



Projet National de recherche et développement

## RAPPORT DE RECHERCHE

### Thème 2 Comportement structurel : poteaux

Auteurs :  
R. BOISSIERE, F. AL-MAHMOUD, A. HAMAIDIA  
IJL Nancy - ICube

R/16/RECY/033  
LC/14/RECY/61  
Octobre 2016

## **Résumé**

Durant ces dernières années, le thème du recyclage des matériaux a gagné de plus en plus d'attention. Ce dernier a fait l'objet de recherches intensives en raison de l'augmentation de l'exploitation des carrières de granulats qui a entraîné à la longue un épuisement de cette ressource naturelle et des problèmes environnementaux. Cette étude porte sur le comportement mécanique de poteaux en béton armé fabriqués à partir de granulats recyclés ayant la même classe de résistance en compression de béton et soumis à une compression excentrique sous charge statique. Un programme expérimental suivi d'une analyse analytique des recommandations de l'Eurocode 2 sont développées. Quatre poteaux dont un témoin et trois poteaux préparés avec les formulations du projet national de béton recyclé RECYBETON correspondant à différents taux de substitutions de sable et de gravier sont testés. Les poteaux sont instrumentés afin de mesurer les déformations du béton et des aciers. Les résultats semblent montrer qu'un taux de substitution faible entraîne peu de variations dans la charge ultime du poteau par rapport à un poteau témoin. Par contre, un remplacement total des granulats naturels par des recyclés met en avant une variation des propriétés mécaniques et un comportement mécanique assez différents. L'étude analytique montre que l'EUROCODE 2 permet de concevoir des structures de type poteau en béton recyclé de manière sécuritaire.

## **Abstract**

Nowadays, researches are focusing on recycling of materials due to the lack of raw materials easily available on earth and the will to preserve the planet. The following study is dealing with the mechanical behavior of reinforced concrete columns made from Recycled Coarse Aggregates (RCA). These columns are loaded in eccentric static compression load with different RCA replacement ratio in their composition with the same compression strength. An experimental program followed by an analytical analysis is developed. Four concrete compositions are tested: one control column with Natural Aggregate (NA) and three RCA columns composed of different replacement ratio (gravel and sand) as described in the National Project RECYBETON in France. The columns are instrumented with LVDT and strain gauges to measure concrete and steel strains. Results seem to underline that a low RCA replacement ratio exhibit low change in the ultimate strength of RCA columns compared to the NA one. On the other hand, total use of recycled gravels and sand induces a slightly different in mechanical behavior. Finally, the analytical study confirms that EUROCODE 2 standard recommendations allow design of RCA columns in a safe way.

# SOMMAIRE

<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>I) Bibliographie</b>	<b>5</b>
I-1 Les propriétés du béton à base de granulats recyclés	5
<i>I-1.1. Les compositions des bétons à base de granulats recyclés</i>	5
<i>I-1.2. Ouvrabilité des bétons recyclés</i>	6
<i>I-1.3. La performance des bétons recyclés à l'état durci</i>	6
<i>I-1.4. Conclusion</i>	9
I-2 Les poteaux en béton armé sollicités en compression excentrée	9
<i>I-2.1. Dispositif expérimental d'excentrement</i>	9
<i>I-2.2. Les poteaux en béton classique avec chargement excentré</i>	10
<i>I-2.3. Les poteaux en béton armé à base des granulats recyclés</i>	12
<b>II) Etude expérimentale</b>	<b>14</b>
II-1 : Caractérisation des matériaux	14
II-2 : Préparation des corps d'épreuves expérimentaux	16
II-3 : Propriétés mécaniques des bétons durcis	20
II-4 : Propriétés des aciers	22
II-5 : Essai sur les poteaux sous compression excentrée	22
II-6 : Premiers résultats	25
<b>III) Calcul des poteaux selon l'Eurocode</b>	<b>26</b>
III-1 : Les méthodes d'analyse de l'EC2	26
III-2 : Critère de prise en compte des effets du second ordre (ou non)	28
III .3 Calcul de la charge ultime à l'ELU	33
<b>IV) Interprétation de résultats</b>	<b>39</b>
IV-1 : Observation des poteaux	39
IV-2 : Etude de la flèche	42
IV.3 : Etude des déformations et déplacements longitudinaux	43
<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>50</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>51</b>
<b>Annexe</b>	<b>53</b>

## Introduction

L'étude présentée dans ce rapport s'inscrit dans le thème 2 « Matériaux et structures » du Projet National (PN) RECYBETON. Elle constitue une réponse au sujet 12 « Comportement structurel : poteau ». Nous tenons d'abord à remercier Mr Bernard Fouré pour l'aide et les conseils prodigués lors de ce projet.

Durant ces dernières années, le thème du recyclage des matériaux a gagné de plus en plus d'attention. Ce dernier a fait l'objet des recherches intensives en raison de l'augmentation de l'exploitation des carrières de granulats qui a entraîné à la longue un épuisement de cette ressource naturelle et des problèmes environnementaux. De plus, on estime chaque année à 20 millions de tonnes le volume de déchets inertes provenant du bâtiment, dont 36 % de matériaux cimentaires [1], ce qui a amené les chercheurs à s'associer autour d'un projet novateur qui consiste à réutiliser le béton recyclé dans la formulation de nouveaux bétons. Dans ce contexte, l'idée du projet national RECYBETON est apparue dans le but principal de préserver l'environnement et réduire les dépenses sur la gestion des déchets de démolition. Cette valorisation offrira dans un futur proche un débouché économique intéressant pour les entreprises.

Aujourd'hui des recherches menées sur l'utilisation des granulats recyclés se sont intéressées à leur influence sur la microstructure du béton et ont identifié les propriétés physico-chimiques des granulats recyclés [2]. Cependant, il existe très peu de travaux de recherche relatifs au comportement structural du béton recyclé.

Dans le but de développer l'utilisation des bétons recyclés, il est important de réaliser des essais à grande échelle sur des structures types afin d'appréhender leur comportement et de répondre aux exigences voulues en termes de résistance, rigidité et ductilité. Dans ce cadre, nous avons mené une recherche expérimentale sur des poteaux en béton armé recyclé tout en évaluant l'applicabilité de la norme actuelle. Les poteaux sont tous soumis à une charge de compression excentrée.

Ce document sert à présenter les résultats des premières recherches bibliographiques et des premiers tests de caractérisation ainsi que le protocole d'essai pour la sollicitation des poteaux en compression excentrée.

L'étude bibliographique s'articulera autour de caractéristiques de bétons recyclés et les recherches traitant du comportement des poteaux testés sous compression excentrée. Pour la partie action concrète, une campagne expérimentale sur 4 poteaux C25/30 avec différents niveaux de substitution est réalisée.

# I) BIBLIOGRAPHIE

## I-1 Les propriétés du béton à base de granulats recyclés

La thématique des bétons de granulats recyclés est un sujet vaste qui couvre un grand nombre d'études. La résistance mécanique du béton est généralement considérée comme sa plus importante propriété bien que, dans de nombreux cas pratiques, d'autres caractéristiques telles que la durabilité et la perméabilité peuvent être plus importantes. Néanmoins, la résistance mécanique projette une image de la qualité d'un béton et elle représente un paramètre majeur et indispensable pour le dimensionnement et la conception des ouvrages. De ce fait, les propriétés mécaniques du béton ont fait l'objet de cette étude pour comprendre la réponse du béton armé aux actions mécaniques qui sont appliquées.

### I-1.1. Les compositions des bétons à base de granulats recyclés

Les bétons à base de granulats recyclés dont la composition est mise en valeur sur la figure 1 présentent des caractéristiques un peu différentes des bétons formulés avec des granulats naturels et cela est dû aux éléments constitutifs des granulats recyclés [3] :

- Des granulats naturels concassés partiellement.
- La pâte de ciment enrobant les granulats naturels.



**Figure 1:** Compositions des granulats recyclés de béton [3].

La présence de mortier est la cause de la perte des caractéristiques des granulats recyclés : une densité plus faible, une forte capacité à absorber l'eau, des teneurs en sulfates et en alcalins plus élevées. Ces caractéristiques sont susceptibles d'affecter le comportement rhéologique du béton à l'état frais. De nombreuses études ont confirmé que la qualité des granulats recyclés est inférieure à celle des granulats naturels [4].

De ce fait, on en déduit que la quantité et la qualité de la pâte de ciment présente sur les granulats d'origine exercent une influence sur les propriétés des granulats recyclés.

## **I-1.2. Ouvrabilité des bétons recyclés**

L'absorption d'eau par les granulats recyclés est également la conséquence de la présence d'une structure alvéolaire de l'ancien mortier collé aux granulats. Les alvéoles captent l'eau et la retiennent, ce qui réduit l'ouvrabilité du béton ; cette propriété reste valable quel que soit l'origine du béton d'origine. En outre, la nécessité d'ajout d'eau supplémentaire aura pour conséquences de diminuer les résistances mécaniques du béton.

Des études ont montré que les bétons formulés à base des granulats recyclés nécessitent environ 5 à 15% d'eau supplémentaire pour un même affaissement qu'un béton classique [5]. Ceci nécessite parfois l'utilisation d'un adjuvant afin de diminuer l'apport en eau. À l'état frais, le béton recyclé se caractérise par une masse volumique plus faible que celle des bétons classiques, du fait de mortier ancien, accompagnée d'une augmentation du volume de l'air occlus.

## **I-1.3. La performance des bétons recyclés à l'état durci**

Il est essentiel d'effectuer des essais de divers indices de résistance et de module d'élasticité, avant l'application du béton de granulats recyclés dans une structure en béton armé. En outre, le béton de granulats recyclés doit posséder une résistance suffisante et une bonne capacité de déformation. La lecture bibliographique a permis de comparer la performance du béton recyclé par rapport un béton classique.

### **Résistance en compression**

D'après les résultats issus des essais de compression, la résistance en compression des bétons formulés à base de granulats recyclés est plus faible que celle d'un béton à base de granulats naturels de l'ordre 5 à 40%. Cette baisse de la résistance mécanique est liée à plusieurs facteurs :

#### **Le rapport E/C**

[Deng X., 2005] [6] ont étudié l'influence du rapport E/C sur la résistance mécanique en compression du béton formulé avec 100% des granulats recyclés. Ils ont pu constater que la résistance diminue lorsque le rapport E/C est supérieur à 0.57.

D'après [Angulo et al, 2010] [7], une porosité des granulats inférieure à 17% affecte peu la résistance à la compression, quel que soit le rapport E/C.

#### **Le taux de substitution**

Plusieurs chercheurs ont prouvé que la résistance en compression diminue également en augmentant le taux de substitution en granulats recyclés. Cependant, si le taux de remplacement des granulats naturels est inférieur à 30% l'influence sur la résistance en compression n'est pas significative [8].

#### **La qualité du béton d'origine**

Les résultats des essais de Xiao et al. [9] ont montré que l'utilisation des granulats recyclés issus d'un béton haute résistance conduit à des valeurs du module d'élasticité plus importantes. La qualité de la pâte de ciment du béton d'origine est primordiale dans la

définition des propriétés des granulats recyclés selon les auteurs. Par conséquent, avant la fabrication du béton de granulats recyclés, il est nécessaire d'effectuer un test pour la résistance du béton ancien. Ensuite, on peut définir selon la résistance du béton original la limite de résistance du béton de granulats recyclés.

### **Des conditions de conservation**

Des essais menés par Chakradhara et al [10] montrent que le béton à base des granulats recyclés conservé dans l'air après une cure humide partielle possède une résistance plus élevée que celle d'un béton conservé en milieu humide.

### **Degré de saturation des granulats**

Des travaux plus récents [11] ont traité l'influence de la pré-humidification des granulats avant le malaxage. Les résultats ont montré que la résistance en compression des bétons est plus faible lorsque les gravillons recyclés sont sous-saturés ou dans le cas où les sables recyclés sont proches de leur niveau de saturation.

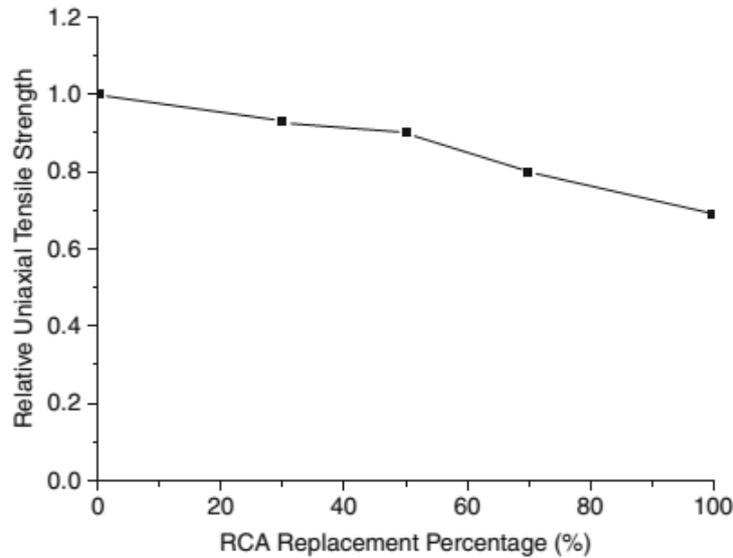
### **Protocole de malaxage**

Le malaxage joue un rôle important sur la résistance du béton au jeune âge et le procédé TSMA (le pré-malaxage des granulats et eau incorporé en plusieurs étapes) conduit à des résistances à la compression plus importantes [12].

## **La résistance à la traction**

### **Uniaxial**

La résistance à la traction est aussi une caractéristique mécanique essentielle du béton, Chakradhara et al. [10] ont étudié le comportement des bétons recyclés avec différentes quantités de remplacement des granulats sous traction uniaxiale. Les résultats des essais indiquent qu'une augmentation du taux de substitution en granulats recyclés conduit à une réduction de la résistance à la traction pour la même classe de résistance en compression, (figure 2). Lorsque le taux atteint 100%, la résistance baisse de 31% par rapport à celle du béton classique.



**Figure 2:** Evolution de la résistance en traction uniaxiale en fonction du taux de substitution [10].

### **Traction par fendage et par flexion**

Les essais de traction par fendage et de flexion ont montré que la résistance à la traction est affectée par la substitution des gravillons naturels avec des recyclés ; la résistance diminue lorsque le taux augmente pour la même classe de résistance en compression [13].

D'autres chercheurs ont observé que la rupture se produit non seulement à partir des interfaces entre les granulats et la pâte de ciment que l'on observe normalement en béton classique, mais aussi à l'intérieur des granulats recyclés eux-mêmes [14].

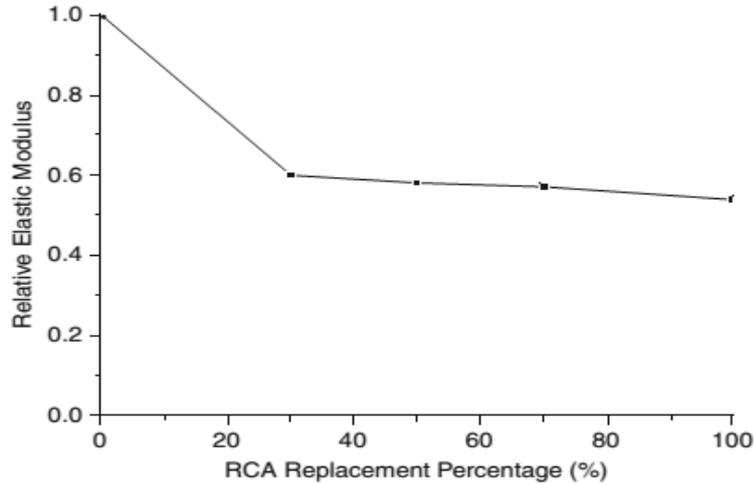
### **Energie de rupture**

Les essais de flexion conduits par Casuccio [15] ont souligné que l'énergie de rupture des bétons à granulats recyclés est inférieure à celle des bétons à granulats naturels (27-45%).

### **Module élastique**

De nombreux essais sur le module d'élasticité des bétons fabriqués avec 100% de granulats recyclés ont été réalisés. Le module d'élasticité des bétons à granulats recyclés est toujours inférieur à celui du béton classique et ce module diminue avec l'augmentation de taux de remplacement. Chakradhara et al. [10] ont trouvé des valeurs de module d'élasticité jusqu'à 45% inférieures à celle des bétons à granulats naturels. La figure 3 illustre la relation entre le module d'élasticité et le taux de substitution.

Les essais réalisés par Xiao et al. [16] montrent que le module d'élasticité des bétons à granulats recyclés est inférieur à celle des bétons classiques (15-25%). Cette diminution est attribuée à la présence de l'ancienne pâte de ciment autour des granulats et sa structure alvéolaire.



**Figure 3:** Evolution du module élasticité en fonction du taux de substitution [10].

### **I-1.4. Conclusion**

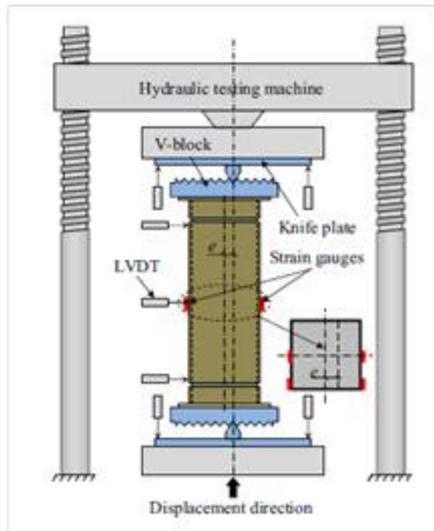
Cette première étude bibliographique a permis de définir les propriétés d'un béton de granulats recyclés et de comparer leurs performances par rapport à un béton de même composition formulé à base des granulats naturels, après le programme de recherche pourra s'orienter autour des éléments structuraux à approfondir.

