

597.E - SEPTEMBRE 2024

ÉTUDES ET RECHERCHES

JUSTIFICATION DE
L'APPLICABILITÉ DE L'EUROCODE
8 POUR DIMENSIONNER EN
ZONE SISMIQUE UN OUVRAGE
RÉALISÉ AVEC DES BÉTONS DE
GRANULATS RECYCLÉS

MERYEM BOUMEDIENE
MATTHIEU SCALLIET

CERIB
Expertise concrète



Justification de l'applicabilité de l'Eurocode 8 pour dimensionner en zone sismique un ouvrage réalisé avec des bétons de granulats recyclés

-

Synthèse des travaux réalisés au sein du SG CN/PS "Calcul
des bétons contenant des granulats recyclés en ZONE
SISMIQUE"

597.E

Avant-propos

Ce rapport est articulé en deux parties :

- la première partie est destinée au lecteur qui souhaite apprécier très rapidement si l'étude évoquée le concerne, et donc si les méthodes proposées ou si les résultats indiqués sont directement utilisables pour son entreprise ;
- la deuxième partie de ce document est plus technique ; on y trouvera donc tout ce qui intéresse directement les techniciens de notre industrie.

© 2024 CERIB – CS 10010 – 28233 Epernon Cedex

ISSN 0249-6224 – EAN 9782857553724

597.E – Septembre 2024

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction
par tous procédés réservés pour tous pays.

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de son article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon exposant son auteur à des poursuites en dommages et intérêts ainsi qu'aux sanctions pénales prévues à l'article L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle.

Sommaire

1. Objet de l'étude	5
2. Essais de compression monotones et cycliques	7
2.1. Protocole des essais de compression monotones et cycliques	7
2.2. Instrumentation	8
2.3. Programme des essais de compression monotones et cycliques	8
2.4. Résultats des essais de compression monotones et cycliques	9
2.4.1. Béton C25/30 (Février 2022)	9
2.4.2. Béton C35/45 (Avril 2023)	14
2.4.3. Béton C35/45 (Février 2024 - nouvelle campagne)	17
2.4.4. Conclusion des essais statiques et monotones sur les 2 classes de béton C25/35 et C35/45	21
3. Essais Pull-out monotones et cycliques	22
3.1. Protocole des essais Pull-out monotones et cycliques	22
3.2. Instrumentation	23
3.3. Résultats des essais comparatifs Pull-out statiques et cycliques	24
3.3.1. Essais de compression et de traction par fendage	24
3.3.2. Essais monotones	24
3.3.3. Essais cycliques	26
4. Conclusion générale de l'étude	29
Bibliographie	31
Index des figures	32
Index des tableaux	33

1. Objet de l'étude

L'économie circulaire repose sur un principe simple : produire de manière responsable en limitant le gaspillage des ressources et la production de déchet. Dans ce cadre, le recyclage des granulats permet d'économiser la ressource naturelle et de valoriser des déchets de déconstruction en limitant ainsi la quantité de matériaux mis en décharge.

Les travaux menés dans le cadre du projet RECYBETON ont permis d'émettre, en novembre 2018, des premières recommandations pour faciliter l'utilisation des granulats recyclés pour la fabrication du béton et son utilisation dans la conception et la réalisation d'un ouvrage. Son utilisation dans des projets réels a commencé à se développer de plus en plus, les maîtres d'ouvrage étant séduits par cette solution présentant des avantages sur le plan environnemental. Toutefois l'absence d'un cadre normatif de ces recommandations (avec notamment une référence dans les Eurocodes pour le volet dimensionnement) constituait un frein.

