation 8

2. 5 Revue bibliographique sur le comportement des éléments armés en béton incorporant des gravillons recyclés

Plusieurs études ont été menées au cours de la dernière décennie afin d'évaluer l'effet des gravillons recyclés sur la résistance à l'effort tranchant [9-14]. Une des premières études sur ce sujet est celle de Gonzalez-Fonteboia et Martinez-Abella [9]. Ils ont testé 8 poutres de dimensions 20x35x305 cm fabriquées à partir de deux compositions de bétons. Le premier béton est à base des granulats naturels, tandis que le second est formulé en substituant 50% des gravillons naturels par des recyclés, tout en maintenant constants les autres paramètres de formulation. Le taux de ferrailage longitudinal est maintenu constant $\rho = 3\%$ alors que le taux de ferrailage transversal est variable. Les poutres ont été testées en flexion 4 points jusqu'à la rupture par cisaillement pour un rapport $a/d = 3,3$.

Les résultats de cette étude montrent que les poutres incorporant des gravillons recyclés possèdent une résistance au cisaillement légèrement inférieure à celle des poutres de béton à base de granulats naturels. Les chercheurs ont observé des fissures le long de l'armature longitudinale, particulièrement pour les poutres avec des gravillons recyclés sans armature transversale. L'utilisation de l'armature transversale limite ce phénomène et améliore la résistance à l'effort tranchant en général. Ils ont également montré que toutes les normes étudiées restent applicables avec une marge de sécurité suffisante et qu'elles peuvent être utilisées pour la prédiction de la résistance au cisaillement des poutres en béton recyclé.

Fathifazl *et al.* [10] ont fabriqué 8 poutres d'un béton à base des gravillons recyclés de deux sources différentes RCA-M et RCA-V (quatre poutres pour chaque type de béton). Les paramètres étudiés sont la hauteur de la section transversale, le rapport a/d et le taux du ferrailage longitudinal. Enfin, une comparaison a été faite entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédites par certaines normes. Les chercheurs ont reporté une augmentation de la résistance à l'effort tranchant des poutres incorporant des recyclés du fait de l'amélioration des propriétés mécaniques par rapport au béton de granulats naturels. Ils ont conclu également que les équations disponibles dans les références bibliographiques, aussi bien que les normes, restaient applicables. Par contre, aucune différence n'a été observée entre les bétons testés au niveau des mécanismes de rupture par effort tranchant.

Arezoumandi *et al.* [11] ont mené récemment une étude expérimentale pour étudier la résistance au cisaillement des poutres en béton à base des gravillons recyclés et naturels. Les chercheurs

ont fabriqué 12 poutres d'une section transversale 30x45 cm et d'une portée de 360 cm sans armature transversale et avec 3 taux d'armature longitudinale différents.

Les résultats montrent que les poutres à base des granulats recyclés possèdent une résistance au cisaillement légèrement plus faible que celle de granulats naturels (Figure 12). Par ailleurs, aucune différence n'a été observée en termes de morphologie de fissuration, quel que soit le type de granulats (naturels ou recyclés).

En ce qui concerne les expressions de prédiction de la résistance au cisaillement, les chercheurs ont conclu que les relations disponibles dans les références bibliographiques sous-estiment cette résistance, y compris les relations développées en utilisant la mécanique de la rupture.

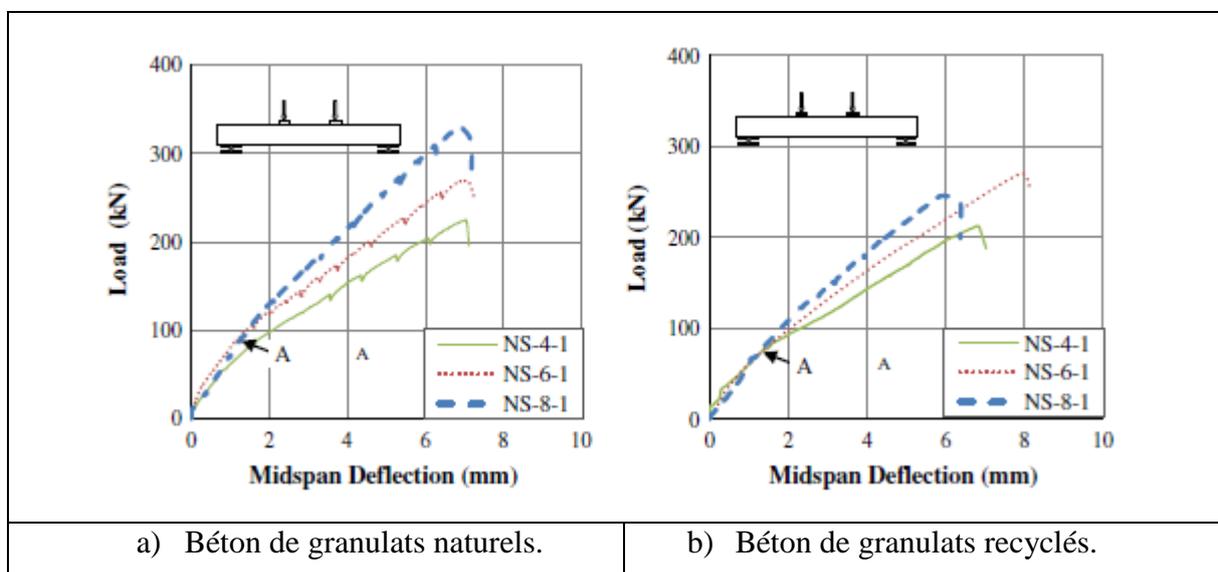


Figure 12 : Courbes force-déplacement d'après Arezoumandi *et al.* [11], pour différent nombre de barres (NS pour *number of steel*) : 4, 6 et 8.

Etxeberria et al [12] ont testé 12 poutres fabriquées à partir de 4 formulations du béton de la même classe de résistance à la compression. Les bétons recyclés ont été formulés en remplaçant, en volume, les gravillons naturels par 25%, 50% et 100% de gravillons recyclés. Par ailleurs, trois configurations du renforcement transversal ont été considérées pour chaque formulation testée comme suit :

- Type V1 : une poutre a été préparée sans armature transversale ;
- Type V2 : une poutre de chaque formulation avec des cadres de 6 mm de diamètre espacés de 130 mm ;
- Type V3: une poutre de chaque formulation avec des cadres de 6 mm de diamètre espacés de 170 mm

Les dimensions de toutes les poutres sont 200x350x3050 mm avec un taux de ferrailage longitudinal, ρ , compris entre 2.92 et 2.95%. Les poutres ont été testées à la flexion 4 point avec un rapport $a/d \cong 3$.

Les chercheurs ont conclu sur la base des résultats obtenus que l'effet des granulats recyclés sur la résistance à l'effort tranchant dépend du taux de substitution et ceci est spécialement pour les poutres sans armature transversale. Pour un faible pourcentage de substitution (moins de 25%), l'influence est pratiquement négligeable. Pour les poutres avec renforcement transversal l'effet des granulats recyclés est pratiquement négligeable.

Yun et al. [14] ont testé 8 poutres 400x600x6000 mm préparées de trois bétons des gravillons recyclés conçus à partir d'une formulation de référence en substituant les gravillons naturels par 30%, 60% et 100% des gravillons recyclés. Enfin, les poutres ont été testées à la flexion 4 points avec un rapport a/d égal à 5,1.

Les résultats obtenus montrent que la résistance à l'effort tranchant est peu affectée par le taux de substitution en granulats recyclés et que pour l'ensemble des poutres testées la rupture est fragile.

Les études publiées ne donnent pas des résultats concluants sur l'effet des granulats recyclés sur la résistance au cisaillement du béton. En général cette résistance, appelée V_{RC} , est inférieure ou égale à celle du béton des granulats naturels en raison des différences possibles dans les résistances à la traction aussi bien que dans la rugosité des surfaces de la rupture entre les bétons des granulats recyclés et ceux formulés uniquement avec des granulats naturels. En ce qui concerne la rupture, elle peut être fragile ou non en fonction de la portée du cisaillement et du rapport a/d ainsi que du taux du ferrailage longitudinal. De plus, les essais sur des poutres avec ferrailage transversal sont rares, mais toutefois la contribution des cadres dans la résistance au cisaillement ne semble pas dépendante des granulats recyclés.