## **I-2 Les poteaux en béton armé sollicités en compression excentrée**

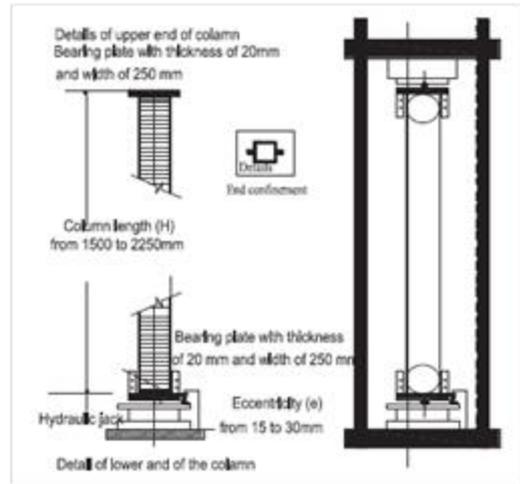
### **I-2.1. Dispositif expérimental d'excentrement**

Des dispositifs d'excentrement ont été proposés dans la littérature, (figure 4). L'objectif est d'appliquer une charge excentrée avec des articulations aux extrémités des poteaux. L'articulation aux extrémités est a été appliquée par l'un des dispositifs suivants:

- Un système en V (V-block) glissant sur une base dotée de reliefs métalliques permettant d'ajuster l'excentricité, (figure 4-1)
- Un système de cylindre : ce système consiste en plaques creusées fixées en partie haute et basse du vérin de la presse servant à appliquer la charge excentrée à l'aide des cylindres placés entre ces plaques et des collets métallique,(figures 4-2 et 3).
- Un poteau avec une console courte en béton armé: un élément prismatique en encorbellement sur un poteau, (figure 4-4).



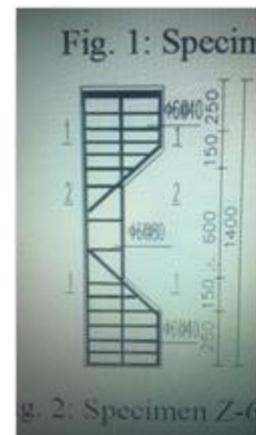
1



2



3



4

**Figure 4:** Quelques dispositifs d'excentrement (1, 2,3 et 4) proposés par [21,] [17], [22] et [20] respectivement.

## I-2.2. Les poteaux en béton classique avec chargement excentré

Hany et al [17] ont étudié la performance des poteaux en béton à haute résistance. Les chercheurs se sont intéressés à l'évaluation de l'effet de certains paramètres tel que l'excentricité du chargement appliqué.

Le programme expérimental est composé d'une série de trois poteaux en béton haute résistance d'une section transversale 150x150 mm et d'une longueur de 1.5 m. Une configuration d'armature longitudinale et transversale a été adoptée avec un espacement de 60 mm entre les cadres. Les poteaux ont été soumis à une force de compression excentrée. Une plaque en aciers 250\*250\*20 mm a été placée entre la tête de la presse et les extrémités du poteau afin de réduire l'effet de la concentration de la charge. Durant les essais, le déplacement axial et la déformation transversale des poteaux ont été mesurés. Les essais ont montré que l'apparition de la première fissure dans les poteaux S1-E10, S2- E15 et S3 -E20 (avec E la valeur de l'excentricité en mm) s'est produite à partir de 79%, 89%, et 86%, respectivement de la résistance maximale des poteaux ; soit un écart de 10% et 7% pour le

deuxième et troisième poteau. La fissure s'est produite dans la zone comprimée sur la partie haute des poteaux. Les fissures se propagent et deviennent plus larges lorsque la charge s'approche de la charge ultime.

Dans tous les cas, le déplacement maximal (latéral et longitudinal) s'est produit au milieu. La déformation des armatures comprimées ne dépasse pas la limite élastique, les étriers sont soumis à une contrainte de traction, mais aucun d'entre eux n'a atteint sa limite élastique.

La rupture s'est produite soudainement au tiers supérieur du poteau S1-E10 dans la partie comprimée, cela est lié à la propagation des fissures due à l'écrasement brutal du béton et au flambement des barres principales dans la zone de comprimée.

Par contre, pour les poteaux S2-E15, E20-S3, la rupture s'est produite progressivement au tiers inférieur de la hauteur des poteaux dans la zone comprimée associée à l'écrasement du béton. Le flambement des barres principales dans la zone de compression et les fissures de traction se développent simultanément d'une manière relativement ductile.

### **Analyse des résultats**

L'augmentation de l'excentricité de la charge appliquée mène à la diminution de la section comprimée au milieu. Pour le poteau S1-E10 sous chargement la section est entièrement comprimée tandis que dans les poteaux S2-E15 et S3-E20 la section comprimée représente 83% et 73% respectivement, de la section total.

Les valeurs les plus élevées de la déformation sont obtenues avec les poteaux S2-E15 et S3-E20. Ces déformations sont supérieures à celle pour le poteau S1-E10. Ainsi la flèche est plus élevée avec les poteaux S2-E15, S3-E20 ce qui prouve que ces derniers présentent une ductilité plus élevée que celle du poteau S1-E10.

Le poteau S1-E10, en comparaison au poteau S3-E20, présente une charge de rupture supérieure de l'ordre de 9.5%. par contre, en comparaison au poteau S2-E15, il présente une plus faible charge de rupture, l'écart étant de l'ordre de 1.5%.

Les courbes de la charge en fonction du déplacement à mi-hauteur des poteaux montrent que les poteaux chargés avec une faible excentricité entrent dans la phase de ruine d'une manière fragile, en présentant peu de fissures due à la traction. Sur ces poteaux, on observe également un décollement ou un détachement de la peau du béton sous forme d'écaillage.

Par contre, les poteaux soumis à des charges plus excentrées, tel que le poteau S2-E15, présentent un comportement plus ductile dû à l'effort de traction combiné aux déformations plus avérées. On peut noter également un écaillage plus représentatif de la peau du béton et le flambement par flexion du poteau, lorsque la charge limite est atteinte.

### **Conclusion**

La différence de performance entre les poteaux confectionnés pourrait s'expliquer par la différence d'excentrement de la charge. Ceci implique que l'augmentation de l'excentricité à 50% et 100% entraîne une réduction de la capacité portante sur le poteau de 7.5% et 16.6%, et engendre aussi une augmentation du déplacement à mi-hauteur de 63% et 89%, respectivement.

Une augmentation de l'excentricité conduit donc à deux effets :

- La diminution de la performance des poteaux.
- L'augmentation du déplacement à mi-hauteur et la contrainte de compression du béton.

### I-2.3. Les poteaux en béton armé à base des granulats recyclés

Très peu d'études ont été effectuées sur les poteaux sous chargement de compression (centrique ou non) pour des éléments en béton contenant des granulats recyclés

[Zhou et al, 2010][18] ont étudié le comportement des poteaux fabriqués avec un béton à base de granulats recyclés (RecycledAggregateConcrete, RAC) sous chargement de compression excentriques élevés avec différents taux de substitutions de granulats.

Il a été conclu de cette étude que, pour la même classe de résistance en compression, la charge ultime des poteaux de béton recyclé diminue progressivement pour un pourcentage de granulats recyclés entre 0 à 80%. Les résultats de leurs essais ont montré que le déplacement transversal des poteaux fabriqués à partir du béton recyclé semble être supérieur à celui d'un poteau fabriqué avec un béton ordinaire. Ils ont conclu également que la capacité portante des poteaux en béton recyclé a diminué avec l'augmentation du taux de substitutions, mais les poteaux confectionnés avec 50% de granulats recyclés donnent un bon comportement à savoir que la résistance ultime augmente au lieu de diminuer. Le déplacement latéral augmente avec l'augmentation du taux de substitutions, (figure 5), mais il reste comparable avec celui du béton ordinaire, ce qui indique que le béton recyclé présente une ductilité légèrement plus élevée. Toutefois, leurs résultats peuvent être limités, car ils dépendent des propriétés des granulats recyclés utilisés.

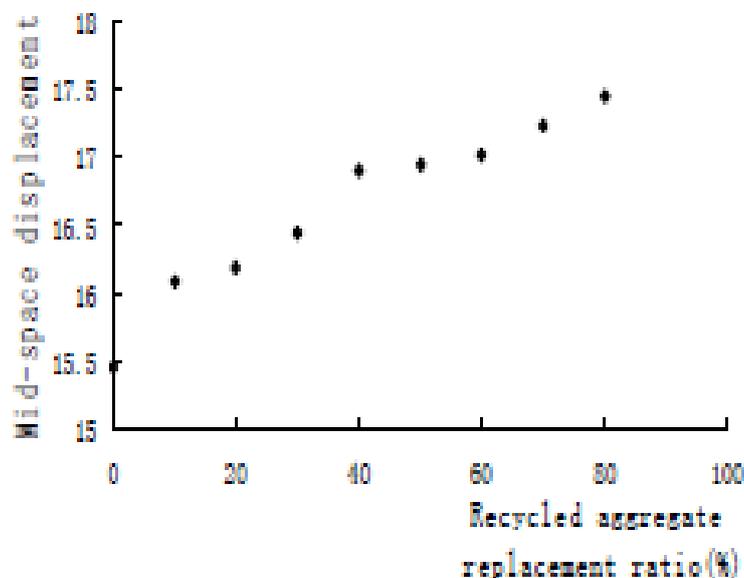
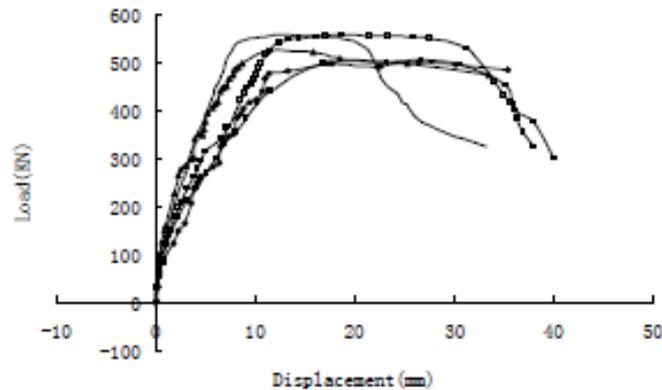


Figure 5: courbe déplacement –taux substitutions [18].

Les courbes (charge-déplacement) des poteaux fabriqués en béton recyclé sont semblables à celles des poteaux en béton ordinaire avec un domaine élastique évident et un domaine plastique, (figure 6).



**Figure 6:** courbes chargement –déplacement [18].

[Breccolotti et al, 2010][19] ont effectué une analyse de la performance mécanique des éléments de RAC sur la base des propriétés statistiques de la résistance à la compression de RAC. Leurs résultats ont montré que l'utilisation des granulats recyclés dans le béton est possible, même avec le remplacement complet des granulats naturels, mais qu'une telle utilisation nécessite des procédures de conception strictes pour assurer la même performance structurale que le béton classique.

Une étude a été réalisée par [Liu et al, 2010] [20] sur le comportement et les performances mécaniques des poteaux en béton armé recyclé de la même classe de résistance en compression (45/50 MPa). Ils ont effectué des essais sur six poteaux en béton ordinaire et béton recyclé, les taux de substitutions étaient de 0 et 100%, les valeurs d'excentricités étaient de 60 et 150 mm. Les résultats obtenus montrent que :

Dans le cas des poteaux Z-0-0 et Z-0-100 (excentricité nulle), la première fissure verticale est apparue sur la surface du béton au niveau de la partie supérieure du poteau. Puis, avec l'augmentation de la charge, le béton s'est éclaté au milieu du poteau. Au cours du chargement, le béton recyclé et ordinaire ont montré le même comportement.

Pour les poteaux Z-60-0 et Z-60-100(excentricité de 60 mm), des fissures verticales sont apparues au niveau de l'angle sud-est du poteau. Lorsque la charge augmente à environ 70% de la charge ultime, la déformation des armatures longitudinales comprimées ont atteint la valeur de la déformation ultime.

Dans le cas des poteaux Z-150-0 et Z-150-100 (excentricité de 150 mm), des fissures transversales sur la partie tendue du poteau se sont développées autour du bord extérieur. Ces fissures sont dispersées uniformément et se sont connectées avec les petites fissures qui apparaissent dans les deux côtés du poteau. Lorsque la charge a atteint 85% de la charge ultime, les armatures longitudinales de la zone comprimée ont enregistré 50% de la déformation ultime. Peu de temps avant la rupture, les fissures dans la zone tendue sont

devenues plus longues et plus larges et le béton sur le bord de la zone comprimée s'est écrasé. Ils ont noté également que :

- Le comportement et le mécanisme de rupture du poteau en béton recyclé sont semblables à ceux des poteaux de béton ordinaires.
- La capacité portante des poteaux en béton ordinaire est plus élevée que les poteaux en béton recyclé.

### **Conclusion**

Ces travaux de recherche ont permis de mettre en évidence le comportement structural des poteaux fabriqués à base des granulats recyclés, sollicités en flexion composée sous charge statique. Pour la même classe de résistance en compression de béton, la présence des granulats recyclés diminue la capacité portante des poteaux par rapport aux poteaux fabriqués avec du béton à base de granulats naturels. Cette diminution de la résistance ultime est accompagnée d'une augmentation de la flèche au cours du chargement. L'utilisation des granulats recyclés affecte le réseau de fissures et leurs tailles augmentent avec le taux de substitution, selon les propriétés des granulats recyclés utilisés. Ce travail se propose donc de vérifier l'influence des granulats recyclés sur le comportement structural des poteaux.

## **II) ETUDE EXPERIMENTALE**

### **II-1 Caractérisation des matériaux**

#### **Le Ciment**

Le ciment utilisé est de classe et type CEM II/A-L 42.5 de Rochefort fourni par Holcim.

#### **Les Fillers calcaires**

Les fillers calcaires betocarb HP-OG sont utilisées avec pour but d'améliorer le squelette granulaire des bétons.

#### **Les Adjuvants**

Les adjuvants utilisés dans ce projet sont :

1. MC PowerFlow 3140 qui est un superplastifiant, qui assure une ouvrabilité suffisante de ces matériaux. Il peut également augmenter la résistance à jeune âge aussi bien que la résistance ultime.
2. Centrament Retard qui est un retardateur de prise mais son utilisation dans le cas des bétons confectionnés avec du sable recyclé permet de maintenir l'ouvrabilité souhaitée pendant le coulage.

#### **Les Granulats**

Les granulats employés dans ce présent travail ont été proposés par l'UNPG :

Granulats naturels

- 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.

## Granulats recyclés

Le sable et les gravillons recyclés qui sont utilisés proviennent de la plateforme DLB de Gonesse. Ces granulats calcaires concassés sont fournis en tant que classes granulaires :

- Sable recyclé 0/4.
- Gravillons recyclés de classes 4/10 et 10/20.

Il est important de déterminer les caractéristiques intrinsèques des granulats, puisque ces derniers constituent le squelette du béton et plus de 70% de son volume, ils influent donc fortement sur ses caractéristiques. Le tableau 1 correspond à l'ensemble des résultats obtenus par la mesure de la masse volumique et le coefficient d'absorption des granulats utilisés selon le protocole NF EN 1097-6.

Essai	Sable naturel 0/4	Sable recyclé 0/4	Gravillon naturel 4/10	Gravillon recyclé 4/10	Gravillon naturel 6.3/20	Gravillon recyclé 10/20
Coefficient d'absorption W24%	0.89	8.22	0.60	5.11	0.37	5.31
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2600	2100	2710	2270	2675	2260

**Tableau 1** : Caractéristiques des granulats.

## Formulations des bétons

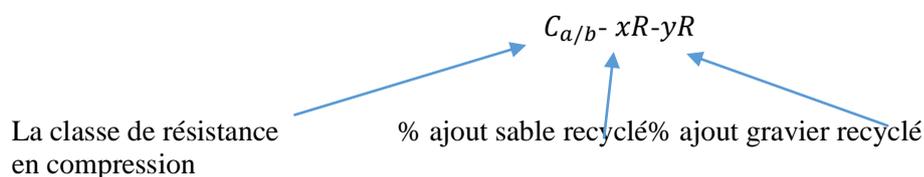
Le tableau 2 représente la composition des mélanges des bétons utilisés dans le cadre de PN RECYBETON pour la confection des poteaux, avec la classe du béton C25/30.

Constituant (kg/m <sup>3</sup> )	C25/30-0R-0R	C25/30-0R-100R	C25/30-30R-30R	C25/30-100R-100R
Eau d'ajout	<b>190</b>	<b>244</b>	<b>228</b>	<b>303</b>
Ciment Cem II/A-L 42,5 N de Rochefort	<b>270</b>	<b>282</b>	<b>277</b>	<b>326</b>
Filler calcaire Betocarb HP OG	<b>45</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>50</b>
Sable Sandrancourt	<b>780</b>	<b>806</b>	<b>500</b>	
Sable recyclé 0/4			<b>218</b>	<b>673</b>
Gravillon Givet 4/10	<b>267</b>		<b>171</b>	
Sable recyclé 4/10		<b>163</b>	<b>145</b>	<b>304</b>

Gravillon Givet 6,3/20	<b>820</b>		<b>552</b>	
Gravillon recyclé 10/20		<b>701</b>	<b>167</b>	<b>442</b>
Superplastifiant MC PowerFlow 3140	<b>1.31</b>	<b>1.4</b>	<b>1.08</b>	<b>1.18</b>
Retardateur Centrament Retard 370	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1.1</b>	<b>2.6</b>
Eau efficace (kg/m <sup>3</sup> )	<b>180</b>	<b>189</b>	<b>185</b>	<b>199</b>

**Tableau 2:**Composition des bétons (RECYBETON)

**Rappel :**



**Nb :** L'ensemble des formules testées sont données sur granulats secs.

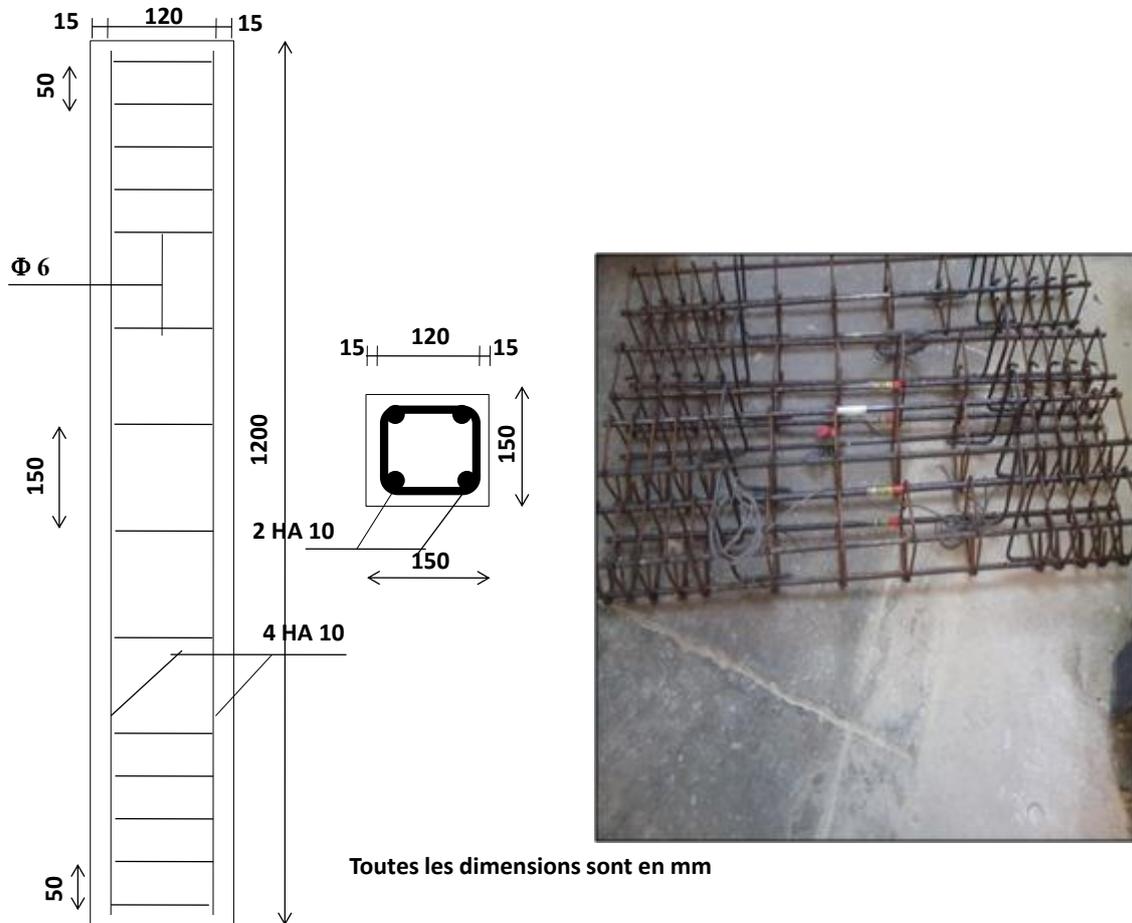
Compte tenu des conditions climatiques et de l'hétérogénéité de la teneur en eau des matériaux constitutifs du béton, nous sommes partis sur la base d'une homogénéisation des caractéristiques hydriques des matériaux par la voie de séchage à l'étuve à 105°C. Puis, les granulats ont été conservés dans des sacs hermétiques jusqu'à la fabrication des bétons.