Face à ce constat, la commission BNTRA CN EC2 "Calcul des structures en béton", ainsi que la commission AFNOR P18B en charge du matériau béton, ont décidé de travailler sur des normes françaises pour palier ce vide normatif. Ce travail, essentiellement basé sur les recommandations du projet national Recybéton et sur les réflexions européennes en cours sur le sujet, a conduit à :

- L'ajout de règles d'application pour le béton contenant des granulats recyclés dans la norme NF EN 206+A2/CN NOVEMBRE 2022 par la commission P18B ;
- La rédaction d'un amendement à l'Annexe Nationale : NF EN 1992-1-1/NA/A1 NOVEMBRE 2022 par la commission BNTRA pour traiter le dimensionnement dans les zones NON sismiques.

Lors de ce travail, la commission BNTRA CN EC2 a estimé qu'il serait également pertinent de prévoir un texte normatif encadrant le calcul sismique des structures comportant ce type de matériau afin d'être en mesure de traiter pleinement de façon normative le calcul de ces structures. Dans ce contexte, la commission CN/PS a été consulté en janvier 2021 pour étudier l'applicabilité de la EN1998-1-1 pour les bétons réalisés avec des granulats recyclés. Un Sous-Groupe a alors été créé au sein de la CN/PS (SOUS-GROUPE CN/PS "Calcul des bétons contenant des granulats recyclés en ZONE SISMIQUE") pour travailler sur le dimensionnement d'ouvrages réalisés en zone sismique avec des bétons de granulats recyclés et analyser le background technique produit, afin de formuler un avis d'expert sur la question posée vis-à-vis du calcul sismique.

L'objet de ce rapport est de regrouper les différentes justifications minimales définies comme nécessaires par le SOUS-GROUPE CN/PS "Calcul des bétons contenant des granulats recyclés en ZONE SISMIQUE" pour vérifier expérimentalement l'aptitude des bétons de granulats recyclés à être utilisés dans des zones sismiques et leurs conditions d'utilisation. Les essais réalisés dans ce contexte ont eu pour objectif de démontrer que les règles de l'Eurocode NF EN 1998-1 « Calcul Structures Résistance Séismes – Règles générales » sont bien applicables aux bétons de granulats recyclés moyennant la prise en compte de la modification de certaines propriétés mécaniques (Module d'élasticité...) selon l'Eurocode NF EN 1992-1-1/NA/A1.

Plusieurs vérifications expérimentales ont été réalisées dans le cadre de la justification de l'efficacité et de la fiabilité de l'utilisation de ces bétons de granulats recyclés en zones sismiques, à savoir :

- Essais comparatifs de compression monotones et cycliques sur des éprouvettes en béton de granulats courants (béton de référence) et des éprouvettes en béton de granulats recyclés ;
- Essais pull-out comparatifs sur des barres d'acier ancrées dans des cubes en béton de granulats courants et des cubes en béton de granulats recyclés.

Le programme d'essais a été réalisé sur des bétons de classe de résistance C25/30 et C35/45 avec des taux de substitution de granulats courants pour des granulats recyclés allant de 0% à 40%.

L'analyse des différents essais et les informations techniques disponibles sur ce matériau ont permis d'écartier, pour les bétons testés, la suspicion d'un comportement anormal en zone sismique et évitent, ainsi, l'introduction de limites complémentaires autres que celles déjà introduites dans l'annexe nationale NF EN 1992-1-1/NA/A1 par la commission BNTRA pour dimensionner un ouvrage réalisé avec des bétons de granulats recyclés. Une note de synthèse a alors été rédigée en juin 2024 pour reprendre la conclusion technique indiquée ci-dessus et synthétiser le travail d'analyse réalisé au sein du SG/CNPS :

« L'Eurocode 8 (NF EN 1998-1 et son annexe nationale et NF EN 1998-2 et son annexe nationale) est utilisable pour dimensionner en zone sismique un ouvrage réalisé avec des bétons de granulats recyclés de classe de résistance maximale C40/50 (compte tenu d'une résistance en compression plus élevée (≈ 48 MPa) mesurée sur les éprouvettes de classe visée C35/45, le béton est donc plus représentatif de la classe C40/50) avec un taux maximal de substitution en granulats recyclés de type 1 de 40% sans exigence supplémentaire que celles indiquées dans la NF EN 1992-1-1/NA/A1. »

Un retour des travaux réalisés par le SG/CNPS sera fait en commission plénière le 18 septembre 2024. Sous réserve d'une validation par la commission plénière, cette note pourrait être ensuite introduite dans les annexes nationales des prochaines normes NF EN 1998-1 (Bâtiment) et NF EN 1998-2 (Ponts) en cours de révision.