3 PROGRAMME EXPERIMENTAL

3. 1 Caractérisation des matériaux

3.1. 1 Granulats

Les granulats naturels et recyclés ont été livrés en 3 classes distinctes, conditionnés en big-bags.

Les granulats naturels ont été proposés par l'UNPG [15] comme suit :

- sable semi-concassé lavé 0/4 de la carrière Lafarge de Sandrancourt.
- gravillons calcaires concassés 4/10 et 6,3/20 : carrière Lafarge de Givet.

Les granulats recyclés sont issus d'une production spécifique effectuée sur la plateforme DLB de Gonesse (95). Ils sont fournis en 3 classes 0/4, 4/10, et de 10/20.

Après livraison, les essais suivant de caractérisation des propriétés physiques ont été réalisés :

- la mesure de la granulométrie selon la norme NF EN 933-1 [16]. Les courbes granulométriques ont été évaluées à partir de trois échantillons, prélevés dans des big-bags différents.
- la mesure de la masse volumique réelle et de l'absorption des granulats selon la norme NF EN 1097-6 [17]. Les moyennes et les écart-types de la masse volumique réelle ρ_d et du coefficient d'absorption WA_{24} sont calculés à partir des résultats de 3 essais.

Les courbes granulométriques des granulats naturels et recyclés sont représentées sur les Figures 13 et 14, respectivement. Les résultats montrent que :

- Pour les granulats naturels et recyclés, les courbes granulométriques données dans les fiches techniques de produits Lafarge [15] et les résultats trouvés par nos soins sont proches.
- Les granulats recyclés contiennent plus des fines que les granulats naturels.

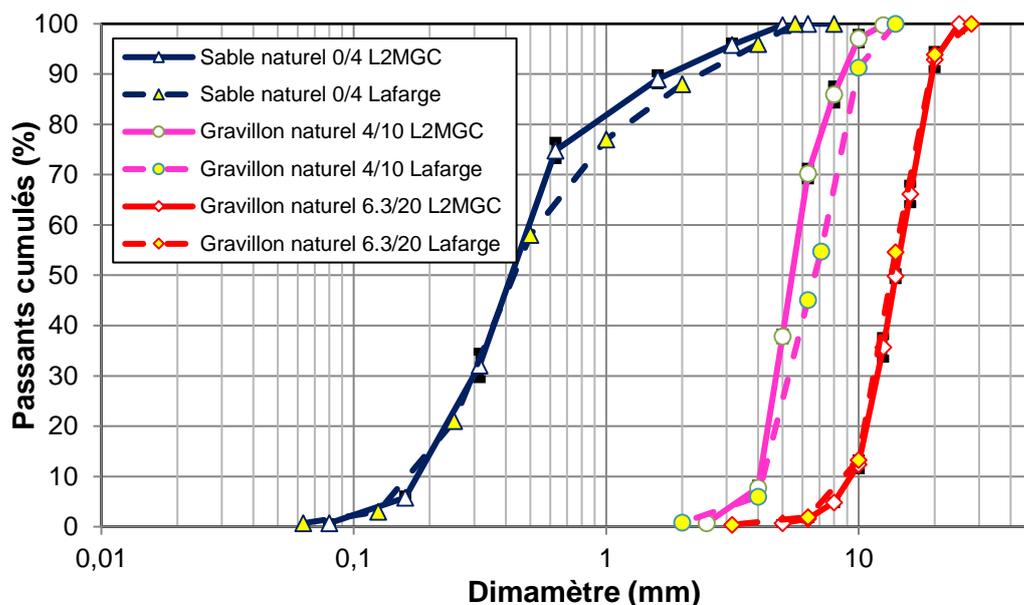


Figure 13 : Courbes granulométriques des granulats naturels.

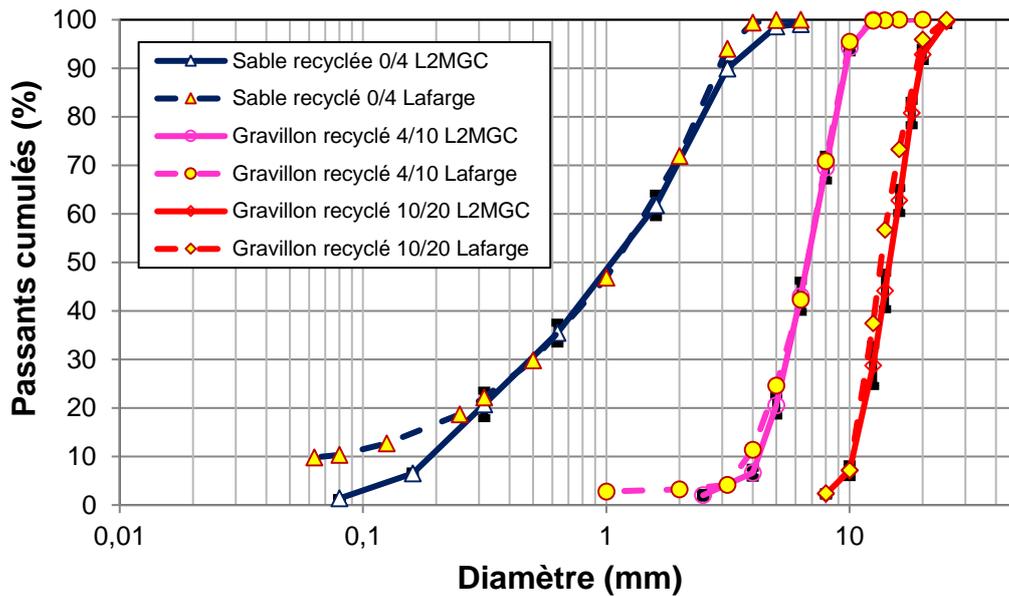


Figure 14 : Courbes granulométriques des granulats recyclés.

Les propriétés physiques des granulats ont également été mesurées et sont données dans le Tableau 1. Ces résultats sont en accord avec les valeurs avec les valeurs des fiches techniques de produits [15, 18].

Tableau 1 : Propriétés physiques des granulats.

		Granulats recyclés			Granulats naturels		
		GR1 (4/10)	GR2 (10/20)	SR (0/4)	GN1 (6,3/10)	GN2 (10/20)	SN (0/4)
ρ_{rd} (g/cm ³)	L2MGC	2,30 ^{±0,01}	2,30 ^{±0,04}	2,20 ^{±0,09}	2,73 ^{±0,02}	2,71 ^{±0,02}	2,67 ^{±0,02}
	Lafarge	2,29	2,26	2,18	2,71	2,71	2,51
WA ₂₄ (%)	L2MGC	6,26 ^{±0,75}	5,52 ^{±0,87}	8,86 ^{±1,16}	0,35 ^{±0,17}	0,45 ^{±0,17}	0,90 ^{±0,24}
	Lafarge	5,6	5,8	8,9	0,5	0,57	1

A partir de ces résultats, on constate que la masse volumique des granulats recyclés est plus faible que celle des granulats naturels, et que le coefficient d'absorption est nettement plus élevé. En effet, les granulats recyclés, en raison de l'ancien mortier qui reste attaché aux grains originaux, possèdent une densité plus faible et une capacité d'absorption plus élevée que les granulats naturels.

3.1. 2 Ciment

Un ciment CEM II/A-L 42.5 de Rochefort fourni par Holcim a été sélectionné. Il a été livré en futs plastiques étanches de 60 litres, pour optimiser la conservation du ciment sur la durée du projet national. Sa masse volumique est égale à 3090 kg/m^3 et sa classe de résistance à la compression à 28 jours est de 52,5 MPa.

3.1. 3 Filler calcaire

Un filler calcaire d'une masse volumique de 2700 kg/m^3 , le Betocarb HP-OG d'Omya, a également été sélectionné pour améliorer la compacité du squelette granulaire des bétons. Ce matériau, relativement inerte, a été livré en sacs de 25 kg palettisés.

3.1. 4 Superplastifiant

Le MC PowerFlow 3140, d'une masse volumique égale à 1100 kg/m^3 et composé de 36 % d'extrait sec et de 64 % d'eau, a été utilisé pour l'ensemble des opérations du PN RECYBETON.