Dans ce projet, les formulations ont été déterminées à partir du logiciel BétonLab Pro3 par les partenaires du projet RECYBETON. L'affaissement visé étant de 21cm, soit une classe de consistance S4. Les diverses formulations ont un rapport E/C égal à 0.6. Par ailleurs, on note l'usage d'un retardateur dans le cas des formulations qui contiennent du sable recyclé. La fabrication du béton requiert une démarche à suivre telle décrit par le rapport R/13/RECY/003.

## II-2 Préparation des corps d'essais expérimentaux

Le programme expérimental est composé d'une série de quatre poteaux de section carrée 150\*150mm. Pour cause de la limitation de la hauteur de la machine d'essais, une longueur de 1200 mm a été imposée et gardée identique pour l'ensemble des poteaux. Les poteaux étudiés ont été conçus au plus proche de la réalité des constructions existantes, de sorte à avoir des

élanements les plus importants possibles. Ici, l'élanement sera de 8 à cause des contraintes expérimentales, en particulier la hauteur limitée de la machine. Les poteaux sont confectionnés avec des bétons formulés suivant les compositions et le protocole exigé par le rapport R/13/RECY/003(tableau 2). Les poteaux sont ferrillés de la même manière, soit 4 barres longitudinales HA10 de nuance FeE500, maintenues par des cadres de diamètre  $\phi 6$ . L'espacement entre ces derniers est présenté sur la figure 7 ainsi que les caractéristiques géométriques.



**Figure 7:** Détail du Ferrailage.

Deux jauges de déformations ont été placées sur les aciers longitudinaux disposés sur la face tendue ce qui nous permet de mesurer les déformations de l'acier. Les jauges ont été protégées avec des films en polyéthylène ainsi que les fils en utilisant des gaines en plastique. La Figure 8 indique l'emplacement des jauges collées sur les aciers.



**Figure 8:** Position des jauges sur aciers.

### $C_{a/b} - xR - yR$ La procédure de pré-humidification

Quatre heures avant le coulage, dans un bac on dépose les granulats nécessaires pour la formulation. Par mesure de précaution, une membrane étanche est placée tout autour du bac afin d'éviter toute perte d'eau pouvant être causée par l'absorption en paroi. Une quantité d'eau est ajoutée aux granulats afin d'atteindre la teneur en eau visée (abs+1%) c'est-à-dire :

- ✓ 9.9% pour le sable recyclé 0/4
- ✓ 6.6 % pour le gravillon recycle 4/10
- ✓ 6.8 % pour le gravillon recyclé 10/20

### Procédure de malaxage

Le malaxage a été réalisé dans un malaxeur d'une capacité de 150 Litres, qui mélange des constituants par simple rotation. La vitesse de rotation est de l'ordre de 73 Tours par minute. Le temps du malaxage est de 5 minutes réparti comme suit :

- une minute de malaxage à sec de tous les constituants.
- introduction de l'eau contenant le superplastifiant et le retardateur s'il existe durant 30 secondes.
- malaxage humide pendant 03 minutes et 30 secondes.

Les actions suivantes ont été réalisées sur chaque gâchées:

- ✓ Mesure de l'affaissement.
- ✓ Mesure de l'air occlus à l'aéromètre.
- ✓ Mesure de la masse volumique du béton frais.

Les propriétés à l'état frais des bétons sont présentées dans le tableau 3.

Essai	C25-0R-0R	C25-30R-30R	C25-0R-100R	C25-100R-100R
Affaissement (cm)	16.7	19.2	18.1	20.7
Teneur en air %	1.7	1.8	2.7	3.5
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2340	2300	2240	2110

**Tableau 3:** Propriété des bétons a l'état frais.

Par analyse des résultats, on réalise que les divers bétons respectent la maniabilité requise. Nous constatons également une chute de la masse volumique du béton à granulats recyclés, accompagnée d'une augmentation du volume de l'air occlus. Cette augmentation est due à la forte porosité de l'ancien mortier collé aux granulats et sa structure alvéolaire.

Pour chaque béton, des cylindres 16x32 cm ont été préparés afin de caractériser la résistance à la compression, traction et le module d'élasticité. Les cages d'armatures sont placées dans des coffrages en bois de section 150\*150\*1200 mm de façon centrée en tenant compte de l'enrobage de 15mm. Grâce à une aiguille vibrante, chaque couche est vibrée pour assurer une bonne consolidation du béton (figure 9).



**Figure 9:** Confection des poteaux.

Les éprouvettes ont été démoulées après 24 h, et conservées dans des bacs d'eau pendant 28 jours, puis testées. Les poteaux ont été décoffrés 24 heures après la coulée, puis identifiés. Ils ont été laissés à l'air libre jusqu'au jour de l'essai.

**Nb :** 7 jours après le coulage, nous avons remarqué l'existence d'une fissure sur le poteau 100R-100R, ce qui est éventuellement lié au fort retrait provoqué par le sable recyclé, (figure 10). Cette fissure qui a une ouverture de  $< 0.5$  mm et une longueur de 7 cm environ et placée sur la partie haute de la face comprimée s'est refermée pendant le chargement.



**Figure 10:** Une fissure sur le poteau 100 R – 100 R.

### II-3 Propriétés mécaniques des bétons durcis

Pour déterminer les propriétés mécaniques des bétons, des essais de compression, de traction et module d'élasticité ont été réalisés sur des éprouvettes stockées avec des conditions de conservations normalisées suivant la norme NF EN 12390-2 soit dans l'eau à température de  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ . Les résultats concernant les essais mécaniques effectués à 28 jours (sauf le carottage) et détaillées annexe 1 sont récapitulés dans le tableau 4.

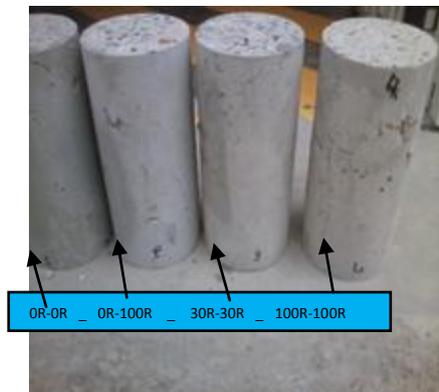
Repère	Béton Masse vol. (kg/m <sup>3</sup> )	f <sub>cc</sub> (28 j) (MPa)	Carottes f <sub>cc</sub> (MPa)	Module (28 j) E <sub>c</sub> (GPa)	Fendage (28 j) f <sub>t,sp</sub> (MPa)
<b>0R-0R</b>	2340	28.4	22.5	24.3	2.85
<b>30R-30R</b>	2300	28.7	22.9	21.9	2.85
<b>0R-100R</b>	2240	27.9	22.8	21.5	2.7
<b>100R-100R</b>	2110	29.0	22.4	17.2	2.5
<b>Moyenne</b>	2250	28.5	22.65	21.2 E <sub>c0</sub> : 23.6	2.7

**Tableau 4:** Les propriétés mécaniques des bétons

#### La résistance en compression

Les résultats des essais montrent que les bétons sont conformes aux exigences de sa classe C<sub>25</sub>. La figure 11 montre les éprouvettes après rupture par compression. Des carottes ont également été effectuées pour vérifier la résistance à la compression des poteaux. En effet les modes de stockage sont différents car les poteaux ont été stockés à l'air contrairement aux éprouvettes stockées dans l'eau. On peut donc supposer que la résistance réelle des poteaux en

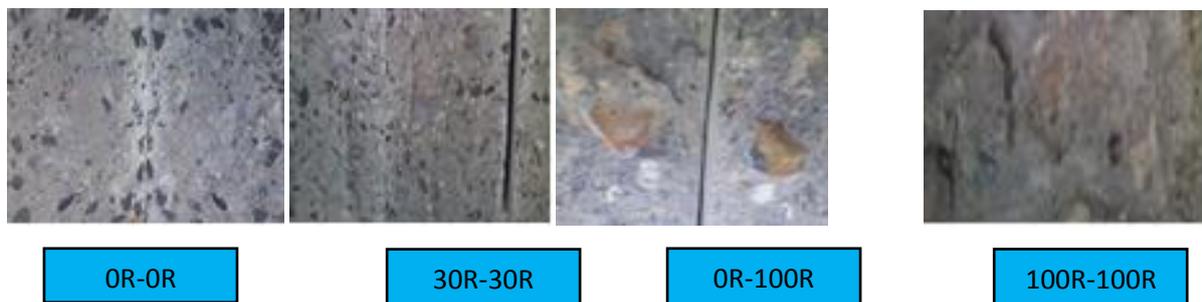
compression pourrait être légèrement inférieure à celle des éprouvettes et ceci est confirmé par les carottages effectués sur les poteaux. Nous soulignons tout de même que la taille de carottage (diamètre de 5 cm) ne permet pas d'être catégorique sur ce point car cette taille est très faible par rapport à la taille des granulats pour que ces carottes soient complètement représentatives du poteau dans son ensemble. Néanmoins, les résistances moyennes des poteaux peuvent être légèrement inférieures à celles des poteaux (-10%) du fait de l'hydratation accélérée du ciment dans les cas des éprouvettes conservées dans l'eau.



**Figure 11:** Eprouvettes après rupture par compression.

### La résistance à la traction

La résistance à la traction diminue avec l'augmentation du taux de substitution en granulats recyclés. Dans le cas des bétons fabriqués à base des granulats recyclés, nous avons observé que la rupture se produit non seulement aux interfaces entre les granulats et la pâte de ciment, mais aussi dans les granulats recyclés eux-mêmes (figure 12).



**Figure 12:** Les interfaces des bétons cassés par fendage.

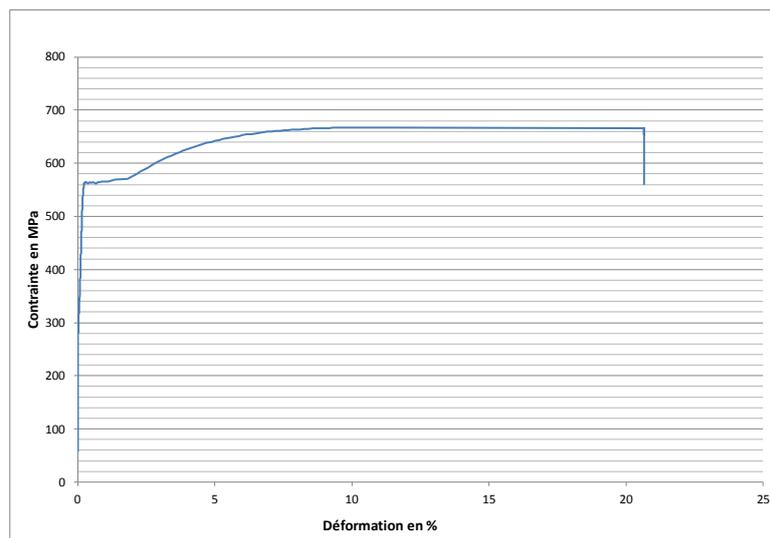
### Module d'élasticité

Les déformations ont été mesurées à l'aide d'un extensomètre de 3 capteurs LVDT situés sur des génératrices espacées de 120°. Cette instrumentation a permis de mesurer le module d'élasticité statique et d'obtenir la courbe contrainte-déformation pour chaque éprouvette testée (tableau 4). Les résultats des essais de module d'élasticité montrent que le module d'élasticité est affecté par le taux de substitution, nous avons trouvé que les bétons fabriqués avec 100% du sable recyclé et 100% graviers recyclés présentent une valeur du module d'élasticité réduite de 27% par rapport à celle du béton de référence. Cependant, ces modules semblent particulièrement faibles. Nous avons donc testé une même éprouvette type selon

deux méthodes (extensomètre et mesure par jauges de déformation) afin de comparer les résultats obtenus. Une différence de 20 à 30 %, module plus important dans le cas des jauges, a été observée. Malheureusement, cette double mesure n'a pas été réalisée sur des éprouvettes du PN et il nous paraît peu prudent de modifier nos valeurs de module sur ce seul test. Les modules obtenus sur les éprouvettes du PN par la méthode extensométrique restent proportionnellement cohérents car ils ont tous été mesurés selon la même méthode.

## II-4 Propriétés mécaniques des aciers

Nous avons vérifié la résistance des aciers HA10 par des essais de traction sur 2 spécimens dont un est présenté figure 13.



**Figure13 :** Courbe contraintes-déformations des armatures acier HA10

L'observation de la courbe figure 13 permet de déterminer une résistance élastique des aciers de 560 MPa. C'est cette valeur qui sera utilisée pour les calculs théoriques. Les propriétés mécaniques des aciers HA 10 sont résumées dans le tableau 5.

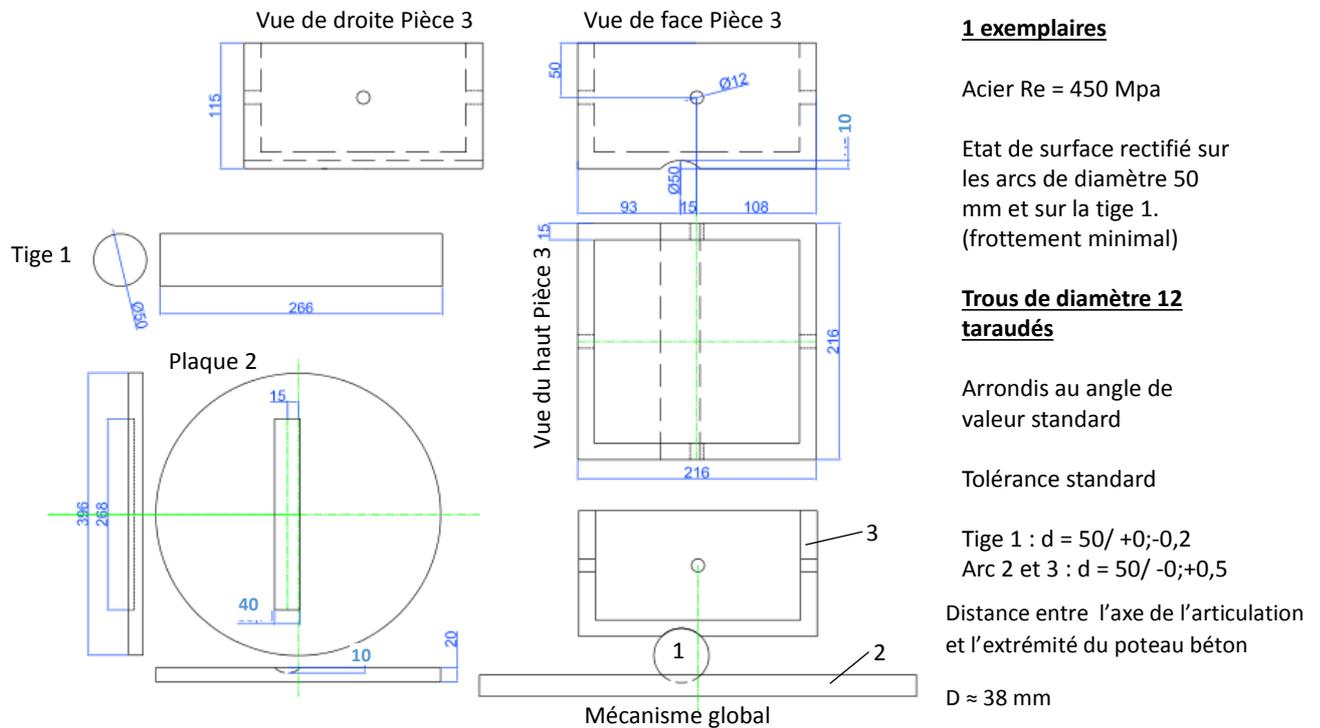
Module d'Young	Limite élastique	Contraintes à la rupture	Déformation à la rupture
200 000 MPa	560 MPa	665 MPa	20 %

**Tableau 5:** Les propriétés mécaniques des aciers

## II-5 Essai sur les poteaux sous compression excentrée

Les essais de compression excentrée sur poteau ont été effectués à l'aide d'une presse hydraulique d'une capacité maximale de 2000 kN. Les poteaux ont été munis à chacune de leurs extrémités d'un collet métallique de section 200\*200 mm et de profondeur 150 mm. Ces collets ont servi à appliquer la charge excentrée. Ils ont permis d'éviter les ruptures localisées