2. Essais de compression monotones et cycliques

Dans le cadre de cette campagne d'essais comparatifs, des éprouvettes de béton de granulats courants et de béton de granulats recyclés ont été soumises à des essais de compression monotones et cycliques. Les essais de compression monotones visent à déterminer la résistance maximale à la compression des deux types de béton, tandis que les essais de compression cycliques avaient pour objectif d'évaluer leur comportement sous des charges répétées simulant des conditions sismiques. Ces tests permettent d'analyser la capacité des bétons recyclés à maintenir leur intégrité structurelle et à résister aux forces dynamiques, en comparaison avec les bétons traditionnels selon les exigences de l'Eurocode 8 (EC8). Les résultats obtenus sont cruciaux pour démontrer que les bétons de granulats recyclés peuvent être utilisés en toute sécurité dans les zones sismiques sans nécessiter de conditions supplémentaires.

2.1. Protocole des essais de compression monotones et cycliques

Le protocole d'essai de compression sur des éprouvettes cylindriques normalisées D160 × H320 mm en béton à différents pourcentages de substitution de granulats courants en granulats recyclés allant de 0% à 40% est décrit ci-dessous :

- 1- Réalisation de 3 essais statiques pilotés en déplacement afin de déterminer l'effort de rupture σ_{ult} , la déformation au pic ϵ_{c1} et le module d'élasticité E.

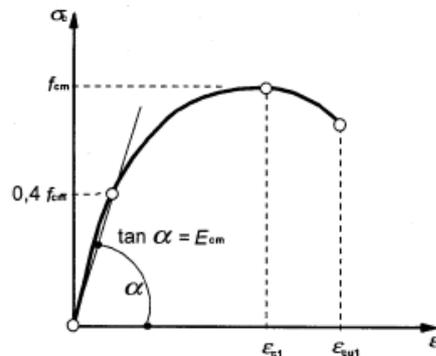


Figure 1 - Courbe contrainte déformation type d'un béton à 0% de granulats recyclés (l'Eurocode 1992-1-1, Paragraphe 3.1.5, figure 3.2)

- 2- Réalisation de 12 essais cycliques à 4 niveaux de déformation constante pour 10 cycles de chargement en fonction de ϵ_{c1} (soit 3 essais cycliques par niveau de déformation), pilotés en déplacement :
 - a. Niveau 1 : valeur au pic obtenue sur les essais monotones divisée par 2 soit $\epsilon_{c1}/2$;
 - b. Niveau 2 : valeur juste avant le pic soit 80% de ϵ_{c1} ;
 - c. Niveau 3 : valeur définie après analyse des résultats précédents ;
 - d. Niveau 4 : valeur définie après analyse des résultats précédents.

2.2. Instrumentation

La mesure des déformations est réalisée par l'intermédiaire de 3 capteurs de déplacement placés axialement suivant une répartition de 120°. Les mesures des efforts, du déplacement du plateau de chargement et des déformations sont enregistrées en continu.



Figure 2 - Instrumentation pour les essais de compression monotones et cycliques

2.3. Programme des essais de compression monotones et cycliques

Les essais de compression monotones et cycliques se sont déroulés au sein du laboratoire des matériaux composites pour la construction (LMC²) de l'université Claude Bernard Lyon 1, suivant le programme présenté dans le tableau ci-dessous :

Classe de résistance visée à la compression du béton	% GR***	Essais cycliques ou monotones	Date de réalisation des essais
C25/30 *	0%, 15%, 25% et 40%	Essais cycliques et monotones	Février 2022
C35/45*	0%, 15%, 25% et 40%	Essais cycliques et monotones	Avril 2023
C35/45**	0% et 40%	Essais cycliques et monotones	Février 2024

Tableau 1 - Programme des essais de compression monotones et cycliques

* Il était prévu initialement de réaliser les essais sur les bétons C25/30, C35/45 et C50/60. Toutefois, la classe C50/60 n'a pas pu être testée du fait de la limite de la capacité de la presse et des éprouvettes pouvant avoir une résistance réelle plus forte que celle visée.