3.1. 5 Les aciers

Les barres d'acier utilisées pour les essais sur poutres sont des barres d'acier à haute adhérence (HA) de diamètres 6, 8 et 16 mm, dont la surface présente des verrous. Des essais de traction ont été réalisés à l'aide d'une presse de traction Perrier 250 kN afin de vérifier leur conformité vis-à-vis des caractéristiques mécaniques spécifiées par la norme NF EN 1992-1-1 [4]. Les courbes contrainte-déformation des barres HA6 et HA16 sont représentées à la Figure 15 où l'on montre que :

- pour les barres HA6 : le module d'élasticité est environ de 184 GPa, et la limite élastique, f_{yk} , est supérieure à 650 MPa. La déformation correspondante à E_s est de 0,3 % et la déformation à la rupture est de l'ordre de 5 % ;
- pour les barres HA16 : le module d'élasticité est environ de 218 GPa et la limite élastique, f_{yk} , est supérieure à 600 MPa. La déformation correspondante à E_s est de 0,24 % tandis que la déformation à la rupture est de l'ordre de 10 %.

Chaque essai de traction a été répété au moins deux fois et les résultats obtenus sont presque identiques.

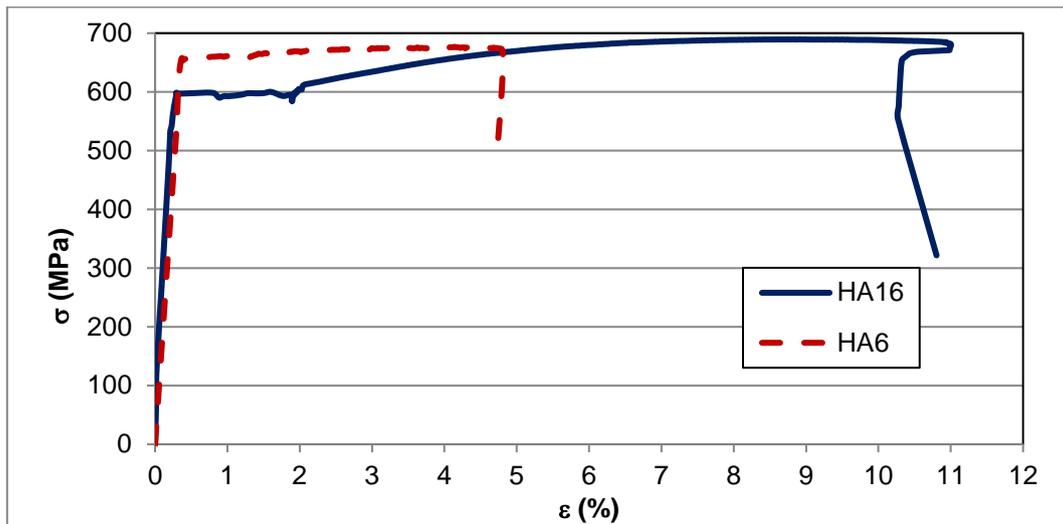


Figure 15 : Courbes de contrainte-déformation des barres d'acier HA6 et HA16.

3. 2 Formulations des bétons

Parmi les 12 formulations proposées par le projet national RECYBETON [18], deux bétons ont été retenus dans le cadre de cette étude. Il s'agit des formulations C35/45-0R-0R et C35/45-100R-100R. Pour rappel, le nom de chaque formulation correspond à la nomenclature suivante, à savoir CXX-XR-YR :

- le préfixe CXX correspond à la classe de résistance à la compression des bétons sur cylindre, C35 pour le classe C35/45.
- XR correspond au taux de substitution massique en sable recyclé ;
- YR correspond au taux de substitution massique en graviers recyclés.

La composition de chaque béton est donnée dans le Tableau 2. Les granulats recyclés ont été pré-saturés selon la méthodologie définie dans le rapport R/13/RECY/003 [19].

Il est à noter que le dosage des constituants des deux formulations est différent. De plus, le dosage en ciment augmente lorsque les granulats naturels sont substitués par les granulats recyclés afin d'atteindre la résistance à la compression cible.

Tableau 2 : Compositions des bétons d'après le rapport R/13/RECY/003 [19].

Constituants (kg/m ³)	C35/45-0R-0R	C35/45-100R-100R
Eau d'ajout	185	284
Ciment CEM II/A-L 42,5 N de Rochefort	299	381

Filler Calcaire Betocarb HP OG	58	70
Sable Sandrancourt	771	-
Sable recyclé 0/4	-	663
Gravillons Givet 4/10	264	-
Gravillons recyclés 4/10	-	299
Gravillons Givet 6,3/20	810	-
Gravillons recyclés 10/20	-	435
Superplastifiant MC PowerFlow 3140	2,1	2.78
Eau/Ciment	0,62	0,74
Eau/Liant	0,52	0,62
Volume de la pâte (%)	29	33
$\rho_{\text{théorique}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	2389	2135

Les granulats recyclés ont été utilisés dans un état d'humidité correspondant à leur absorption WA_{24} plus 1% (en valeur absolue). Les granulats sont pré-humidifiés selon la procédure suivante :

- prélèvement d'un échantillon de granulats pour évaluer la teneur en eau initiale ;
- mise en fut étanche d'une certaine quantité de granulats (40 à 80 kg). Le fût doit au préalable être humidifié (en évacuant tout excès d'eau à l'aide d'une éponge) pour éviter toute perte d'eau par adsorption d'eau sur les parois du fût ;
- ajout du complément d'eau nécessaire pour atteindre la teneur en eau visée ;
- roulage du fût pour homogénéisation ;
- mise au repos du fût à l'horizontale pendant une durée minimale de 2 heures.

Quant aux granulats naturels, ils sont utilisés dans leur état naturel, pourvu qu'ils soient saturés. Le superplastifiant MC PowerFlow 3140 a été mélangé à l'eau dans la limite d'obtention d'un béton de classe S4 alors que le retardateur Centrament Retard 370 n'a pas été utilisé dans cette étude.

Les gâchées ont été effectuées à l'aide d'une mini centrale à béton COUVROT / PLANETARY MIXER MTV 250 d'une capacité de 250 litres (Figure 16), selon le protocole suivant :

- 0 à 1' : Malaxage à sec de tous les constituants ;

- 1' à 1'30" : Introduction eau + superplastifiant ;
- 1'30" à 5' : Malaxage.



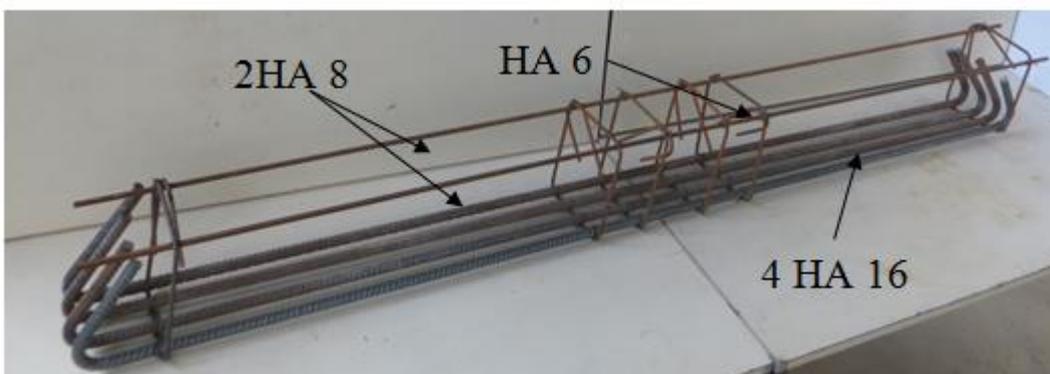
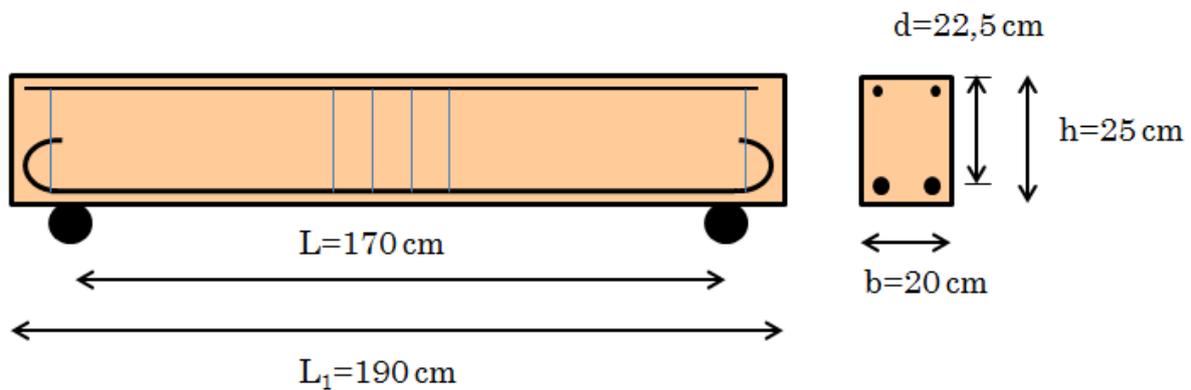
Figure 16 : Centrale à béton.