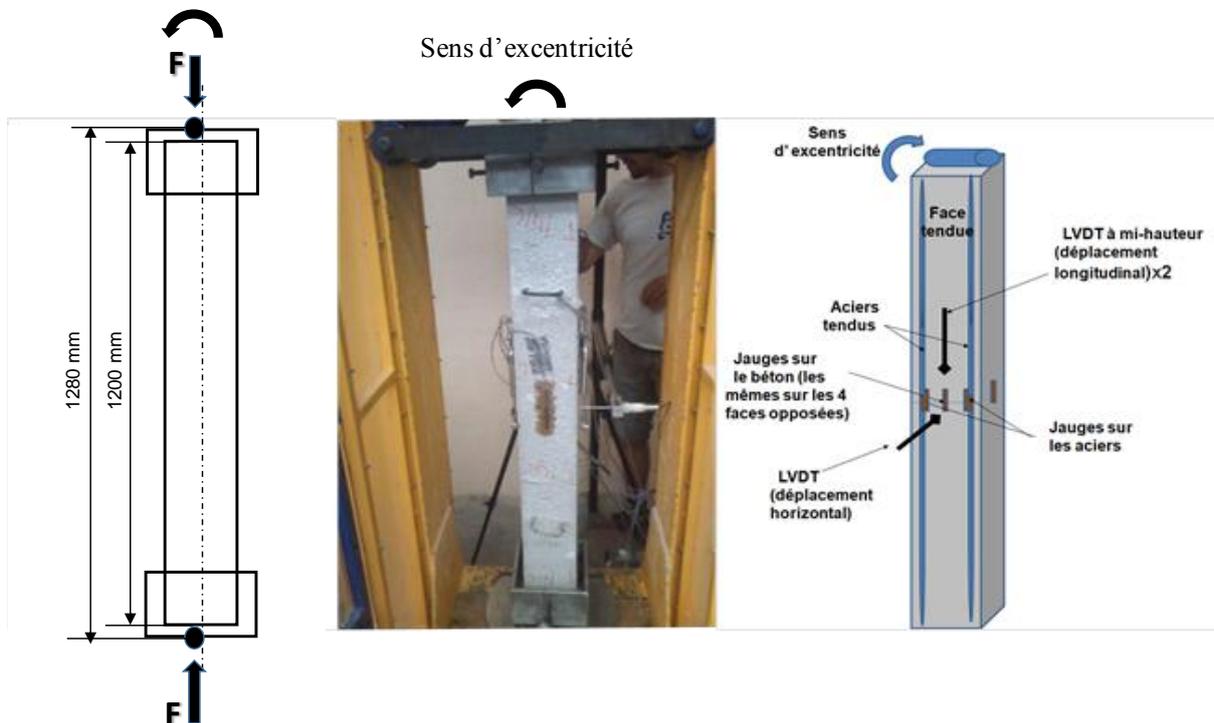
aux extrémités par poinçonnement et d'assurer une bonne diffusion de la charge à l'intérieur du poteau. Une plaque carrée creusée a été fixée en partie haute du vérin de la presse servant à appliquer la charge excentrée à l'aide d'un cylindre qui est placé entre cette plaque et le collet métallique, (figure 14). Une autre plaque circulaire a été fixée à la base en contact avec le collet métallique de la partie basse, le système peut donc être considéré simplement appuyé (articulations aux extrémités). L'excentrement choisi est égal à un dixième du côté de l'éprouvette béton soit 15 mm. Le but d'une compression excentrée est de s'affranchir de l'effet d'incertitudes de centrage en imposant un décalage maîtrisé qui permet d'étudier en plus l'effet d'un moment fléchissant.



**Figure 14:** Le mécanisme d'articulation.

Les déformations des poteaux ont été mesurées à l'aide des jauges collées sur la surface du béton: trois jauges pour la face tendue et trois pour celle comprimée. Les déformations des barres d'acier ont été mesurées par l'intermédiaire de deux jauges de déformation collées sur les barres longitudinales à mi-hauteur. Deux capteurs (LVDT) verticaux ont été installés sur

les deux côtés du poteau tendu et comprimé à mi-hauteur (figure 15). La distance entre l'axe d'un capteur vertical et la surface du béton était de 10 mm permettant de mesurer les déplacements liés à la flexion du poteau. Un capteur de déplacement horizontal a été posé perpendiculairement au poteau, pour mesurer le déplacement transversal au milieu de celui-ci en négligeant le déplacement horizontal au niveau des articulations. La figure 15 indique l'instrumentation des poteaux testés.



**Figure 15:** Les dispositifs de l'essai de compression excentrée, instrumentation des poteaux.

Les spécimens ont été soumis à un chargement de compression quasi statique avec un pas de mesure de déplacement horizontal et de prise de photo de 30 kN jusqu'à 300 kN. Ensuite, le pas de mesure a été réduit à 15 kN jusqu'à 350 kN. Les mesures de déformation par les jauges extensométriques et le déplacement vertical ont été enregistrés automatiquement toutes les 5 secondes. Lorsque la charge appliquée était proche de la charge ultime le taux de chargement a été réduit encore. Durant les essais, le déplacement longitudinal et la déformation transversale des poteaux ont été enregistrés grâce à un système d'acquisition. La durée totale de chargement était entre 8 et 11 minutes.

Un autre instrument de mesure optique a été ajouté ce qui permet de détecter la naissance des fissures qui restent difficiles à suivre en cours de test. L'avantage de la méthode de corrélation d'image vient du matériel nécessaire et sa mise en place, c'est-à-dire un appareil photo de haute résolution, une source de lumière. Un mouchetis de peinture noire et blanche a été appliqué sur la surface du poteau. Les prises de photos sont effectuées à chaque pas de chargement. Ensuite un calcul est réalisé par un logiciel qui consiste à rechercher le degré de ressemblance entre les images.

## II-6 Résultats

Les quatre poteaux ont été testés en compression excentrée en juillet 2015 après avoir été stockés à l'air libre avec arrosage régulier contrairement aux éprouvettes stockées dans l'eau.

Le tableau 6 présente les résultats des essais pour les quatre poteaux 0R -0R, 30R -30R, 0R -100R et 100R -100R. Les premiers résultats montrent une influence non négligeable des granulats recyclés.

<b>Composition</b>	<b>0R -0R</b>	<b>30R – 30R</b>	<b>0R – 100R</b>	<b>100R – 100R</b>
Charge à rupture (kN)	502	514	475	444
Flèche ultime (mm)	2	4.5	3	4.9
Déformations ultimes côté comprimé ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	1770	1650	1965	2850
Déformations ultimes côté moins comprimé ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-580	+80	-260	+525
Position de rupture sur la hauteur par rapport à l'extrémité inférieure (mm)	900	890	910	480
Durée de chargement (Minutes)	10	11	8	10

**Tableau 6:** Les résultats des essais

Ce résultat est en accord avec la conclusion de [Liu et al, 2010] [20] et [Zhou et al, 2010] [18] sur le comportement des poteaux fabriqués avec un béton à base de granulats recyclés sous chargement de compression excentriques élevés avec différents taux de substitutions de granulats. [Zhou et al, 2010] ont conclu que, pour la même classe de résistance en compression, la charge ultime des poteaux de béton recyclé diminue progressivement pour un pourcentage de granulats recyclés entre 0 à 80%.

Les courbes obtenues ainsi que l'interprétation des résultats seront présentés dans la partie IV.

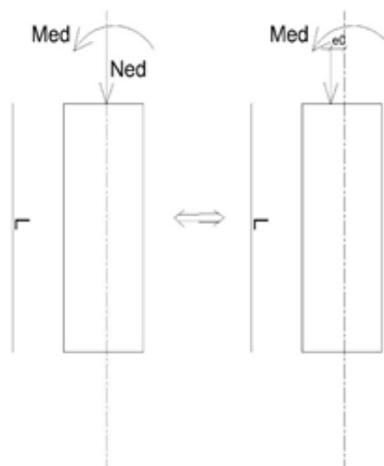
## III) CALCUL DES POTEAUX SELON L'EUROCODE 2

### INTRODUCTION

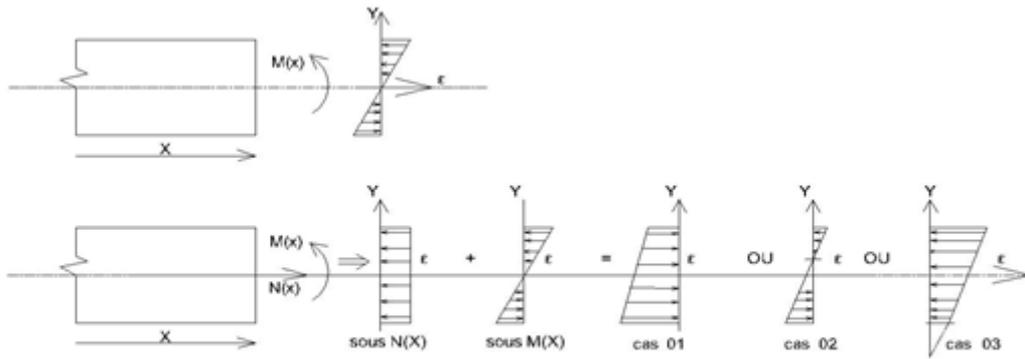
L'objectif de ce chapitre est de présenter la méthode d'évaluation de la stabilité adoptée par l'Eurocode 2 et déterminer la capacité portante de chaque poteau avec la prise en compte des effets du second ordre. Ces derniers sont rencontrés sur des structures élancées et même pour les poteaux de faible élancement à cause de la présence d'un effort de compression excentrée pour lesquelles le déplacement transversal peut-être important même sous de faibles charges.

#### III.1. Les méthodes d'analyse proposées par l'EC2

Dans notre cas le phénomène est équivalent à une sollicitation composée de compression et de flexion comme schématisé figure 16 et 17. Des méthodes d'analyse peuvent être utilisées pour traiter le problème.



**Figure 16 :** Poteau sollicité en flexion composée



**Figure 17 :** Le diagramme de déformation en flexion composée sous  $N(x) + M(x)$

L'Euro code 2(chapitre 5.8) propose trois méthodes de complexité différente (méthode générale, méthode de la rigidité nominale et méthode de la courbure nominale) pour traiter ce problème.

**La méthode générale** (méthode de Faessel, méthode de l'équilibre)

La méthode générale est basée sur une analyse non linéaire qui prend en considération :

- La non-linéarité géométrique (effet de second ordre)
- La non-linéarité des lois de comportement des matériaux (loi de 'Sargin'  $\sigma-\epsilon$ )
- Le fluage du béton au travers du coefficient  $\varphi_{ef}$  (non pris en compte dans notre étude)

**Domaine d'application**

- Poteau chargé de façon excentrée et d'élançement géométrique élevé :
- Poteau de section constante, soumis à un effort normal constant.
- Poteau articulé à ses deux extrémités ou en console

**La méthode de la courbure nominale**

La méthode consiste à tenir compte des effets du second ordre en se donnant la valeur de l'excentricité du second ordre de façon forfaitaire et nécessite ensuite un calcul en flexion composée. La méthode s'applique aux éléments isolés pour un effort normal constant sur toute leur hauteur et pour lesquels la longueur efficace est connue.

**Une méthode de la rigidité nominale**

Cette méthode est basée sur la détermination de la rigidité nominale du poteau avec l'amplification du moment du premier ordre pour déterminer les effets du second ordre avec prise en compte de la non linéarité du matériau, la fissuration et le fluage. Cette méthode s'applique aux structures et aux poteaux isolés à condition que leur rigidité soit estimée d'une façon appropriée.

**Remarque**

La méthode de la rigidité nominale conduit un moment de calcul majoré et nécessite des calculs lourds essentiellement en flexion composée pour lesquelles les forces portantes inférieures à celles de la méthode générale. Elle est donc peu économique.

### III.2. Critère de prise en compte de second ordre

« Les effets du second ordre peuvent être négligés s'ils représentent moins de 10% des effets du premier ordre » **5.8.2 (6)**

Pour pouvoir utiliser ce critère, il faut pouvoir quantifier les effets du 1er ordre et du 2nd ordre.

Selon EC2 **5.8.3.1**, les effets du second ordre peuvent être négligés si l'élanement  $\lambda$  est inférieur à  $\lambda_{lim}$

$$\lambda = \frac{l_0}{i} < \lambda_{lim} = \frac{20.A.B.C}{\sqrt{n}}$$

Avec :

$A = \frac{1}{1+0.2\varphi_{ef}}$  Si le coefficient de fluage effectif  $\varphi_{ef}$  n'est pas connu, on prendra  $A = 0,7$

$B = \sqrt{1 + 2\omega}$  Si le ratio mécanique d'armatures à  $\omega = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}}$  n'est pas connu, on prendra :  $B = 1,1$

$C = 1.7 - r_m$  Si le rapport des moments d'extrémités du 1er ordre  $r_m = M_{01}/M_{02}$  n'est pas connu, on prendra :  $C = 0,7$

n: effort normal relatif  $n = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}}$

i : rayon de giration  $i = \sqrt{\frac{I}{S}}$

$l_0$  : longueur du flambement

Dans notre cas  $\lambda = 8.5 < \lambda_{lim} = 11.8$  pour  $N_{ed} = 500 \text{ kN}$  → Effets du second ordre peuvent être négligés

#### Excentricité du premier ordre

L'excentricité du premier ordre  $e_1$  est composée de :

- L'excentricité  $e_0$  liée au chargement d'effort normal excentrée  $N_{ed}$
- L'excentricité liée aux imperfections géométriques définie dans l'EC2 et son Annexe Nationale :  $e_i = \frac{l_0}{400}$  pour les éléments isolés de structures contreventées

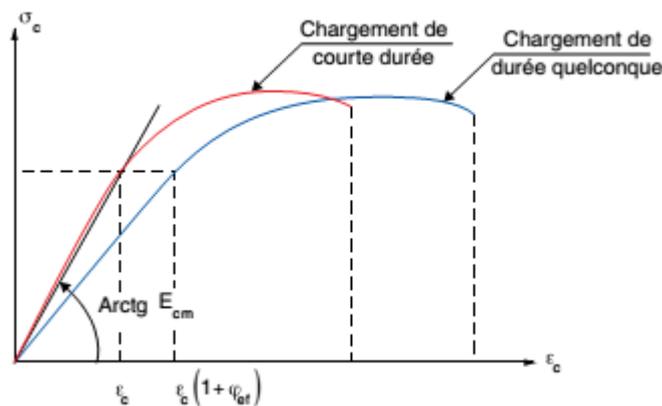
Dans le cas des poteaux de faible élancement, cette valeur est faible pour cela l'ANF a introduit la condition la plus défavorable :  $e_i = \max \left[ \frac{L_0}{400}; 0.02m \right]$

Excentricité du premier ordre :  $e_1 = e_0 + e_i$

### Remarque :

La déformation du second ordre correspond à des charges de courte et de longue durée. Dans notre cas le fluage est négligé à cause du chargement de courte durée. Ce qui nous permet de comparer les résultats théorique avec les résultats expérimentaux.

Dans le cas des structures réelles le fluage dû aux charges de longue durée doit être on compte avec les charges totales comme le suggère la figure 18. Le coefficient de fluage effectif  $\varphi_{ef}$ , intervenant par l'expression  $(1 + \varphi_{ef})$  dans le calcul des déformations.

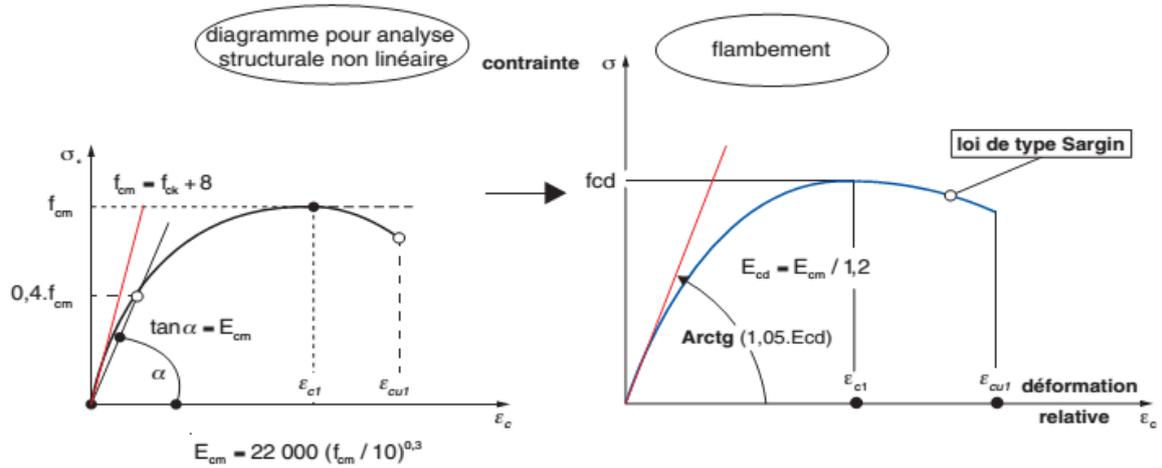


**Figure 18:** le diagramme contrainte déformation en fonction du chargement

### Méthode générale

La méthode générale est basée sur les hypothèses suivantes :

- les sections planes restent planes
- le moment du premier ordre est constant sur toute la hauteur
- le béton tendu est négligé
- les effets du retrait du béton sont négligés
- on adopte pour le béton le diagramme contrainte-déformation (Sargin) figure 19



**Figure 19:** Diagramme contrainte-déformation du béton (diagramme de Sargin simplifié)

Le diagramme se caractérise par l'équation suivante :

$$\frac{\sigma_c}{f_{cd}} = \frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta}$$

Avec :  $\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}$  ;  $k = 1.05 \frac{E_{cm} \cdot \varepsilon_{c1}}{\gamma_{CE} f_{cd}}$  ;  $E_{cd} = \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}}$  ;  $\gamma_{CE} = 1.2$

$\varepsilon_c$  Déformation relative en compression du béton,  $\varepsilon_{c1}$  (‰) et  $\varepsilon_{cu1}$  (‰) indiqué tableau 7

$\varepsilon_{c1}$  (‰) =  $(\min(0.7f_{ck} + 8))^{0.31}$  ; 2.8 Déformation relative au pic de contrainte

$$\varepsilon_{cu1}(\text{‰}) = \begin{cases} 3,5 \text{ pour } f_{ck} < 50 \text{ MPa} \\ 2,8 + 27 \left[ \frac{98 - (f_{ck} + 8)}{100} \right]^4 \text{ (Pour } f_{ck} \geq 50 \text{ MPa)} \end{cases}$$

Classe	C12/15	C20/25	C25/30	C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95
$\varepsilon_{c1}$ (‰)	1,8	2	2,1	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8
$\varepsilon_{cu}$ (‰)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,2	3	2,8	2,8

**Tableau 7 :** Les Valeurs des raccourcissements ultimes.

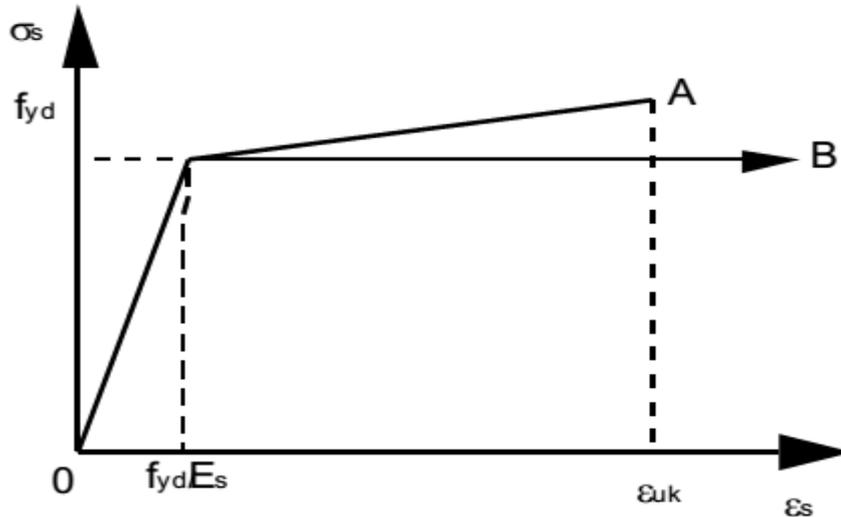
Le module  $E_{cm}$  normatif répertorié tableau 8 est défini par :

$$E_{cm} = 22\,000 (f_{cm}/10)^{0,3}$$

Classe	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C50/60	C60/70
$E_{cm}$ (M Pa)	29 000	30 000	31 000	33 000	34 000	35 000	37 000	39 000

**Tableau 8** : Les valeurs du module d'Young instantané.

Pour l'acier, au choix : diagramme avec palier ou diagramme avec droite inclinée, figure 20.