** Il a été signalé un défaut de pilotage des essais réalisés en force au lieu du déplacement conduisant ainsi à des courbes contrainte-déformation tronquées dans la partie post-pic nécessaire à l'analyse de la ductilité du béton et à la fixation des niveaux de déformation pour les essais cycliques.

A la suite de ceci, une deuxième campagne d'essais de compression monotones et cycliques a été réalisée uniquement sur le béton C35/45 avec des pourcentages de substitution avec des GR de 0% et 40%.

Les conclusions en découlant devront être généralisées pour les autres bétons C25/30 et les autres pourcentages de GR (entre 0% et 40%), car le comportement aux essais de compressions cycliques et monotones remarqués sur l'ensemble est plus ou moins identique.

*** GR est l'abréviation dans ce rapport de granulats recyclés. B40%GR est l'abréviation de béton à 40% de granulats recyclés et BR est l'abréviation du béton de référence (béton à 0% de granulats recyclés).

A noter que la résistance en compression élevée des éprouvettes de béton réellement mesurée le jour des essais pour la classe de résistance visée (C35/45) de 48 MPa, plus représentative d'une classe C40/50, a permis d'élargir la conclusion de l'étude à cette classe de résistance.

2.4. Résultats des essais de compression monotones et cycliques

L'ensemble des essais de compression monotones et cycliques, cofinancés par la FFB (Fédération Française du Bâtiment), a été réalisé au laboratoire des Matériaux Composites pour la Construction (LMC²) de l'Université Claude Bernard Lyon 1. Trois rapports d'essais détaillés ont été rédigés pour documenter ces travaux, le premier en février 2022, le deuxième en avril 2023 et le troisième en février 2024, correspondant respectivement à la première et à la deuxième campagne d'essais sur le béton C35/45.

Il convient de se référer à ces rapports pour des informations détaillées sur la réalisation des essais et les résultats en découlant.

L'ensemble des essais réalisés est présenté dans le Tableau 2:

Classe de résistance	% de granulats recyclés				Date
	0%	15%	25%	40%	
C25/30	1 série	1 série	1 série	1 série	Février 2022
C35/45	1 série	1 série	1 série	1 série	Avril 2023
C35/45	1 série	-	-	1 série	Février 2024

Tableau 2 - Ensemble des campagnes d'essais de compression

1 série = 15 essais (3 monotones et 12 cycliques) comme décrit en paragraphe 2.1

2.4.1. Béton C25/30 (Février 2022)

2.4.1.1. Essais monotones (chargement statique)

Le Tableau 3 présente les résultats des essais de compression monotone, indiquant les valeurs moyennes de la contrainte ultime $\sigma_{ult,moyen}$ et le module d'élasticité $E_{cm,moyen}$.

% GR	0%	15%	25%	40%
$\sigma_{ult,moyen}$ [MPa]	28,5 ± 1,1	25,4 ± 0,6	24,8 ± 0,4	22,1 ± 0,3
$E_{cm,moyen}$ [MPa]	29 948 ± 1337	29 994 ± 1325	23 405 ± 1340	18 467 ± 531

Tableau 3 - Résultats moyens des essais de compression monotones sur des éprouvettes en béton C25/30 à différents pourcentages de GR

Les Figure 3 à Figure 6 présentent l'ensemble des 12 courbes de l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation, obtenues à partir des 12 essais de compression monotones sur des éprouvettes C25/30 avec les 4 pourcentages de granulats recyclés (0%, 15%, 25% et 40%).