3. 3 Description des poutres étudiées

Dans le cadre de ce projet de recherche, six poutres en béton C35/45 0R-0R et six du béton C35/45 100R-100R ont été préparées. La section transversale est de 20x25 cm et la longueur totale est de 190 cm pour une portée entre appuis de 170 cm. Les poutres sont ferrillées longitudinalement avec 4 HA16, afin de favoriser la ruine par cisaillement. Pour la section

transversale le taux d'armature est $\rho = \frac{A_s}{b.d} = 1,78 \%$.

De plus, deux barres de construction HA8 ont été mises en place pour le montage de 6 cadres HA6 : (i) une au niveau de chaque appui et (ii) 4 au milieu de la poutre, chacun espacés de 10 cm). La géométrie, ainsi que la disposition des barres sont présentées sur la Figure 17.



Figure

17 : Caractéristiques géométriques des poutres.

L'ensemble des poutres ont été préparées en trois fois, de sorte que deux poutres de la série C35-0R-0R et deux de la série C35-100R-100R soient confectionnées à chaque mise en place. Lors de chaque séance du coulage, 6 éprouvettes cylindriques 11x22 cm ont été préparées pour chaque formulation pour la détermination des propriétés mécaniques (résistance à la compression, traction par fendage et module d'élasticité dynamique).

Les poutres sont restées une semaine dans le coffrage, puis 3 semaines dans le hall béton du L2MGC où l'humidification par arrosage s'est poursuivie pendant une semaine après le décoffrage. Deux semaines avant les tests, les faces longitudinales des poutres ont été peintes en blanc et un quadrillage a été dessiné (grille 10 x 10 cm) dans le but d'une meilleure visualisation de la propagation des fissures lors des essais. Quant aux éprouvettes cylindriques, elles ont été conservées dans les mêmes conditions que les poutres.

3. 4 Instrumentation

Pour chaque poutre, et afin de suivre les déformations de l'acier, deux barres ont été instrumentées avec des jauges à mi-portée (Figure 18). A l'état durci, deux jauges ont été collées

sur les fibres supérieures en compression à mi-portée. L'objectif de cette instrumentation est de s'assurer que les déformations restent inférieures à leurs valeurs limites et que, par conséquent, les ruptures soient dues exclusivement à l'effort tranchant.



Figure 18 : Instrumentation des barres d'acier.

Un capteur LVDT a été utilisé pour piloter les essais de flexion 4 point ainsi que pour mesurer la flèche à mi-portée des poutres testées. Les surfaces de rupture ont été observées microscopiquement à l'aide d'un microscope optique stéréoscopique NIKON SMZ 800 avec un agrandissement de 20 fois.

3. 5 Procédures expérimentales

Les essais de résistance à la compression ont été réalisés selon la norme NF EN 12390-3 [20] 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. Les essais de résistance à la traction par fendage ont été effectués à l'aide de cette même presse, selon la norme NF EN 12390-6 [21] à une vitesse de chargement égale à 0,05 MPa/s. Par ailleurs, un appareil, E-Meter MK II, a été utilisé pour déterminer le module élastique dynamique des bétons selon la norme P18-414 [22] (Figure 19).

En ce que concerne l'essai de flexion 4 points, les poutres sont placées sur un banc de flexion (presse 3R - 300 kN) piloté par un ordinateur à l'aide d'un capteur LVDT qui mesure également la flèche de la poutre. Le pilotage en déplacement du vérin permet un enregistrement continu de l'essai jusqu'à la rupture, fournissant alors des données précises sur le comportement global de la poutre en régime pré-pic et post-pic. Le banc de flexion est piloté à une vitesse de déplacement constante (0,05 mm/s). Les déformations des jauges sont enregistrées à l'aide d'un scanner (VISHAY 7000). Enfin, deux caméras sont installées pour filmer les essais (Figure 20). Enfin, tous les essais mécaniques ont été réalisés à l'échéance de 28 jours.



a) Compression

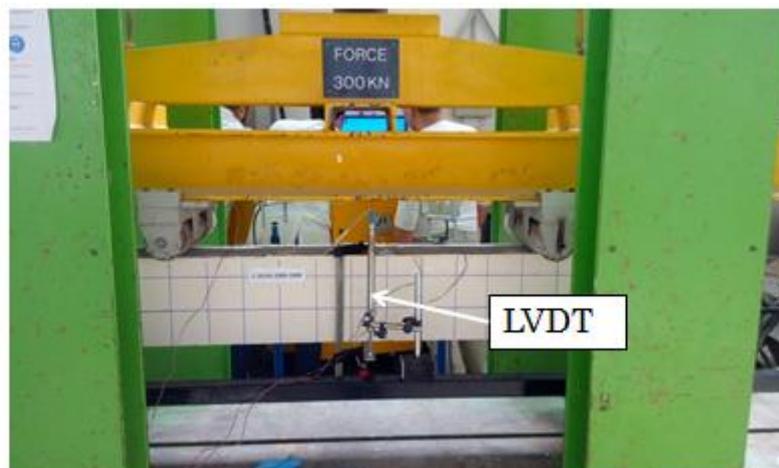


b) Fendage



c) E-Meter MK II

Figure 19 : Essais de caractérisation des propriétés mécaniques.



Banc de flexion 3R, capacité 300 KN



Scanner VISHAY 7000



Figure 20 : Dispositif de l'essai de flexion 4 points.

4 RESULTATS EXPERIMENTAUX ET OBSERVATIONS

4. 1 Propriétés mécaniques des bétons durcis

Les résultats donnés dans le Tableau 3 montrent que tous les bétons atteignent des niveaux de résistances compatibles avec les résultats publiés concernant les formulations du projet national Recybéton (résistance moyenne aux alentours de 35 MPa) [19]. Nous pouvons remarquer que la résistance à la traction aussi bien que le module d'élasticité diminuent pour le béton à base de granulats recyclés. La diminution en termes de la résistance à la traction est de 23 % et de 27 % pour le module d'élasticité.

Tableau 3 : Propriétés mécaniques des bétons à 28 jours.

	Formulation	Eprouvette	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_{ct} (MPa)	$f_{ctm,sp}$ (MPa)	E_{dyn} (GPa)
Série 1	C35/45-0R-0R	1	35,3	37,3±4,1	3,2	3,2±0,09	42,1 ± 0,7
		2	42,0		3,1		
		3	34,5		3,3		
	C35/45-100R-100R	1	33,4	33,6±0,5	2,5	2,6±0,09	
		2	34,3		2,6		
		3	33,6		2,5		
Série 2	C35/45-0R-0R	1	35,0	37,4±5,1	3,5	3,5±0,4	-
		2	43,3		3,8		
		3	34,0		3,1		
	C35/45-100R-100R	1	33,4	35,6±1,9	2,4	2,7±0,4	
		2	36,5		2,5		
		3	37,0		3,1		
Série 3	C35/45-0R-0R	1	34,0	36,9±4,4	3,6	3,5±0,07	-
		2	42,0		3,4		
		3	34,8		3,5		
	C35/45-100R-100R	1	31,5	33,3±1,8	2,6	2,6±0,1	
		2	35,0		2,5		
		3	33,3		2,7		

4. 2 Comportement global des poutres sans armature transversale

En flexion 4 points et selon la théorie des poutres, la zone située entre les deux charges subit un moment fléchissant constant et un effort tranchant nul. Par ailleurs, l'effort tranchant est constant entre les appuis et les points d'application des charges (Figure 21). Pour cette configuration et conformément à la théorie des poutres, la section sollicitée en flexion est soumise à une contrainte de traction maximale au niveau de la fibre inférieure et une contrainte

de compression maximale au niveau de la fibre supérieure. Sous chargement monotone, une fissure, dite de flexion, s'initie lorsque la résistance à la traction du béton est atteinte. Le moment fléchissant correspondant à cette situation est appelé moment de fissuration.