**Figure 20** : Diagramme contrainte déformation (acier)

Normalement, les conditions d'équilibre et de compatibilité des déformations relatives sont satisfaites dans plusieurs sections. Pour simplifier, on peut ne considérer que la section critique en supposant une variation appropriée de la courbure, semblable à celle du 1er ordre par exemple pour le cas d'un poteau bi-articulé on adopte une courbe sinusoïde.

### Remarque

Dans le cas de la présence du fluage on pourra prendre une déformation du béton après fluage multipliée par le facteur  $(1 + \varphi_{ef})$

On peut prendre en compte l'effet favorable du béton tendu (compliqué car inertie de section non fissurée entre deux fissures), mais par simplification, on peut aussi le négliger.

### Excentricité du second ordre

Excentricité du second ordre  $e_2$  mise en valeur figure 21 est définie par l'équation suivante :

$$e_2 = \frac{1}{r} \cdot \left(\frac{L_0}{\pi}\right)^2 = \frac{\epsilon_h - \epsilon_b}{h} \cdot \left(\frac{l_0}{\pi}\right)^2$$

Avec :

$$\varepsilon_h = \varepsilon_n + \varepsilon_m \cdot \frac{1}{r} = \frac{\varepsilon_h - \varepsilon_b}{h} ; \varepsilon_b = \varepsilon_n - \frac{\varepsilon_{cu1}}{\varepsilon_{cu1} - \varepsilon_{c1}} \cdot \varepsilon_m$$

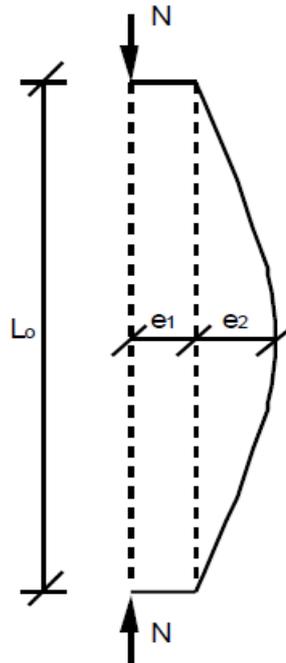
$r$ : Rayon de courbure de la section critique

$\varepsilon_h$ : Déformation de la fibre la plus comprimée

$\varepsilon_b$ : Déformation en fibre tendue ou la moins comprimée ; ab prend en compte la capacité de ductilité : différence de déformation entre le sommet de la courbe de contrainte et la déformation à rupture

$\varepsilon_n$ : Déformation au point C

$\varepsilon_m$ : Déformation de rotation



**Figure 21** : Déformation du poteau en sinusoïde complète sur la longueur  $L_0$

### L'effort résistant maximal

L'effort résistant maximal est déterminé par équations suivantes:

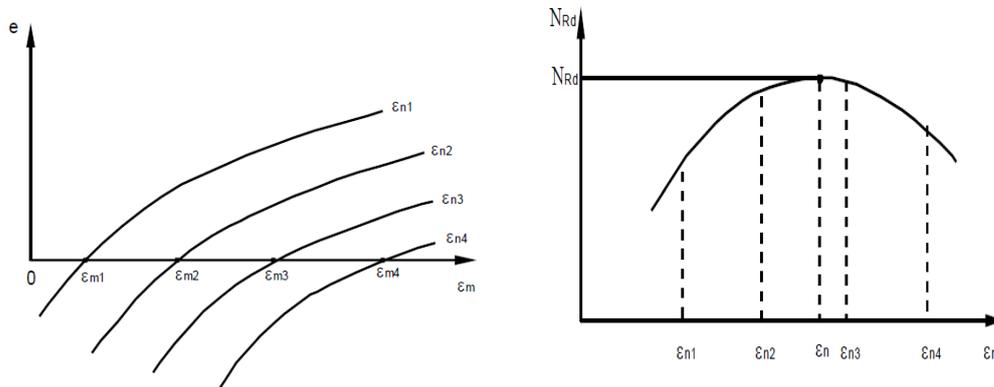
**Excentricité agissante = Excentricité résistante**

$$e_i + e_1 + e_2 - \frac{M_{Rd}}{N_{Rd}} = 0$$

Pour déterminer la valeur maximale que peut supporter le poteau, Il suffit de rechercher parmi toutes les déformations de sections possibles qui annulent l'équation, en utilisant les paramètres  $\varepsilon_n, \varepsilon_m$  avec des abaques normés (figure 22) ou des programmes informatiques dédiés.

La méthode générale préconisée par l'EUROCODE dans le cas de compression excentrée permet de calculer une section minimale résistante à partir d'un effort extérieure et non de retrouver un effort à partir de dimension et d'un protocole connu comme dans notre cas. Nous

utiliserons une méthode de Faessel proposée par l'expert B. Fouré et nous utiliserons un programme de calcul Excel développé par Mr Thonier



**Figure 22** : le principe de détermination de la valeur maximale.

Une autre solution du problème consiste à représenter le problème graphiquement tel que l'excentricité  $e = e_1 + \frac{1}{r} \cdot \left(\frac{L_0}{\pi}\right)^2$  représenté par une droite, le rapport  $\frac{M_{Rd}}{N_{Rd}}$  représenté par une courbe. L'intersection entre eux présente l'équilibre.

### III .3 Calcul de la charge ultime à l'ELU

Plusieurs calculs seront proposés dans cette partie allant du calcul « exact » au calcul sécuritaire de conception proposé par l'EUROCODE 2 ;

#### Calcul exact :

Ce calcul consiste à utiliser toutes les données brutes du béton et du test réalisé en n'incluant aucune sécurité et en considérant le protocole d'essai comme parfait (figure 23a). Les caractéristiques choisies pour ce calcul sont les suivantes.

#### Caractéristiques du béton

Affaissement moyen 18,7 cm

Teneur en air moyenne 2,4%

Poids volumique moyen 2250 kg/m<sup>3</sup>

Age moyen 28 jours

Résistance caractéristiques  $f_{cm} = 28$  MPa.

Module *sécant* à  $0,3 f_c$  :  $E_{cm} = 24000$  MPa (*100R-100R* : 16000 MPa, *0R-0R* 24000 MPa)

Fendage  $f_{ctm, sp} = 2,7$  MPa (*100R-100R* le plus faible)

#### Estimation de la charge ultime par le calcul.

Rappel des caractéristiques des poteaux.

Section béton  $0,15 \times 0,15 \text{ m}^2$

Armatures longitudinales 4 HA10 en deux lits symétriques ;  $A_s = 4 \times 0,785 = 3,14 \text{ cm}^2$

Enrobage 15 mm

Acier classe FeE500,  $f_y$  réel mesuré =  $560 \text{ MPa}$ ,

Les aciers sont réparties en deux lits espacés de 26 mm du bord pour le lit 1 et 124 mm pour le lit 2.

Elancement géométrique dans le cas d'un poteau entre 2 Articulations :

Cylindres  $R = 25 \text{ mm}$  ;

Distance de leur axe à l'extrémité du poteau en béton 38 mm environ.

Longueur de flambement  $\ell = \text{hauteur bétonnée } 1,20 \text{ m} + 2 \times \text{distance à l'axe d'articulation} \approx 1,28 \text{ m}$

Elancement  $\approx 1,28 / 0,15 \approx 8,5$ .

Excentricité  $e_0 = 0,1 h = 15 \text{ mm}$ .

L'excentricité additionnelle  $e_1$  n'est pas prise en compte

Données

$f_{ck}$	28	MPa	résistance béton
$f_{yk}$	560	MPa	limite élastique acier
$\gamma_c$	1		coeff. béton
$\gamma_s$	1		coeff. acier
$L_0$	1,28	m	longueur efficace de flambement $L_{eff}$
$N_g$	0,0006	MN	charge axiale permanente
$N_q$	0,5	MN	charge axiale variable
$\gamma_g$	1		coeff. charges permanentes
$\gamma_q$	1		coeff. charges variables
$b$	0,15	m	largeur poteau
$h$	0,15	m	hauteur section du poteau (dans le sens du flambement)
$\Psi_2$	0,3		coefficient de combinaison quasi-permanente
RH	50		taux d'humidité
$t_0$	28	jours	âge du béton lors du chargement
	32,5N		classe de ciment
$e_1$	0,015	m	excentricité du 1 <sup>er</sup> ordre éventuelle
$e_2$	0	m	excentricité due aux imperfections géométriques (EC2 = 0,02 m et $L_0/400$ )
âge calcul	0		rupture à court terme=0, à long terme=1

Les données seulement  
 dans les cases vertes  
 Touche F9 pour calculer

Formule simplifiée RP	
$f_{ck}$	= 28 OK
$\lambda$	= 29,56 OK
$\delta$	= 0,173 KO
$\alpha$	= 0,701
$k_s$	= FAUX
$k_{st}$	= 0,813
$N_{Rd}$	= 0 MN

0% de  $N_{Rd}$  général  
 0% de  $N_{Ed}$

Armatures

nbre bar./lit	2	2				
diamètre (mm)	10	10				
dist/fib.sup. (m)	0,026	0,124				total
section (cm <sup>2</sup> )	1,57	1,57	0,00	0,00	0,00	3,14

Section minimale d'armatures longitudinales	
$A_s$	= 0,89 cm <sup>2</sup>
	OK

Béton

rayon de giration	0,0433	m
élancement $\lambda$	29,56	
$f_{cd}$	28,00	MPa
$\epsilon_{c1}$	2,1	‰
$\epsilon_{cu1}$	3,5	‰
$h_0$	75	mm
$f_{cm}$	36	MPa
$\varphi_0$	3,2852	Eq. B2
$t_{0,001}$	24,154	jours
$\varphi(\infty, t_0)$	3,007	Eq. B3

Résultats	
$N_{Ed}$	= 0,5006 MN
$N_{Rd}$	= 0,5574 MN
	OK
$M_{Rd}$	= 0,01029 MNm
$e_1$	= 0 mm
$e_2$	= 15 mm
$e_2$	= 3,47419 mm
$e_1$	= 18,4742 mm

effort normal ELU (89,8 %)

+11 %

moment résistant

exc. addit. (EC2 :  $L_0/400$  et 0 cm)

excentricité du 1<sup>er</sup> ordre

excentricité du 2<sup>e</sup> ordre

excentricité totale =  $e_1 + e_2$

Figure 23a : Programme EXCEL permettant de calculer l'effort de rupture corrigé à partir des caractéristiques du béton et de l'essai réalisé

Critère de prise en compte des phénomènes du second ordre :

D'après la feuille de calcul Excel « poteau selon l'EC2 (art. 5.8.6) » de N. Tonier, les effets du second ordre donnent une excentricité  $e_2$  de l'ordre de 3 millimètres.

Il peut être intéressant de comparer ce résultat à celui qui serait obtenu à très faible élancement. Le calcul a été réalisé avec  $l_0 = h$  donc un élancement de 1. Le  $N_{Rd}$  calculé ainsi est de 590 kN. Le décalage induit par les phénomènes du second ordre est donc de 6%. Pour exemple, un calcul avec une longueur  $l_0$  de 2 m induit un effort ultime de 500 kN soit un écart de 18 % par rapport aux 590 kN (cas sans flambement). En augmentant de 56% la longueur du poteau on augmente de 200% l'écart à l'essai « sans élancement ». Cela souligne le fait que dans notre cas les effets du second ordre pourraient être négligés. De plus, l'écart de 6% est plus faible que l'écart « théorie-expérimentation » (10%) ; théorie 557 kN, pratique 500 kN.

D'après ces résultats, on remarque que les poteaux testés donnent une résistance inférieure d'environ 10 % à la théorie. En effet, les essais expérimentaux peuvent faire intervenir des incertitudes de centrages ou de planités (imperfections géométriques négligées) et nous suggérons également que la résistance en compression de 28 MPa est surestimée en lien avec les différentes conditions de stockage (eau pour les éprouvettes, air pour les poteaux). Des essais ont été effectués dans le cadre d'une étude parallèle avec les mêmes conditions et les résistances trouvées avec stockage à l'air sont comprises entre 24 et 25 MPa. Il paraît donc pertinent de faire un calcul avec la résistance corrigée pour avant un bilan plus complet de ces essais.

### Calcul corrigé :

Les caractéristiques du béton sont les mêmes, seule la résistance en compression est modifiée pour une valeur de 25 MPa (valeur plus conforme aux résultats des partenaires du PN).

**102 - POTEAU selon l'EC2 (art. 5.8.6)** (méthode Faessel)

avec l'Annexe Nationale française

Section rectangulaire

**Données**

$f_{ck}$	25	MPa	résistance béton
$f_{yk}$	560	MPa	limite élastique acier
$\gamma_c$	1		coeff. béton
$\gamma_s$	1		coeff. acier
$L_0$	1,28	m	longueur efficace de flambement $L_{eff}$
$N_G$	0,0006	MN	charge axiale permanente
$N_Q$	0,5	MN	charge axiale variable
$\gamma_G$	1		coeff. charges permanentes
$\gamma_Q$	1		coeff. charges variables
$b$	0,15	m	largeur poteau
$h$	0,15	m	hauteur section du poteau (dans le sens du flambement)
$\Psi_2$	0,3		coefficient de combinaison quasi-permanente
RH	50		taux d'humidité
$t_0$	28	jours	âge du béton lors du chargement
	32,5N		classe de ciment
$e_1$	0,015	m	excentricité du 1 <sup>er</sup> ordre éventuelle
$e_2$	0	m	excentricité due aux imperfections géométriques (EC2 = 0,02 m et $L_0/400$ )
âge calcul	0		rupture à court terme=0, à long terme=1

**Armatures**

nbre bar./lit	2	2				
diamètre (mm)	10	10				
dist/fib.sup. (m)	0,026	0,124				total
section (cm <sup>2</sup> )	1,57	1,57	0,00	0,00	0,00	3,14

**Béton**

rayon de giration	0,0433	m
élancement $\lambda$	29,56	
$f_{cd}$	25,00	MPa
$\varepsilon_{c1}$	2,1	‰
$\varepsilon_{cu1}$	3,5	‰
$h_0$	75	mm
$f_{cm}$	33	MPa
$\varphi_0$	3,4935	Eq. B2
$t_{0,cor}$	24,154	jours
$\varphi(\infty, t_0)$	3,1921	Eq. B3

H.Thonier  
22 septembre 2016  
L'auteur n'est pas responsable de l'usage fait de ce programme

Les données seulement dans les cases vertes  
Touche F9 pour calculer

**Formule simplifiée RP**

$f_{ck} = 25$  OK

$\lambda = 29,56$  OK

$\delta = 0,173$  KO

$\alpha = 0,701$

$k_s =$  FAUX

$k_{\sigma} = 0,813$

$N_{Rd} = 0$  MN

0% de  $N_{Rd}$  général

0% de  $N_{Ed}$

Section minimale d'armatures longitudinales

$A_s = 0,89$  cm<sup>2</sup>

OK

Page 1

Résultats		
$N_{Ed}$	0,5006	MN
$N_{Rd}$	0,5102	MN
	OK	
$M_{Rd}$	0,00943	MNm
$e_1$	0	mm
$e_2$	15	mm
$e_2$	3,49803	mm
$e_2$	18,498	mm

effort normal ELU (98,1 %)

+2 %

moment résistant

exc. addit. (EC2 :  $L_0/400$  et 0 cm)

excentricité du 1<sup>er</sup> ordre

excentricité du 2<sup>e</sup> ordre

excentricité totale =  $e_1 + e_1 + e_2$

**Figure 23b** : Programme EXCEL permettant de calculer l'effort de rupture corrigé à partir des caractéristiques du béton et de l'essai réalisé

Avec cette hypothèse le calcul théorique convient très bien aux résultats expérimentaux obtenus sur le poteau naturel (figure 23b). On peut donc valider ce calcul de la charge ultime pour les taux de substitution faible (pas ou peu de variation de la charge ultime).

### Calcul sécuritaire :

Concernant le poteau 100R-100R, sa charge à rupture est inférieure à celle du poteau témoin 0R-0R (440 kN). Il est donc primordial de vérifier que le calcul de conception sécuritaire de l'Eurocode permet la substitution de granulés naturels par des granulés recyclés sans addition de coefficient de sécurité supplémentaire. Pour ce calcul nous prendrons les caractéristiques suivantes :

#### Caractéristiques du béton

Résistance moyenne  $f_{cm} = 28$  MPa

Résistance caractéristique :  $f_{ck} = f_{cm} - 8$  MPa (EC2, 3.1) =  $28 - 8 = 20$  MPa

Cette résistance caractéristique sera utilisée par la suite pour les calculs sécuritaires.