L'augmentation de la charge appliquée élargit la zone où le moment fléchissant dépasse le moment de fissuration et provoque par conséquent la formation d'autres fissures de flexion. Dans les zones proches des appuis où l'effort tranchant est important par rapport au moment fléchissant, les fissures s'inclinent sous l'effet du cisaillement.

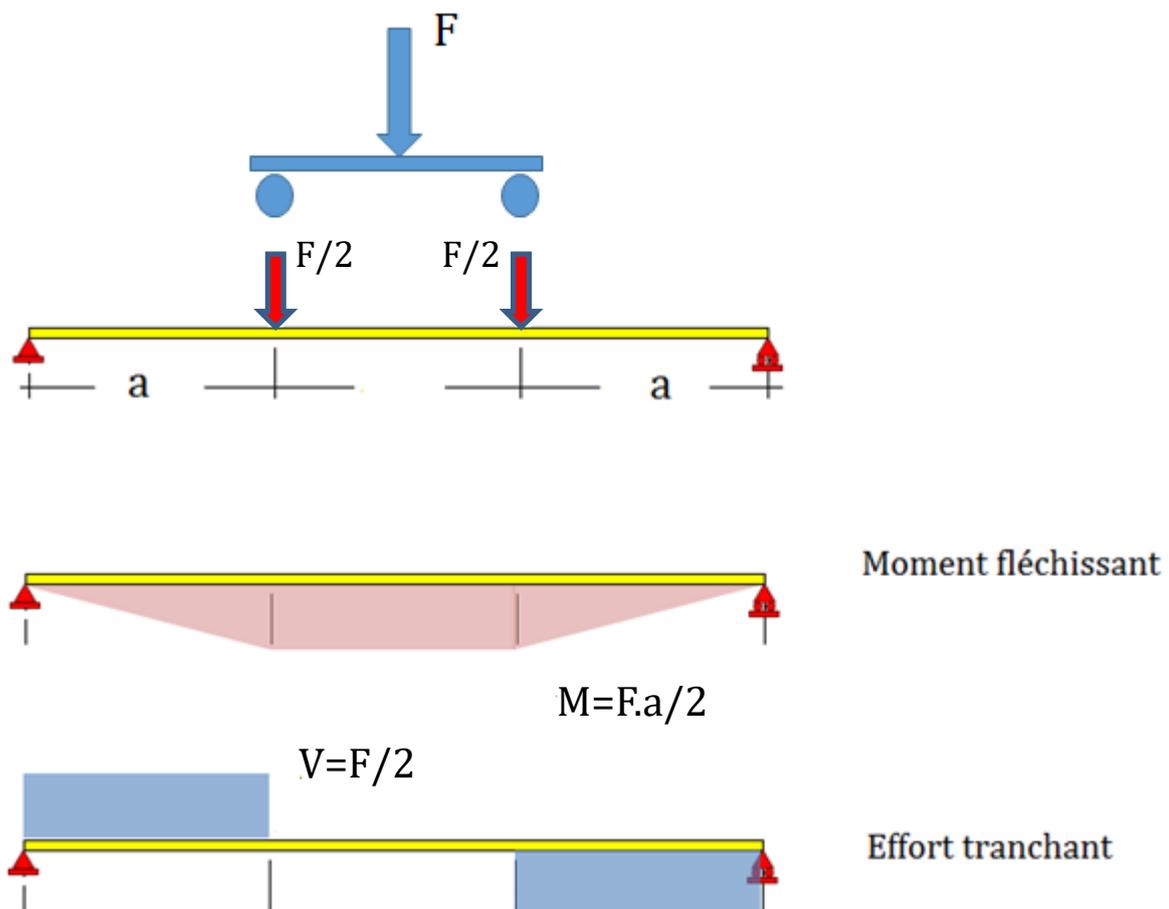
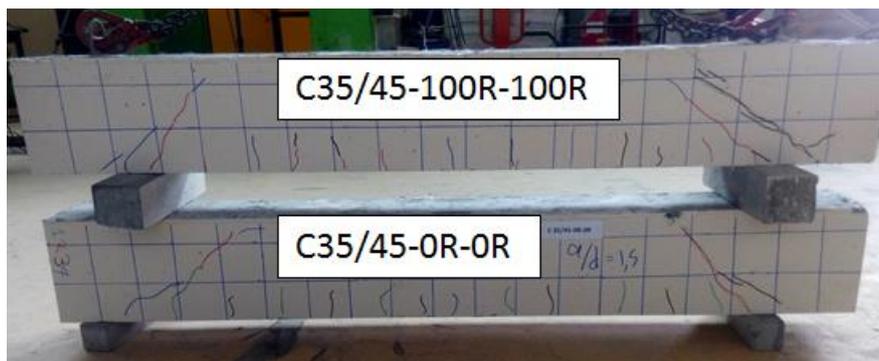


Figure 21 : Diagrammes du moment fléchissant M et de l'effort tranchant V d'une poutre soumise à la flexion 4 points.

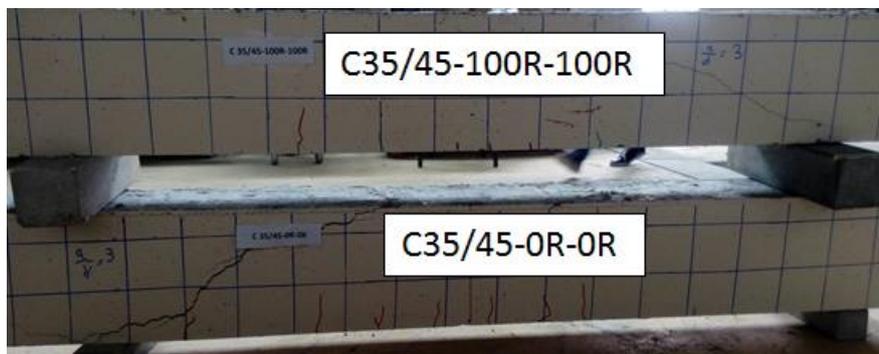
Pour l'ensemble des poutres testées dans le cadre du présent projet, les premières fissures se forment en flexion dans la zone entre les deux points de chargement, puis la ruine se produit par la formation d'une fissure diagonale près des supports. Nous distinguons deux comportements distincts en fonction du rapport a/d :

- $a/d = 3,0$ la rupture intervient brutalement avec l'ouverture importante d'une fissure oblique ;
- $a/d = 1,5$ formation d'une fissure diagonale mais l'élément continue à résister jusqu'à la rupture.

Les modes de rupture par effort tranchant sont illustrés sur la Figure 22.



$a/d = 1,5$



$a/d = 3,0$

Figure 22 : Modes de rupture par effort tranchant.

L'analyse des cartes de fissuration met en évidence que :

- en termes d'apparition et de progression de la fissure, le comportement des poutres en béton naturel et des poutres en béton recyclé est pratiquement identique.
- le mode de rupture est par compression-cisaillement lorsque $a/d = 1,5$ alors qu'il est par traction diagonale lorsque $a/d = 3,0$ (voir partie 2.2).
- le nombre de fissures augmente légèrement lorsque les granulats recyclés sont utilisés. Cet état d'endommagement plus prononcé est accompagné d'une diminution de l'espacement entre les fissures, et d'une augmentation de la largeur de la zone fissurée (Tableau 4).

Tableau 4 : État de fissuration des poutres.

a/d	Poutre	Nombre de Fissures	Largeur de la zone fissurée (cm)	Espacement moyen (cm)
1,5	C35/45-0R-0R	15	156	10,4
	C35/45-100R-100R	17	176	10,3
3,0	C35/45-0R-0R	6	131	21,8
	C35/45-100R-100R	8	110	13,8

4. 3 Courbes Force-flèche

Les courbes force-flèche pour toutes les poutres sont représentées sur la Figure 23. Avant l'apparition des premières fissures en flexion, le comportement est linéaire. Après la fissuration, la pente change quelle que soit la formulation et cette pente est plus faible pour les poutres en béton des granulats recyclés par rapport à celles de granulats naturels. Cette différence s'explique d'une part par la différence des modules d'élasticité et d'autre part par un état de fissuration plus important pour la poutre en béton à graviers recyclés [19].

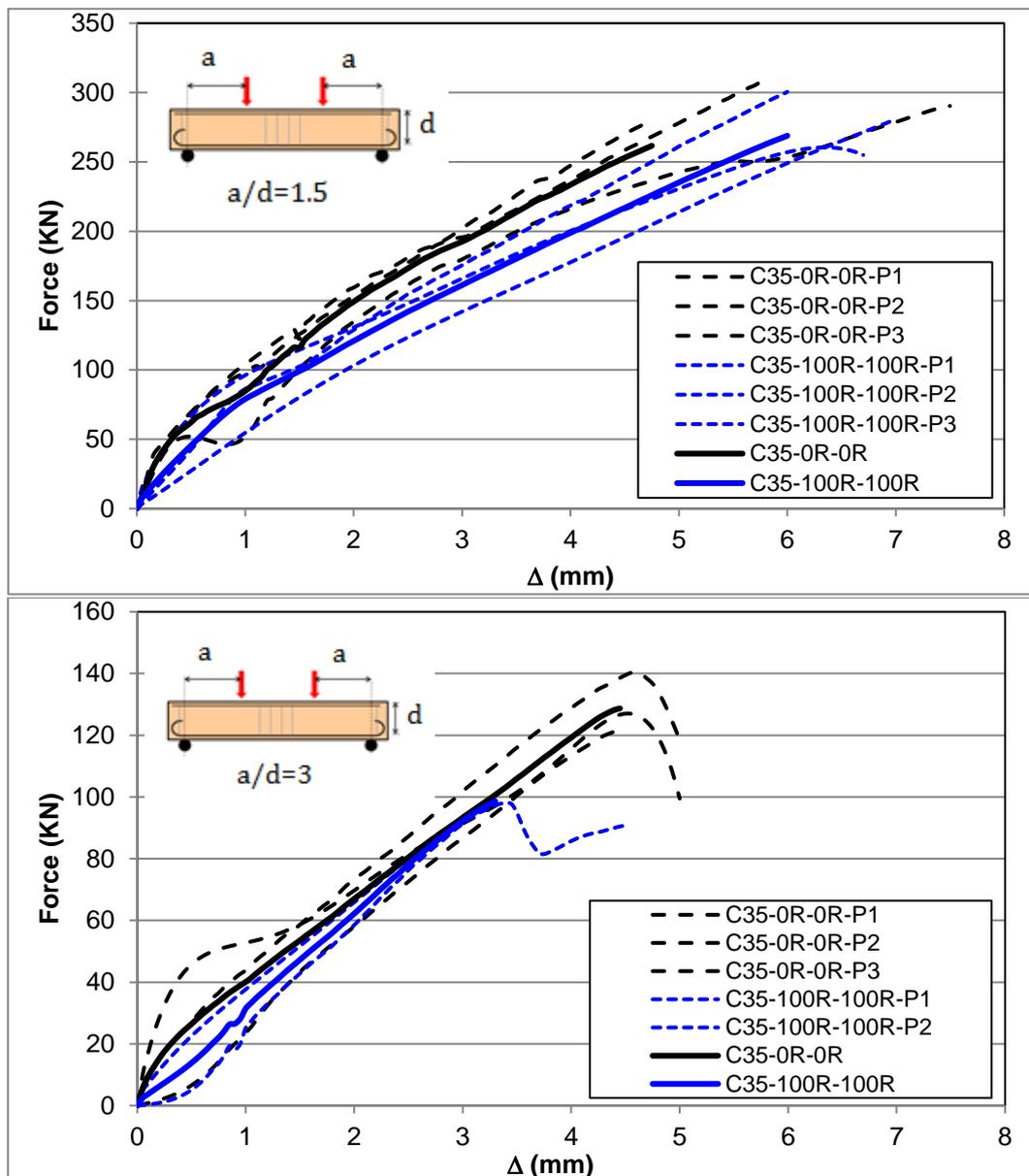


Figure 23 : Courbes Force-flèche des poutres étudiées, (a) lorsque le ratio $a/d = 1,5$ et (b) $a/d = 3,0$.

Pour les 3 poutres 0R-0R à $a/d = 1,5$, la rupture n'a pas été atteinte à cause de la limitation du vérin à 300 kN. En conséquence, l'effort ultime V_{exp} n'est pas connu, mais il est supérieur à 150 kN. Les résultats de tous les essais sont récapitulés dans le Tableau 5.

La contrainte de cisaillement a été calculée d'après la relation suivante :

$$v_{exp} = \frac{V_{exp}}{b_w \cdot d}$$

Equation 9

De plus, la contrainte expérimentale v_{exp} est rapportée à la racine de la résistance moyenne f_{cm} à la compression $v_{exp}/\sqrt{f_{cm}}$.

On note une baisse de la résistance avec les granulats recyclés quelque que soit le rapport a/d . La résistance à l'effort tranchant diminue lorsque le rapport a/d augmente. La réduction de cette résistance est de 23 % pour $a/d = 3,0$ alors que cette diminution est plus importante pour $a/d = 1,5$ du fait que la force V_{exp} est supérieure à 150 kN ; diminution supérieure à 47% en $\frac{V_{exp}}{bd\sqrt{f_{cm}}}$.

Toutefois, le rapport entre la contrainte du cisaillement et $\sqrt{f_{cm}}$ reste supérieur à 0,17 la valeur recommandée par la norme ACI [23]. Pour le calcul de V_{exp} la valeur de β est prise égale à 1 (cf. partie 2.3).

Tableau 5 : Résultats expérimentaux des essais de flexion.

Formulation	Poutre	Force de rupture F_{exp} (kN)	Moyenne F_{moy} (kN)	$V_{exp} = \frac{F_{exp}}{2}$	$v_{exp} = \frac{V_{exp}}{b_w \cdot d}$ (MPa)	$\frac{v_{exp}}{\sqrt{f_{cm}}}$
C35/45-0R-0R-1.5	Série 1	>300		>150	>3,33	>0,55
	Série 2					
	Série 3					
C35/45-0R-0R-3.0	Série 1	127,2	122,8 ^{+3,2}	63,6	1,41	0,24
	Série 2	121,1		60,6	1,35	0,23
	Série 3	120		60,0	1,33	0,23
C35/45-100R-100R-1.5	Série 1	150	153,0 ^{+4,7}	75,0	1,67	0,27
	Série 2	160		80,0	1,78	0,29
	Série 3	150		75,0	1,67	0,27
C35/45-100R-100R-3.0	Série 1	100,4	99,15 ^{+1,3}	50,2	1,12	0,19
	Série 2	97,9		49,0	1,09	0,19
	Série 3	-			-	-

Note : La norme américaine ACI [23] recommande un ratio $v_{exp}/\sqrt{f_{cm}} = 0,17$.

La Figure 24 représente une comparaison entre les résultats de l'étude et ceux de Fathifazl *et al.*[10] et d'Arezoumandi *et al.* [11] en fonction du rapport a/d . Il est à noter que dans ces deux études [10, 11] seuls les gravillons recyclés ont été utilisés (pas de sable recyclé). Enfin, pour l'ensemble de ces points, le taux de ferrailage est compris entre 1,5 % et 2,7 %.

On constate d'une part qu'il n'existe pas d'écart significatif entre les résultats pour les bétons à base de granulats naturels et de granulats recyclés. D'autre part, on remarque un bon accord entre nos points et ceux des autres études. Finalement, on observe que la résistance diminue (i) lorsque le rapport a/d augmente et (ii) lorsque les granulats recyclés sont employés.

Les données retirées de la littérature sont regroupées dans le tableau 6. Pour les deux études adoptées les nomenclatures sont les suivantes :

- 1) Etude d'Arezoumandi : cc désigne le béton des granulats naturels et RAC désigne le béton des granulats recyclés.
- 2) Pour Fathifazl : C ou E désignent la méthode de formulation alors que les lettres M,V, L ou G désignent la source des granulats utilisés.