#### Estimation de la charge ultime par le calcul.

Acier classe FeE500,  $f_y$  réel mesuré = 560 MPa,  $f_{yd} = 560/1,15 = 487$  MPa

Excentricité  $e_0 = 0,1 h = 15$  mm.

L'excentricité additionnelle  $E_i$  du premier ordre vaut

$$e_i = \max \left[ \frac{L_0}{400}; 0.02m \right]$$

Donc  $e_i = 20$  mm

L'excentricité totale vaut donc  $e = 15 + 20 = 35$  mm

Données

$f_{ck}$	20	MPa	résistance béton
$f_{yk}$	560	MPa	limite élastique acier
$\gamma_c$	1,5		coeff. béton
$\gamma_s$	1,15		coeff. acier
$L_0$	1,28	m	longueur efficace de flambement $L_{ef}$
$N_g$	0,006	MN	charge axiale permanente
$N_q$	0,5	MN	charge axiale variable
$\gamma_g$	1		coeff. charges permanentes
$\gamma_q$	1		coeff. charges variables
b	0,15	m	largeur poteau
h	0,15	m	hauteur section du poteau (dans le sens du flambement)
$\Psi_2$	0,3		coefficient de combinaison quasi-permanente
RH	50		taux d'humidité
$t_0$	28	jours	âge du béton lors du chargement
	32,5N		classe de ciment
$e_1$	0,015	m	excentricité du 1 <sup>er</sup> ordre éventuelle

Les données seulement  
dans les cases vertes  
Touche F9 pour calculer

Formule simplifiée RP	
$f_{ck}$	20 OK
$\lambda$	29,56 OK
$\delta$	0,173 KO
$\alpha$	0,701
$k_s$	FAUX
$k_n$	0,813
$N_{Rd}$	0 MN

0% de  $N_{Rd}$  général  
0% de  $N_{Ed}$

Aciers

nbre bar./lit	2	2				
diamètre (mm)	10	10				
dist.fib.sup. (m)	0,026	0,124				total
section (cm <sup>2</sup> )	1,57	1,57	0,00	0,00	0,00	3,14

Section minimale d'armatures longitudinales	
$A_s$	1,04 cm <sup>2</sup>
	OK

Béton

rayon de giration	0,0433	m
élancement $\lambda$	29,56	
$f_{cd}$	13,33	MPa
$\epsilon_{c1}$	4,1368	‰
$\epsilon_{cu1}$	7,2394	‰
$h_0$	75	mm
$f_{cm}$	28	MPa
$\phi_0$	3,7926	Eq. B2
$t_{0,cor}$	24,154	jours
$\phi(\infty, t_0)$	3,4654	Eq. B3
k	3,938	§ 3.1.5(1)
$f_{ctm}$	2,20	MPa
$E_{cm}$	30	GPa
$E_{ct}$	14,50	GPa
$1+\phi_0(G+\Psi_2.Q)/(\gamma_g.G+\gamma_q.Q)$	2,0684	$1+\phi_{ef}$

Section partiellement tendue

Armatures

total	4	barres
aire	3,14	cm <sup>2</sup>
%	1,40%	
$f_{yd}$	487,0	MPa
d	0,124	m
$E_s$	200	GPa
$n_{eq}$	13,79	coefficient d'équivalence

Page 1

Résultats	
$N_{Ed}$	0,506 MN
$N_{Rd}$	0,2321 MN
	KO
$M_{Rd}$	0,00982 MNm
$e_1$	20 mm
$e_1$	15 mm
$e_2$	7,31237 mm
$e_1$	42,3124 mm
$N_{Rd} e_1$	0,00982 MNm
x	0,11007 m
$\epsilon_{s,haut}$	4,84832 ‰
$\epsilon_{s,bas}$	-1,7591 ‰
$1/r$	44,049 10 <sup>-3</sup> m <sup>-1</sup>
$N_{Rd}/A_c$	10,32 MPa
$\sigma_{c,max}$	13,32 MPa
$\sigma_{c,h}$	13,21 MPa

effort normal ELU (218 %) dépassement  
-54 %  
moment résistant  
exc. addit. ( $L_0/400$  et 2 cm)  
excentricité du 1<sup>er</sup> ordre  
excentricité du 2<sup>e</sup> ordre  
excentricité totale =  $e_1 + e_1 + e_2$   
à comparer à  $M_{Rd} = 0,0098$  rapport = 1,0002  
position de la fibre neutre  
racourcissement en haut  
allongement en bas  
courbure  
contrainte moyenne du béton compte tenu des aciers  
contrainte maximale du béton  
contrainte du béton en fibre supérieure

Nombre de pas de calculs (pair et <= 130)	100	
imperfection géométrique ANF si $> L_0/400$ )	20	mm
Prise en compte du béton tendu (oui=0,7, sinon =0)		
tension stiffening : oui=1, sinon =0	0	

Figure 23c : Programme EXCEL permettant de calculer  $N_{rd}$  sécuritaire à partir des caractéristiques du béton et de l'essai réalisé

### **Critère de prise en compte des phénomènes du second ordre :**

L'excentricité additionnelle de calcul (2 cm) est tellement importante (supérieure à l'excentricité initiale), qu'elle englobe les incertitudes de l'excentricité d'essai ainsi que l'excentricité du second ordre. Donc les effets du second ordre sont pris en compte dans le calcul mais ne sont pas déterminants.

La baisse de résistance en compression du béton due aux sécurités est favorable à l'augmentation des effets du second ordre. Cet effet reste faible par rapport à la marge de sécurité induite par ce calcul. La marge est de sécurité étant proche de 100%, on peut ne pas prendre en compte ces effets pour les bétons recyclés de même que pour les bétons naturels.

### **Charge Ultime**

Le calcul à partir de l'outil informatique développé par H. Tonier donne une charge ultime théorique Nrd de 232 KN. La figure 23c montre les résultats théoriques obtenus par l'intermédiaire de cette feuille de calcul après rentrée des données.

Voici les résultats expérimentaux obtenus sur les poteaux testés.

Composition	0R -0R	0R – 100R	30R – 30R	100R – 100R
Force à rupture (kN)	502	475	514	444

On a une valeur expérimentale de 500 kN pour le 0R-0R et de 440 kN pour le 100R-100R

Nos valeurs expérimentales sont donc proches des prédictions du calcul corrigé et supérieures aux prévisions sécuritaires. Nous pouvons donc suggérer que le calcul sécuritaire peut s'appliquer aux structures en béton armé recyclé avec toutefois une marge de sécurité plus faible pour les forts taux de recyclage.

## **IV) INTERPRETATION DES RESULTATS**

Les résultats individuels de chaque jauge de déformations du béton sont présentés pour chaque formulation en IV.3. Nous rappelons que les poteaux ont été stockés à l'air et qu'il persiste une incertitude sur la résistance des bétons. De même, malgré tout le soin apporté au respect de l'excentricité de 15 mm, il est possible que cette excentricité varie légèrement d'un poteau à l'autre. Enfin, nous soulignons que l'EUROCODE 2 prévoit une excentricité additionnelle d'au moins 2 cm liée aux incertitudes géométriques et de ce fait le sérieux apporté au respect de l'excentricité permet de rester largement dans ce critère de sécurité.

### **IV.1 Observation des poteaux**

Nous pouvons observer sur les photos ci-dessous figure 24 que les poteaux ont bien été sollicités en compression excentrée. Les poteaux restent principalement dans une situation de compression avec une dissymétrie entre les faces parallèles à l'axe de rotation (face à gauche

et à droite sur les images). Les relevées de déformations confirment cette tendance sauf pour le 100R-100R pour qui la face de droite est tendue dès le début de l'essai. Ce phénomène est dû au plus faible module d'Young mesurée sur cette formulation et probablement à une excentricité initiale plus forte mais qu'il nous paraît difficile de confirmer.

De ce fait, les premières observations semblent montrer qu'un taux de substitution faible (30R, 30R) entraîne peu de variation dans les propriétés mécaniques des poteaux. On remarque également qu'un fort taux de substitution en gravier accompagné de sable naturel (0R, 100R) ne fait pas varier fondamentalement le comportement d'un poteau. Par contre, un remplacement total des granulats naturels par des recyclés (100R, 100R) met en avant une variation des propriétés mécaniques et un comportement mécanique assez différents.

Ces observations rejoignent celles obtenues sur l'étude concernant les poutres en flexion menée conjointement avec l'ICube de Strasbourg.

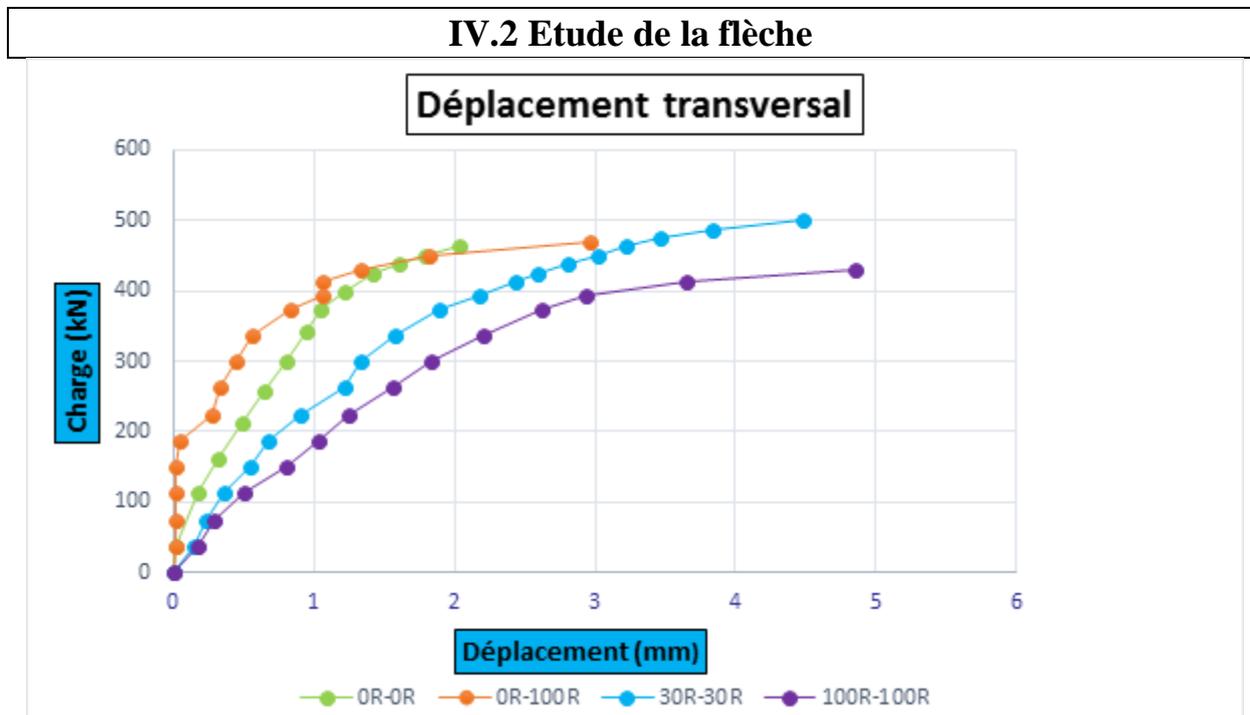


**Figure 24:**Essai de compression excentrée

Au début de chargement, aucune fissure n'a été observée sur la surface extérieure des poteaux. Les premières fissures verticales sont apparues dans les poteaux OR-OR, 30R-30R, OR-100R et 100R-100R à partir de 65% environ de la charge ultime, au niveau des coins gauches (sens de l'excentricité) de la partie haute des poteaux.

Au cours du chargement, les fissures deviennent plus larges, la flèche augmente et est plus élevée dans le cas du poteau fabriqué avec 100 % de sable recyclés et graviers recyclés 100R-100R. A l'approche de la charge ultime, une apparition des fissures transversales a été observée dans la zone centrale de la face la moins comprimée du poteau 100R-100R et au

tiers supérieur dans le cas des autres poteaux. Ces fissures se sont propagées vers le côté le plus comprimé. L'augmentation rapide des déformations plastiques du béton comprimé (face comprimé) a provoqué une perte soudaine de l'enrobage. A ce stade, les fissures transversales se sont connectées avec les autres fissures longitudinales. La rupture intervient pour tous les poteaux par flambement suite à la rupture du béton dans la zone la plus comprimée. Le flambement des armatures longitudinales se situe au tiers supérieur des poteaux 0R-0R, 30R-30R et 0R-100R. Dans le cas du poteau 100R-100R, le flambement s'est produit vers le milieu du poteau.



**Figure 25** : Déplacement transversal (au milieu) des poteaux 0R-0R, 0R-100R, 30R-30R, 100R-100R.

La figure 25 présente le déplacement transversal pour les poteaux testés dans cette étude en fonction de la charge appliquée.

Deux phases distinguent le comportement des poteaux : entre le moment où la charge est appliquée (partie linéaire) jusqu'à l'augmentation rapide des déformations plastiques du béton comprimé (face comprimée) où une augmentation plus rapide de déplacement transversal a été observée.

La figure 25 montre que, globalement, pour la même excentricité les poteaux préparés à partir des granulés recyclés 30R-30R, 0R-100R et 100R-100R induisent plus de déplacement par rapport au poteau témoin (0R-0R). Les déplacements à la charge de 400 kN sont 1.1, 2.25, 1.2, et 3.3 mm pour les poteaux 0R-0R, 30R-30R, 0R-100R et 100R-100R respectivement. Ces valeurs correspondent à une différence du déplacement de +88, +8 et +175% respectivement par rapport au poteau sans granulats recyclé 0R-0R. Notons qu'il y a eu un dysfonctionnement du capteur de déplacement sur le poteau 0R-100R avant la charge de 180 kN. Néanmoins, les mesures enregistrées à partir de cette charge montrent que le poteau 0R-100R se déplace dans le sens transversal plus rapidement que le poteau témoin 0R-0R.

Les déplacements ultimes à la rupture sont 2, 4.48, 2.96 et 4.85 mm pour les poteaux 0R-0R, 30R-30R, 0R-100R et 100R-100R respectivement. Ces valeurs correspondent à une augmentation du déplacement de +124, +48 et +143% respectivement par rapport au poteau sans granulats recyclé.

### IV.3 Etude des déformations et déplacements longitudinaux

Les mesures de déformations de chaque éprouvettes bétons sont présentées figure 26 à 29.

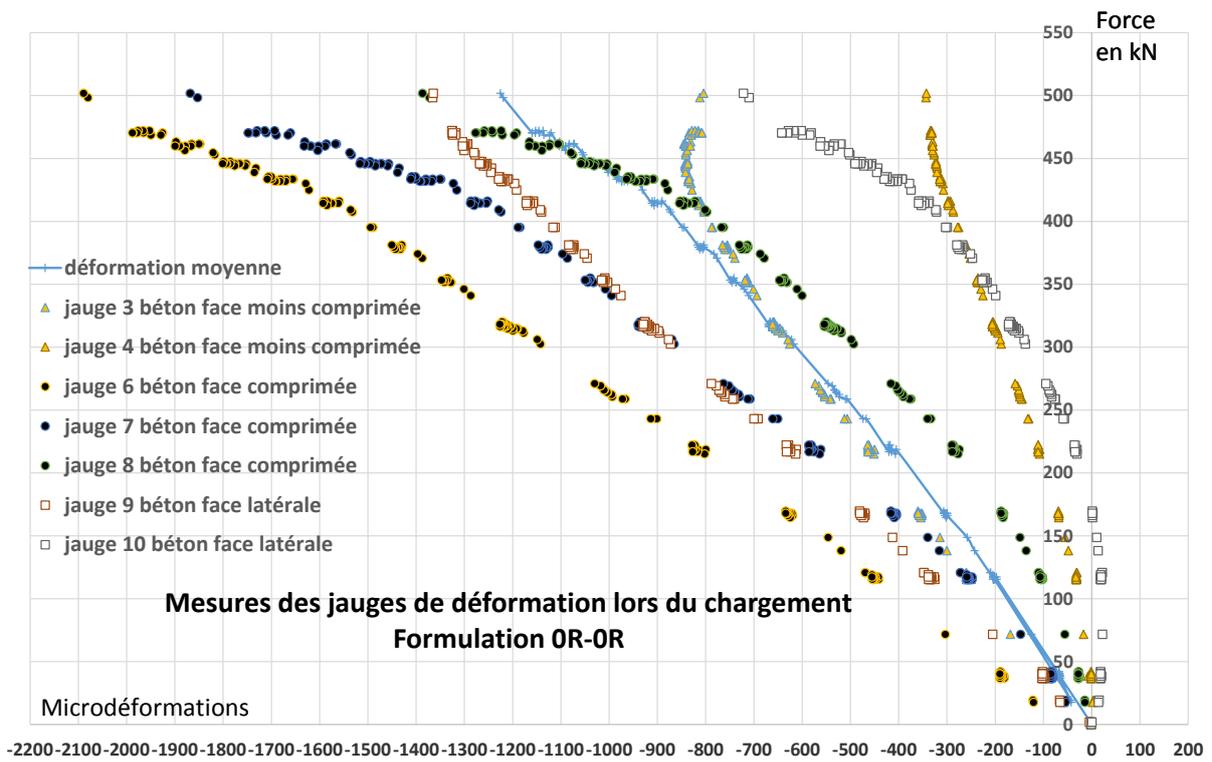


Figure 26: Déformation des jauges bétons pour la formulation OR-OR.

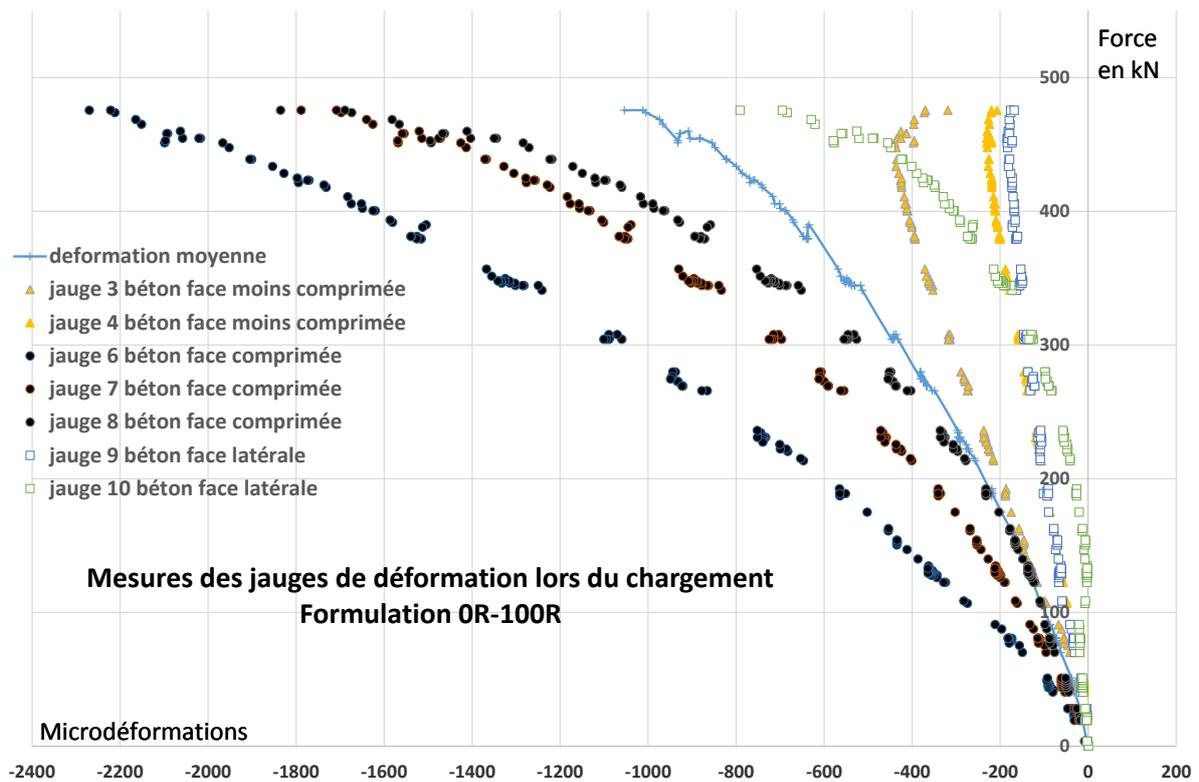


Figure 27: Déformation des jauges bétons pour la formulation OR-100R.

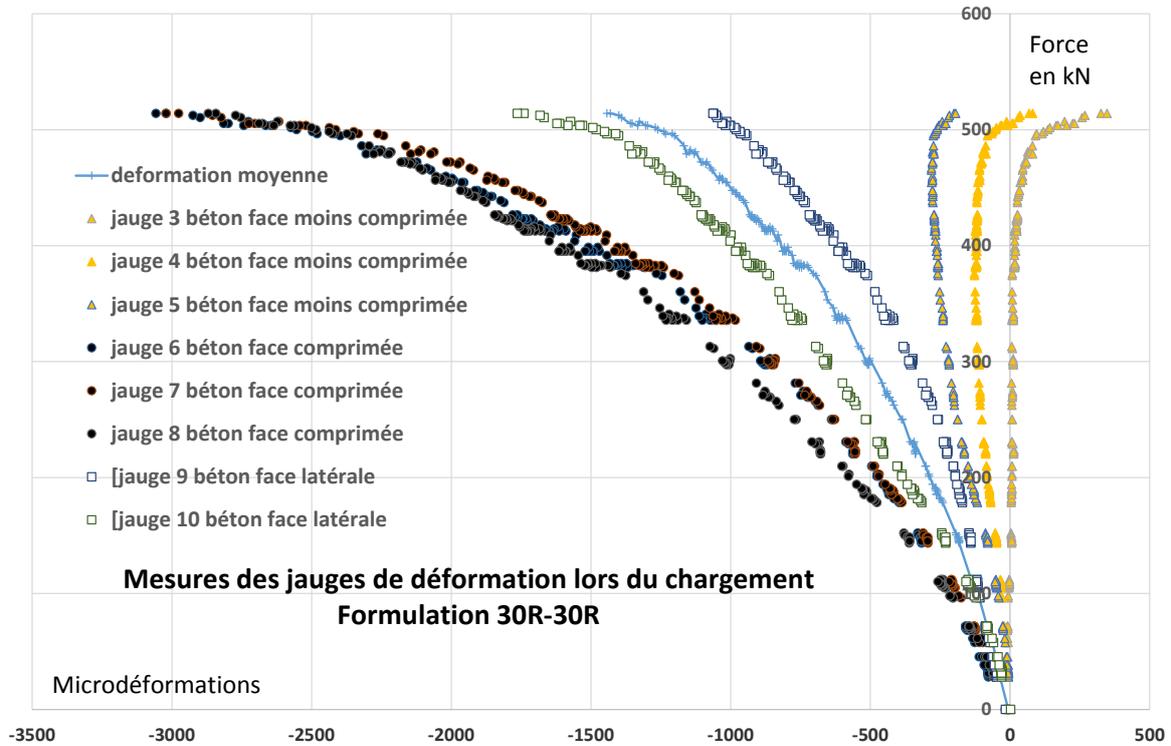


Figure 28: Déformation des jauges bétons pour la formulation 30R-30R.

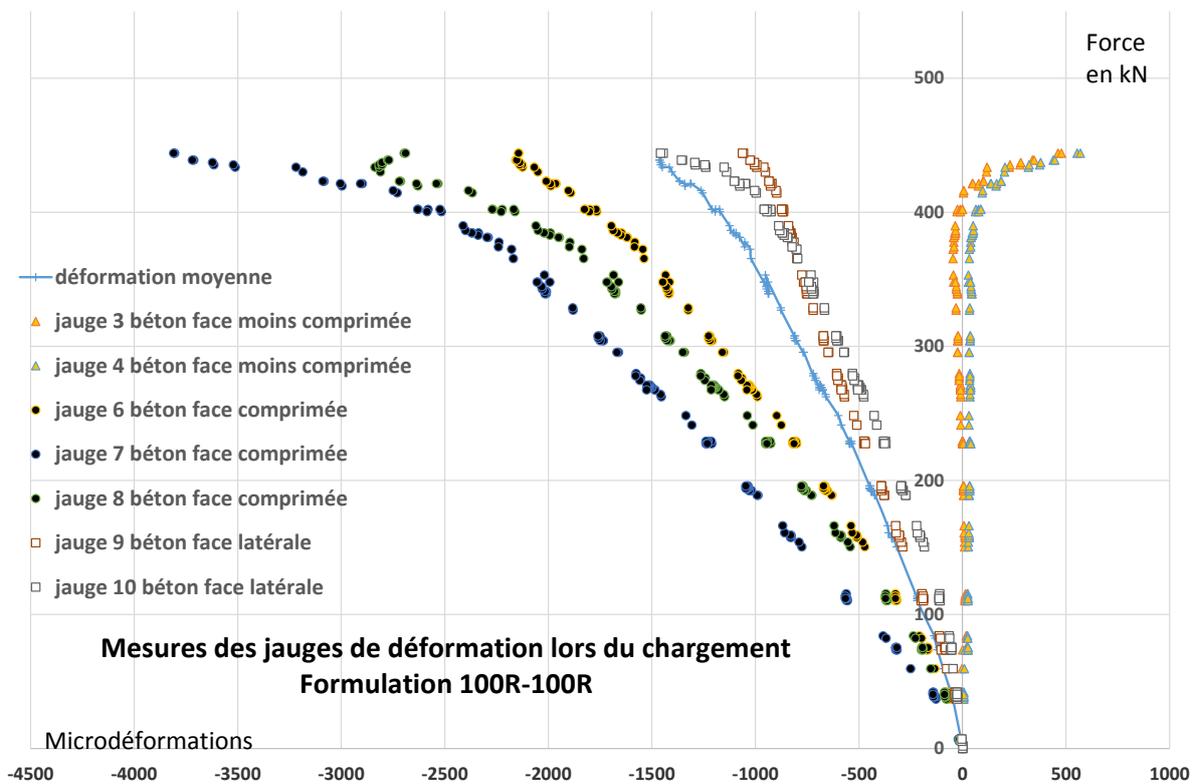
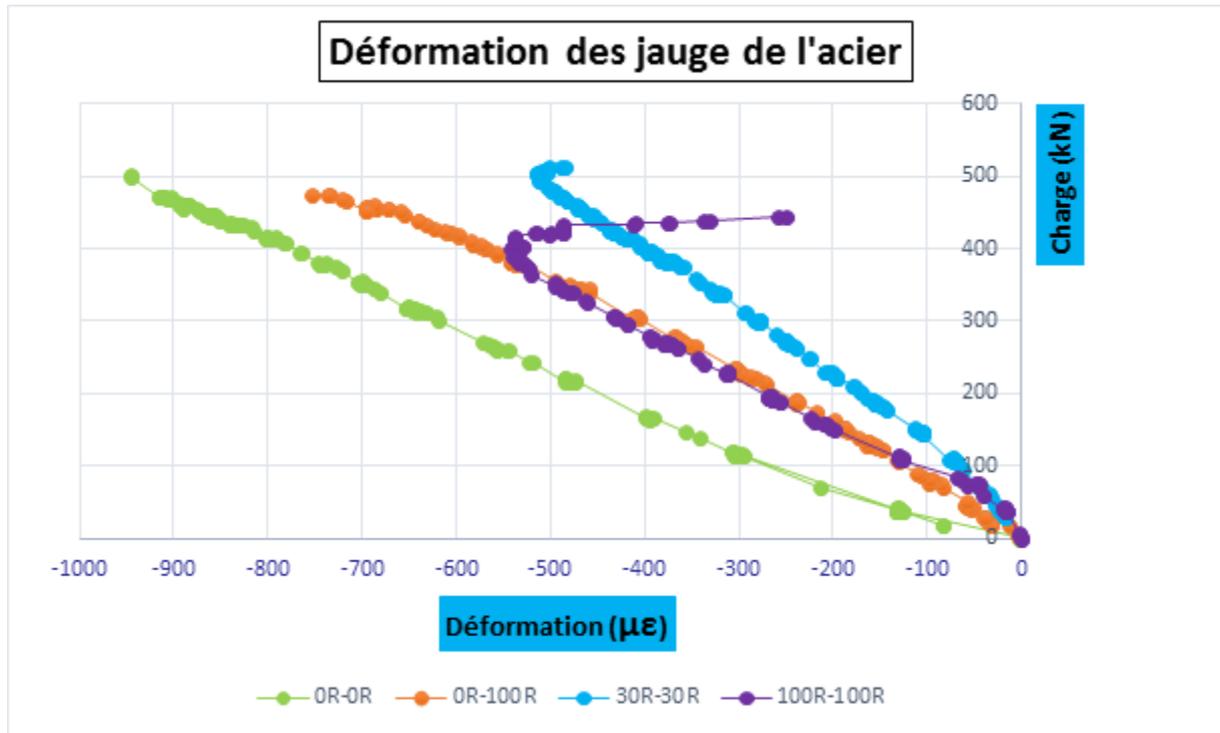


Figure 29: Déformation des jauges bétons pour la formulation 100R-100R.

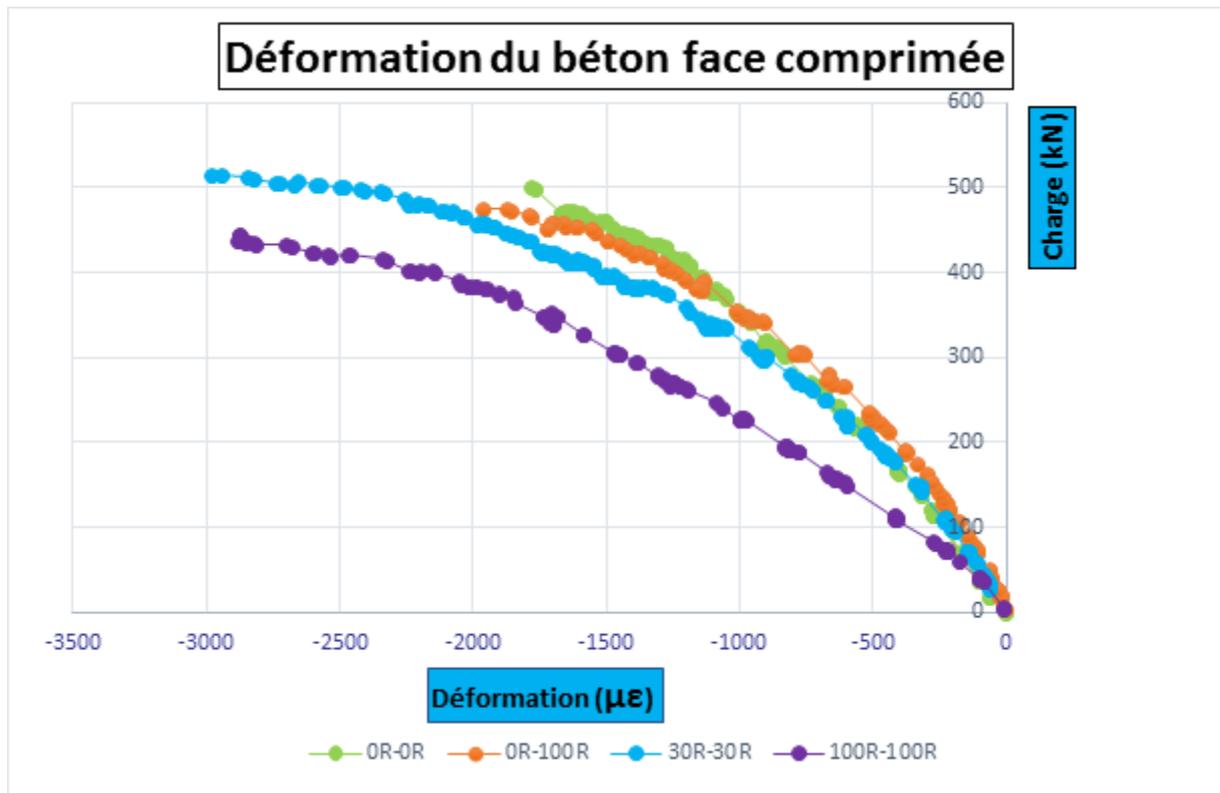
Pour toutes ces courbes de déformations, les ronds noirs représentent la face la plus comprimée, les carrés blancs représentent les faces latérales et les triangles jaunes

représentent la face la moins comprimée. La courbe moyenne est représentée par un trait et des croix bleus. Les courbes de déformation montrent bien un comportement en compression (déformation négative) pour tous les poteaux sauf le 100R-100R qui montre une légère symbolique d'un comportement atypique ou d'une excentricité initiale plus forte. Les courbes de déformations sont bien représentatives du comportement de la face en question (comprimée, moins comprimée et latérales), en particulier pour le 30R-30R et le 100R-100R où les trois zones sont bien délimitées. On peut visualiser que seul le 30R-30R a bien trois mesures de déformation pour la face la moins comprimée car la jauge 5 ne fonctionnait pas pour les 3 autres essais. Cette erreur n'a pu être corrigée que pour le dernier essai réalisé (30R-30R). La comparaison entre les différents poteaux sera développée par la suite.



**Figure 30:** Déformation dans les armatures dans côté le moins comprimé 0R-0R, des poteaux 0R-100R, 30R-30R, 100R-100R.

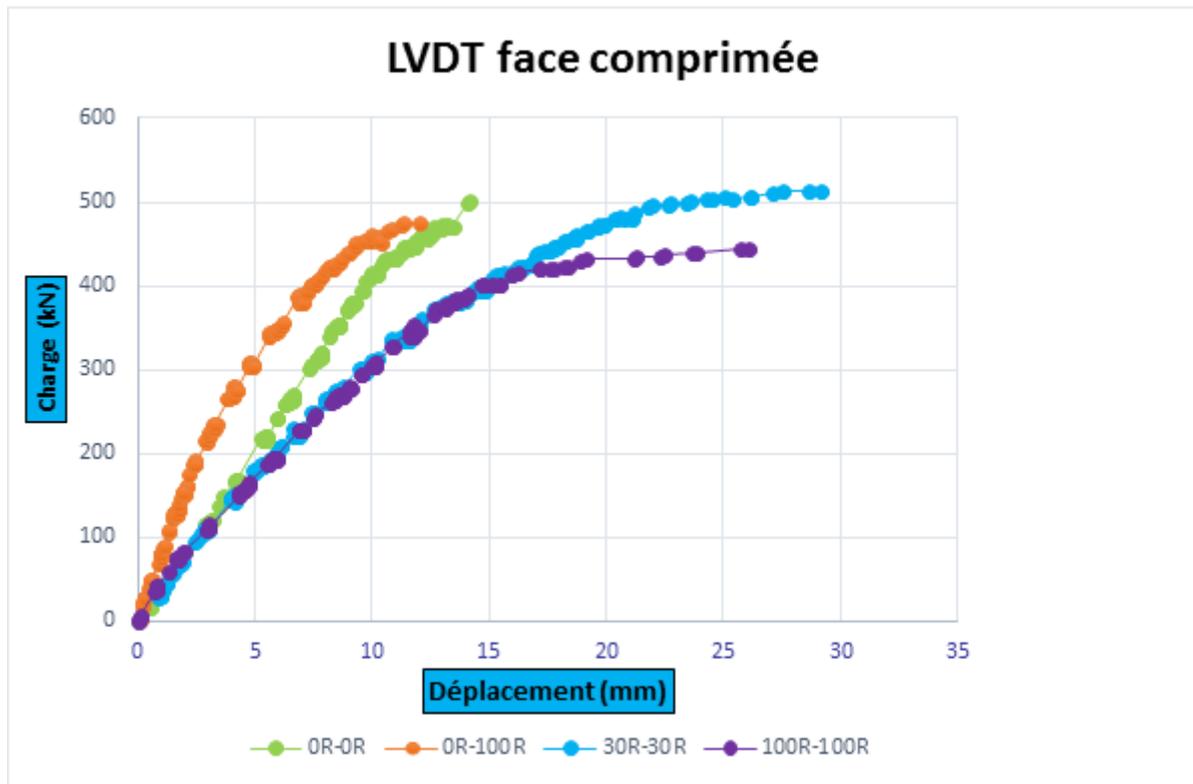
La figure 30 présente les déformations mesurées par les jauges de déformation collées sur les aciers dans le côté le moins comprimé (moyenne de deux mesures) en fonction de la charge appliquée pour les poteaux testés dans cette étude. Comme attendu pour la faible excentricité appliquée dans cette étude, la figure 30 montre que les déformations des aciers sont en compression et linéaires (sauf pour le 100R-100R) jusqu'à la rupture.



**Figure 31:** Déformation du béton dans la face comprimée (moyenne de 3 jauges) pour les poteaux 0R-0R, 0R-100R, 30R-30R, 100R-100R.