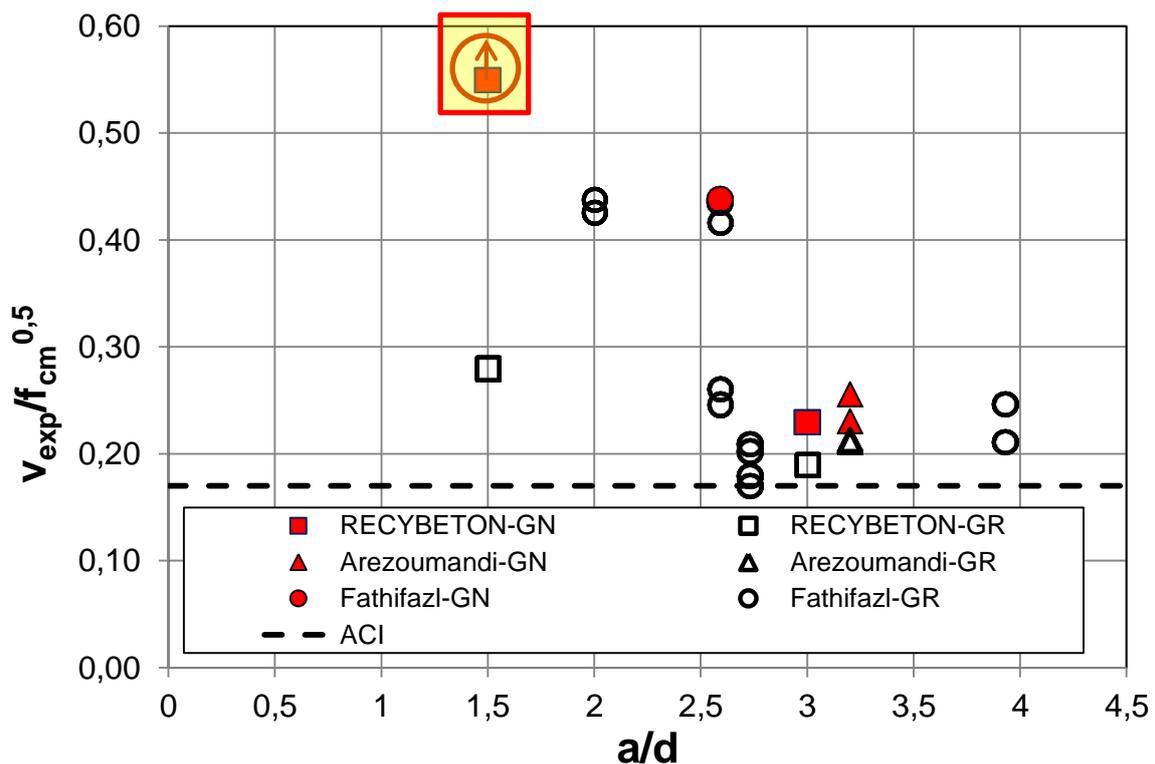


Figure 24 : Comparaison entre les résultats expérimentaux de l'étude et des autres auteurs [10, 11, 23] pour des bétons à base de granulats naturels (GN) et de granulats recyclés (GR).

Tableau 6 : Résultats retrouvés dans les références bibliographiques.

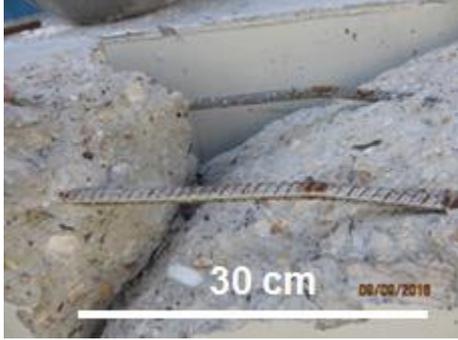
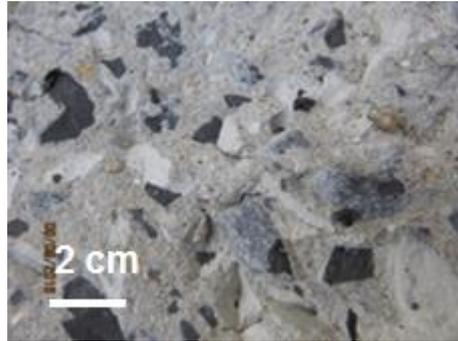
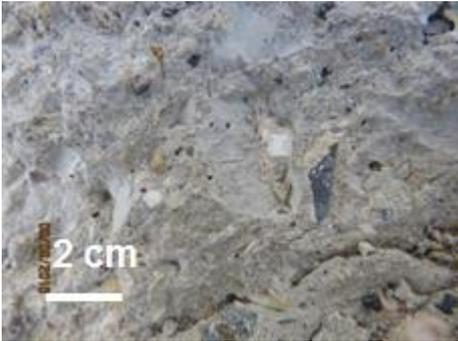
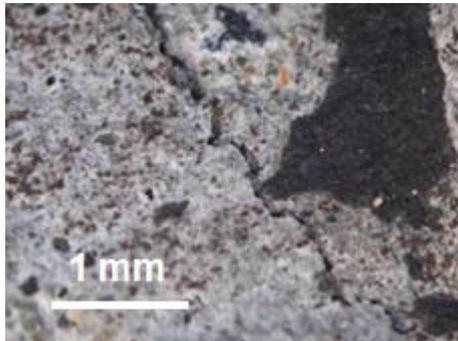
Référence	Poutre	Taux de substitution	b (mm)	d (mm)	portée (mm)	a/d	ρ (%)	f_{cm} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	$V_{exp}/f_{cm}^{0.5}$
Fathifazl	CG-2.7	0%	200	309	2200	2.59	1.63	34.0	3.3	0.42
	CG-M	0%	200	309	2200	2.59	1.63	34.0	3.3	0.42
	CL-2.7	0%	200	309	2200	2.59	1.63	37.1	3.2	0.25
	CL-M	0%	200	309	2200	2.59	1.63	37.1	3.2	0.25
	EM-2	63.5% gravillons	200	300	1800	2.59	1.50	41.6	3.4	0.44
	EM-2.7		200	309	2200	2.59	1.63	41.6	3.4	0.26
	EM-4		200	305	3000	3.93	2.45	41.6	3.4	0.21
	EM-H		200	381	2680	2.73	1.82	41.6	3.4	0.20
	EM-L		200	201	1680	2.69	2.0	41.6	3.4	0.34
	EM-M		200	309	2200	2.59	1.63	41.6	3.4	0.26
	EM-VH		200	476	3200	2.73	1.66	41.6	3.4	0.17
	EV-2	74.3% gravillons	200	300	1800	2.0	1.50	49.1	3.7	0.43
	EV-4		200	305	3000	3.93	2.45	49.1	3.7	0.25
	EV-H		200	381	2680	2.73	1.82	49.1	3.7	0.21
	EV-L		200	201	1680	2.69	2.0	49.1	3.7	0.44
	EV-VH		200	476	3200	2.73	1.66	49.1	3.7	0.18
	Arezoumandi	CC-NS-6	0%	300	375	3600	3.2	2.03	35.8	-
CC-NS-8		300		375	3600	3.2	2.70	35.8	-	0.26
RC-NS-6		100% gravillons	300	375	3600	3.2	2.03	32.1	-	0.21
RC-NS-8			300	375	3600	3.2	2.70	32.1	-	0.21

4. 4 Observations macroscopiques des surfaces de rupture

Les surfaces de rupture par effort tranchant d'une poutre C35/45-0R-0R et d'une poutre C35/45-100R-100R, testées pour un rapport $a/d = 3,0$, ont été observées macroscopiquement et microscopiquement à l'aide d'un microscope optique stéréoscopique NIKON SMZ 800 avec un agrandissement de 20 fois (Figure 25). L'analyse macroscopique révèle que la rupture se fait majoritairement par le décollement des granulats naturels alors qu'elle se fait par la rupture pour les granulats recyclés. L'analyse visuelle montre que le nombre et l'ouverture des fissures sont plus importants dans le cas du béton de granulats recyclés. L'analyse microscopique montre que le réseau de fissures est plus dense dans le cas du béton C35-100R-100R. Les

fissures traversent les granulats recyclés alors que les fissures se localisent autour des granulats naturels sans les traverser. Enfin, la largeur des fissures est plus importante.

Pour les deux formulations, l'adhérence entre la pâte de ciment et les granulats est bonne du fait qu'aucune fissure n'a été observée au niveau des interfaces.