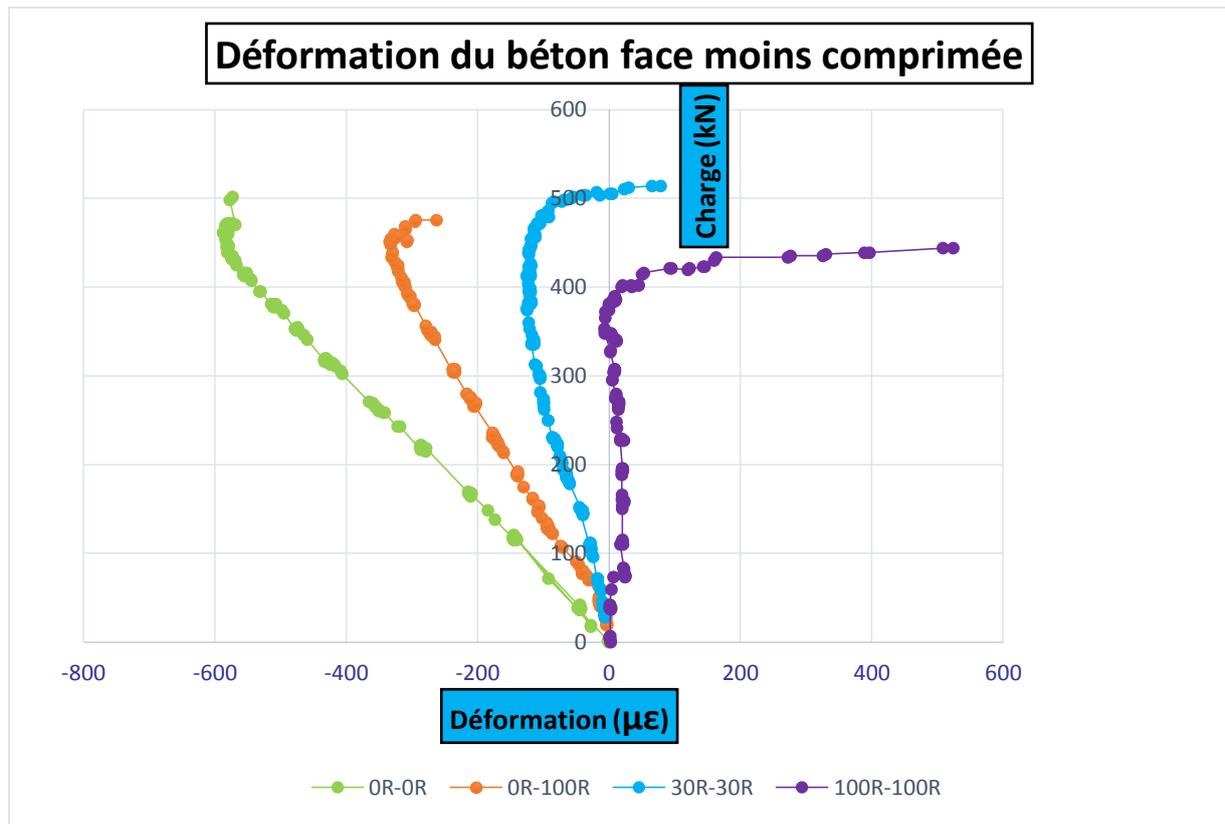
La figure 31 présente les déformations mesurées sur la face comprimée (moyenne de déformations trois mesures) en fonction de la charge appliquée pour les poteaux 0R-0R, 30R-30R, 0R-100R et 100R-100R.

La figure 31 montre que les courbes de déformations suivent la même tendance observée sur la figure 25 (déplacement transversal), deux phases distinguent le comportement des poteaux : entre le moment où la charge est appliquée jusqu'à l'augmentation rapide des déformations plastiques du béton comprimé (face comprimée) où une augmentation plus rapide de déformations de béton en compression est observée. Les courbes des poteaux 0R-0R et 0R-100R sont presque confondues. Le poteau 100R-100R pour lequel la courbe présente un écart important par rapport aux autres courbes. Les déformations mesurées à la charge de 400 kN sont 1150, 1500, 1250, et 2150 microdéformations pour les poteaux 0R-0R, 30R-30R, 0R-100R et 100R-100R respectivement. Ces valeurs correspondent à une différence de +30, +7 et +87% respectivement par rapport au poteau sans granulats recyclé 0R-0R. La même tendance a été retrouvée par les mesures des déplacements sur la face la moins comprimée avec un LVDT (figure 32), même si la différence de déplacements entre les poteaux 30R-30R et 100R-100R est moins évidente, leurs déformations restent supérieures à celles enregistrées sur deux autres poteaux : 0R-0R, 0R-100R.



**Figure 32:** Déplacement de béton dans la face comprimée (mesuré par LVDT) pour les poteaux 0R-0R, 0R-100R, 30R-30R, 100R-100R.

La figure 33 présente les déformations mesurées sur la face la moins comprimée (moyenne de déformations sur trois mesures) pour les poteaux testés dans cette étude en fonction de la charge appliquée. La figure 33 montre que pour les poteaux 0R-0R, 30R-30R et 0R-100R, dans la face la moins comprimée, le comportement charge-déformation est linéaire avec des déformations en compression jusqu'à une phase avant la rupture (augmentation rapide des déformations plastiques du béton dans la face comprimée) où les déformations dans la face la moins comprimée s'inversent et partent vers la traction du fait du déplacement de l'axe neutre avant la rupture. Seul le poteau 100R-100R montre de faibles déformations en traction dès sa mise en charge. A 85% de la charge ultime, une augmentation rapide des déformations en traction a été observée pour ce poteau, leur valeur passe de 45 à 525 microdéformations

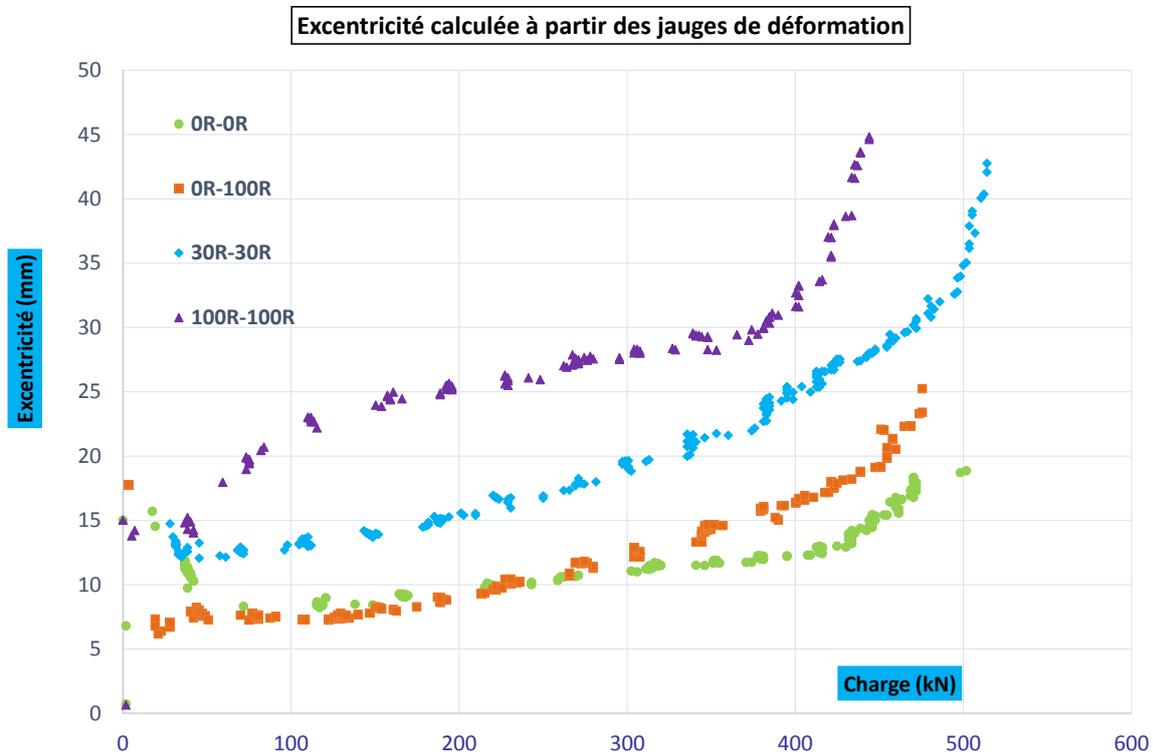


**Figure 33:** Déformation de béton dans la face la moins comprimée (moyenne des jauges 1, 2 et 3).

Les mesures enregistrées par le LVDT sur la face comprimée ne sont pas exploitables, elles ne permettent donc pas de retirer des conclusions par rapport au comportement du poteau 100R-100R différent des trois autres poteaux (départ en traction dès le début). Une explication serait que l'excentricité soit plus importante pour 100R-100R que celle des autres poteaux OR-0R, 30R-30R et OR-100R. Cette augmentation en excentricité serait due à un défaut du dispositif expérimental. Néanmoins, les déformations sur la figure 26 montrent que les aciers sur le côté le moins comprimé partent en compression dès la mise en charge du poteau 100R-100R et pour tous les autres poteaux.

Les observations semblent montrer que la flèche et les déformations mesurées sont différentes et varient en fonction du taux de substitution. Le comportement du poteau avec un remplacement de 30% de gravier et de sable et total des granulats naturels par des recyclés 30R, 30R et 100R, 100R respectivement est nettement différent par rapport au poteau témoin OR-0R. D'après les courbes charge-flèche, la flèche ultime est croissante selon l'ordre suivant : 0-0, 0-100, 30-30, 100-100. Ce résultat est en accord avec la conclusion de [Zhou et al, 2010] [18] sur le comportement des poteaux fabriqués avec un béton à base de granulats recyclés sous chargement de compression excentriques élevés avec différents taux de substitutions de granulats. En effet, les résultats de leurs essais ont montré que le déplacement transversal des poteaux fabriqués à partir du béton recyclé est supérieur à celui d'un poteau fabriqué avec un béton ordinaire

Pour le poteau 0-100, la flèche paraît « bloquée » jusqu'à 180 kN environ (dysfonctionnement du capteur de déplacement probablement), puis la courbe croise celle du poteau 0-0 vers 450 kN. On notera une chute du module d'Young et pour le poteau 100-100 (moins de 30% par rapport au poteau témoin). Les poteaux 30R, 30R et 0R, 100R ont un module d'élasticité inférieur à celui du poteau témoin de 10% environ. Cependant, le poteau 30R, 30R paraît plus déformable que le poteau 0R, 100R (figures 31 et 32) sur le côté comprimé et moins déformable sur le côté le moins comprimé (figure 33).



**Figure 34: évolution de l'excentricité au cours du chargement pour les 4 formulations.**

L'incertitude sur la valeur exacte de l'excentricité (initialement 15 mm) pourrait jouer un rôle dans ces écarts. En effet, on peut remarquer en figure 34 que les poteaux 30R-30R et 100R-100R présenteraient une excentricité plutôt proche de 15 mm tandis que les poteaux 0R-0R et 0R-100R montrent une excentricité initiale plutôt de l'ordre de 10 mm. Cela favoriserait les déformations importantes pour le 30R-30R et le 100R-100R. Néanmoins, en tenant compte de ces réserves une tendance liée aux taux de substitutions des granulats naturels peut être confirmée

## Conclusion générale et perspectives

Cette étude concernant le comportement des poteaux avec granulats recyclés sous compression excentrée s'est limitée à quatre spécimens de quatre formulations différentes qui ont été réalisés et testés suivant les directives du projet national RECYBETON.

Les premières observations semblent montrer qu'un taux de substitution faible (30R-30R) entraîne peu de variations dans la charge ultime du poteau par rapport à un poteau témoins. On remarque également qu'un fort taux de substitution en gravier accompagné de sable naturel (0R, 100R) ne fait pas varier fondamentalement le comportement d'un poteau de point de vue de la charge ultime (perte de 5% par rapport au poteau témoins). Dans les deux cas précédents, les observations semblent montrer que les déformations mesurées sont différentes et varient en fonction du taux de substitution mais, il serait difficile de conclure sur la différence de comportement entre les deux poteaux 0R-100R et 30R-30R même si ce dernier a montré des déformations en compression et transversales plus importantes par rapport au poteau 0R-100R. Par contre, un remplacement total des granulats naturels par des recyclés (100R, 100R) met en avant une variation des propriétés mécaniques et un comportement mécanique assez différents. On notera une chute du module d'Young et une déformabilité et une flèche transversale plus importantes sur toutes les mesures.

Pour approfondir cette étude, le calcul de la charge ultime acceptable à l'EUROCODE 2 a été mené suivant le calcul sécuritaire par la méthode de Faessel. La charge ultime préconisée par l'EUROCODE 2 reste inférieure à celle obtenue sur les poteaux testés. Il semblerait donc que l'EUROCODE 2 permet de concevoir des structures de type poteau en béton recyclé de manière sécuritaire.

Cette conclusion cherche avant tout à souligner que pour le calcul « de conception » EUROCODE 2, aucune modification n'est à prévoir pour assurer un comportement conforme des poteaux recyclés. Par contre, si l'on veut garder un coefficient de sécurité comparable, il semblerait que les poteaux à très fort taux de remplacement méritent une attention particulière.

Evidemment, il est difficile de tirer des conclusions strictes sur une palette de spécimens aussi restreinte. Cependant, des tendances liées aux taux de substitutions des granulats naturels semblent se dégager à l'issue de ce travail et méritent d'être soulignées.

Afin de fournir des préconisations normatives, cette étude devra être poursuivie par une multiplication des essais et des formulations, par exemple 50R-50R, qui permettrait d'accéder à des résultats intermédiaires les cas à 30% et 100% de recyclage. Les autres pistes à explorer concernent la géométrie. Dans un premier temps, il serait opportun de tester des poteaux de plus élancement (dans notre cas limité par une hauteur de 1.20 m due à la presse utilisée). Ceci permettrait d'augmenter la section et par conséquent de pouvoir travailler sur des excentricités plus grandes qui entraîneraient de plus faibles incertitudes sur les mesures. Dans un second temps il serait primordial d'étudier le comportement des structures sous des chargements de longue durée afin de déterminer l'effet du fluage sur le comportement global des poteaux en béton recyclés, particulièrement sensible à ce phénomène.

## Référence Bibliographique

- [1] Adema, « Analyse technico-économique de 39 plateformes françaises de tri /valorisation des déchets du BTP », septembre, 2010.
- [2] L. Noelia, P-Y. Mafieux, Ph. Torcy, Y. Amine, Bouali Amir « Incorporation de fines de béton de démolition dans la fabrication de mortier par substitution du ciment » AUGC 2013, Cachan, France.
- [3] De Juan M.S. and Gutiérrez P.A., « Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate », *Construction and Building Materials*, 2009.
- [4] Berre Djem L., Arabie N. « Les matériaux de démolition une source de granulats pour béton: formulation et caractérisation d'un béton à base de ces recyclés. Conference: SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, Volume: 2, 2009.
- [5] Hansen T. C., « Recycling of Demolished concrete and Masonry" -Report of Technical committee 37-DRC (Demolition and Reuse of concrete) », *Rile Report 6*, 336 p., 1992.
- [6] Deng X. « Study on effect of compressive strength of recycled aggregate concrete with water cement ratio » *Chin. Concur. J.* 2, 46–48, 2005.
- [7] S. C. Angulo, P. M. Carrizo, A. D. Figueiredo, A. P. Chaves et V. M. John, « On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete », *Materials and Structures*, 43: 519–528, 2010.
- [8] Kou S.C. et Poon C.S. « Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates » *Cement and Concrete composites*, 31, 622-627, 2009.
- [9] Xiao, J.-Z., J.-B. Li, and C. Zhang « On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: An overview » in *Materials and Structures*, Springer Netherlands, pp. 655-664, 2006.
- [10] Chakradhara R. M., Bhattacharyya S., and Barai S., « Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete » *Materials and Structures*, Springer Netherlands, p. 205-220, 2011.
- [11] Vu Nam Nguyen, Franck Cassagnabère, Martin Cyr et Michel Mouret « Evolution de la rhéologie du béton frais en fonction du pourcentage et de l'état de pré-saturation des granulats recyclés, et en fonction du malaxage », 2014.

- [12] Tam, V.W.Y., C.M. Tam, and Y. Wang « Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach » *Construction and Building Materials*, 21(10): pp. 1928-1939, 2007.
- [13] Cheng, G.Y.: « Experimental study on the basic performance of recycled aggregate concrete with different displacement ratio » *Chin. Concr. J.* 11, 67–70, 2005.
- [14] Corinaldesi V., Moriconi G., «Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete», *Construction and Building Materials*, 23, 2869–2876, 2009.
- [15] Casuccio M., Torrijos M.C., Giaccio G., Zerbino R « Failure mechanism of recycled aggregate concrete » *Construction and Building Materials* 22, 1500–1506, 2008.
- [16] Xiao, J.Z.: « Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading ». *J. Tongji Univ.* 35(11), 1445–1449, 2007.
- [17] Hany A. Kottb, Nasser F. El-Shafey, Akram A. Torkey « Behavior of high strength concrete columns under eccentric loads » *HBRC Journal*, Volume 11, Issue 1, P. 22–34, 2015.
- [18] Zhou JH, He HJ, Meng XH, Huan S. « Experimental study of recycled concrete columns under large eccentric compression ». *Proceedings of the 12th international conference on engineering, science, construction, and operations in challenging, environments*; March 14–17. Doi:10.1061/411096(336)54, 2010.
- [19] Breccolotti M, Materazzi AL. « Structural reliability of eccentrically-loaded sections in RC columns made of recycled aggregate concrete ». *EngStruct*; 32(3):704–12, 2010.
- [20] Liu Chao LIU, Guoliang BAI, Letian WANG, and Zonggang QUAN, « Experimental study on the compression behavior of recycled concrete columns » *2nd International Conference on Waste Engineering and Management – ICWEM*, 2010.

**Annexe**

<b>essai</b>	<b>0R-0R</b>	<b>0R-100R</b>	<b>30R-30R</b>	<b>100R-100R</b>
COMPRESSION (MPa)	27,59	27,7	29,03	28,27
	28,02	28,24	28,88	28,96
	29,54	27,85	28,13	29,69
TRACTION (MPa)	2,83	2,72	3,02	2,61
	2,89	2,67	2,71	2,38

**Annexe 1 : Tableau récapitulatif des mesures sur éprouvettes béton 16\*32**