	C35-0R-0R	C35-100R-100R
Observation macroscopique		
		
Observation microscopique		

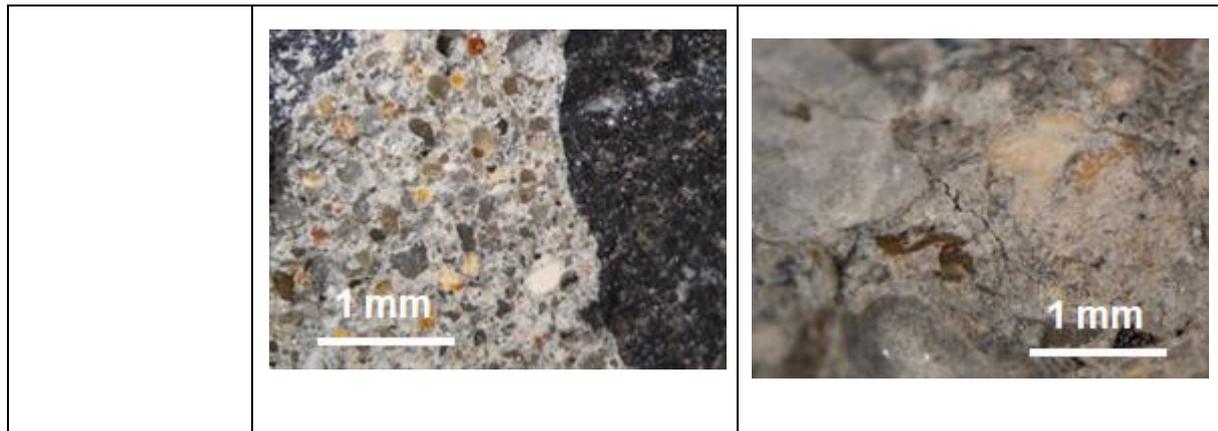


Figure 25 : Surfaces de rupture des deux bétons.

4. 5 Comparaison des résultats avec les prédictions

Le Tableau 7 résume les résultats expérimentaux avec les valeurs prédites par les équations proposées par l'Eurocode2 [4] et certaines références bibliographiques [6-8] en fonction du rapport a/d . On constate que la version actuelle de l'Eurocode2 est moins contraignante que le projet PrEN 1992-1-1[5] mais que les deux équations restent applicables au béton à base de granulats recyclés. Les équations 2 et 5 ont été appliquées avec un coefficient de sécurité $\gamma_c=1,5$. En ce qui concerne les équations basées sur la mécanique de la rupture (Equations 6-8), nous constatons qu'elles sous-estiment également la capacité des poutres à résister au cisaillement.

Tableau 7 : comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédites.

Bétons	f_{cm} (MPa)	f_{ck} (MPa)	a/d	V_{exp} (kN)	$V_{Rd,c}$ Eq. 2 (kN)	$V_{Rd,c}$ Eq. 5 (kN)	$V_{Rd,c}$ Eq. 6 (kN)	$V_{Rd,c}$ Eq. 7 (kN)	$V_{Rd,c}$ Eq. 8 (kN)	$V_{Rd,c}$ (kN)	$V_{Rd,c}$ (kN)
										Eq. 2	Eq. 5
C35/45-0R-0R	$37,3^{\pm 4,0}$	29,3	1,5	>150	39,2	77,1	44,4	75,4	75,9	38,19	73,95
			3,0	61,40		46,3	44,4	59,9	60,2		44,37
C35/45-100R-100R	$34,5^{\pm 1,6}$	26,5	1,5	76,70	38,0	73,2	42,7	73,3	73,9		73,95
			3,0	49,6		43,9	42,7	58,2	58,7		44,37

5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Des poutres conçues d'après les formulations C35/45-0R-0R et C35-100R-100R sans armatures transversales ont été testées à la flexion 4 points afin de caractériser leur résistance à l'effort tranchant. Sur la base des résultats expérimentaux, nous montrons que :

- Le comportement des poutres fabriquées à partir de la formulation C35-100R-100R est identique au comportement des poutres C35-0R-0R en termes de morphologie des fissurations et de propagation des fissures ;
- La présence des granulats recyclés diminue la résistance du béton au cisaillement par rapport au béton de granulats naturels indépendamment du rapport a/d ;
- La rupture se produit par le décollement des granulats naturels alors qu'elle se fait par la rupture des granulats recyclés avec un réseau de fissures plus dense ;
- A résistance f_{cm} égale, la résistance à l'effort tranchant, V_{exp} , des bétons recyclés est plus petite que celle des naturels. La diminution est du même ordre que celle de la résistance à la traction pour les poutres où $a/d = 3$ (rupture fragile : la charge ultime V_{exp} coïncide avec celle de fissuration de cisaillement V_{cr}), et nettement plus importante pour $a/d = 1,5$ (rupture non fragile : $V_{exp} > V_{cr}$).
- L'Eurocode2 ainsi que les relations de prédiction (Equations 2 à 8) sous-estiment la résistance à l'effort tranchant.

A l'heure actuelle, les résultats ne permettent pas de se prononcer clairement sur l'influence du rapport a/d sur la réduction de la résistance à l'effort tranchant des bétons de granulats recyclés. Il conviendrait, pour étendre les conclusions de cette étude, de mener d'autres essais en choisissant des valeurs intermédiaires du rapport a/d , comprises entre 1,5 et 3,0.

RÉFÉRENCES

1. Fenwick, R.C. and T.S. Paulay, Mechanisms of shear resistance of concrete beams. Journal of Structural Division, ASCE, 1968. 10: p. 2325-2350.
2. Leonhardt, F. and R. Walther, Schubversuche an einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung. 1962: Berlin.
3. Kani, G.N.J., The riddle of shear failure and its solution. ACI Journal, 1964. 61(4): p. 441-467.
4. EN-1992-1-1, Eurocode 2: Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles. 2004: Bruxelles.

5. prEN-1992-1-1, Eurocode 2: Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles. 2002: Bruxelles.
6. Bazant, Z. and Q. Yu, Designing against size effect on shear strength of reinforced concrete beams without stirrups. *J. Struct. Eng.*, 2005. 113(12): p. 1877–1885.
7. Gastebled, O.J. and I.M. May, Fracture mechanics model applied to shear failure of reinforced concrete beams without stirrups. *ACI Structural Journal*, 2001. 98(2).
8. Zsutty, T., Beam shear strength prediction by analysis of existing data. *ACI Journal*, 1968. 65(11): p. 943-951.
9. Gonzalez-Fonteboa, B. and F. Martinez-Abella, Shear strength of recycled concrete beams. *Construction and Building Materials*, 2007. 21(4): p. 887–893.
10. Fathifazl, G., et al., Shear capacity evaluation of steel reinforced recycled concrete (RRC) beams. *Engineering Structures*, 2011. 33(3): p. 1025–1033.
11. Arezoumandi, M., et al., An experimental study on shear strength of reinforced concrete beams with 100% recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 2014. 53: p. 612-620.
12. Etxeberria, M., A.R. Mari, and E. Vazquez, Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and Structures*, 2007. 40(5): p. 529-541.
13. Schubert, S., et al., Recycled aggregate concrete: Experimental shear resistance of slabs without shear reinforcement. *Engineering Structures*, 2012. 41: p. 490-497.
14. Yun, H.-D., Y.-C. You, and D.-H. Lee, Effects of replacement ratio of recycled coarse aggregate on the shear performance of reinforced concrete beams without shear reinforcement. *LHI Journal*, 2011. 2(4): p. 471-477.
15. Sedran, T., Mise au point des formules de béton de référence. 2013. p. 37.
16. 933-1, N.E., Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage. 2012.
17. 1097-6, N.E., Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau. 2014.

18. RECYBETON, PROJET NATIONAL RECYBETON. <http://www.pnrecybeton.fr>. 2012.
19. R/13/RECY/003, Adhérence béton recyclé / armatures HA. 2015. p. 60.
20. 12390-3, N.E., Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes. 2012.
21. 12390-6, N.E., Essais pour béton durci - Partie 6 : détermination de la résistance en traction par fendage d'éprouvettes. 2012.
22. P18-414, Essai des bétons - Essais non destructifs - Mesure de la fréquence de résonance fondamentale. 1993.
23. ACI-Committee-318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary. 2011, American Concrete Institute: Farmington Hills, MI.