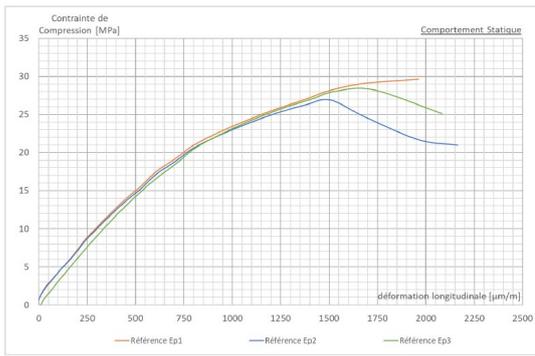


Figure 3 - Courbe contrainte-déformation du béton de référence (0% de GR)

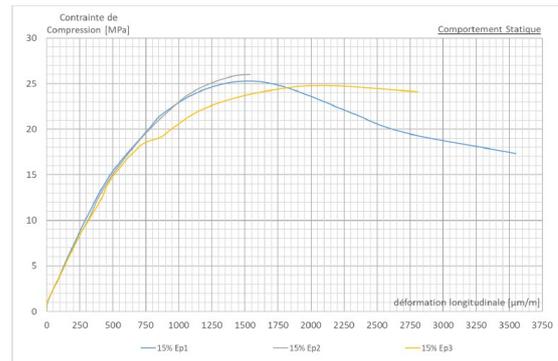


Figure 4 - Courbe contrainte-déformation du béton à 15% de GR

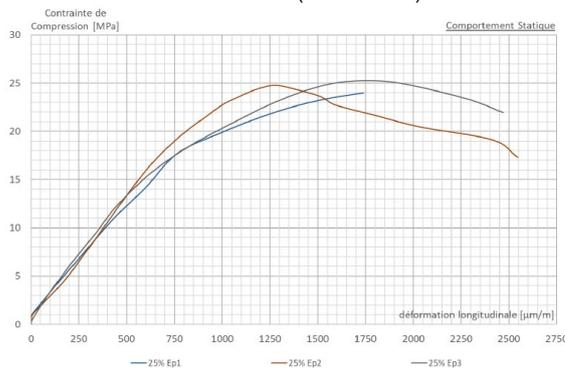


Figure 5 - Courbe contrainte-déformation du béton à 25% de GR

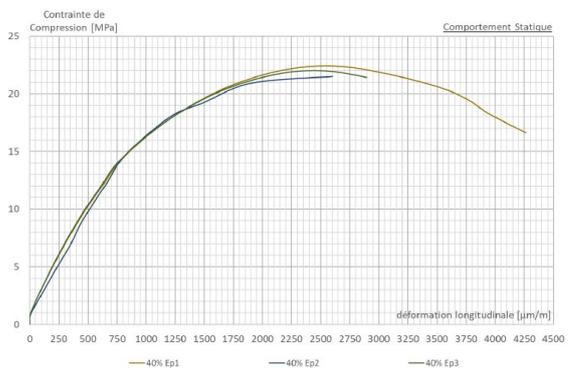


Figure 6 - Courbe contrainte-déformation du béton à 40% de GR

On constate une augmentation de la ductilité avec le pourcentage de granulats recyclés avec des déformations ultimes à rupture (ϵ_{cu}) plus importantes pour 40% ($2.7\% \leq \epsilon_{cu} \leq 4.2\%$) que pour le granulat naturel de référence ($\epsilon_{cu} \leq 2\%$). Globalement, le comportement post-pic des bétons avec des granulats recyclés s'améliore avec l'augmentation du pourcentage de granulats recyclés. D'après le projet RECYBETON, la raison technique de l'augmentation de cette ductilité est liée à l'augmentation du volume total de pâte cimentaire (la nouvelle pâte vient s'ajouter à la quantité de pâte résiduelle présente à l'interface du granulat naturel initial).

2.4.1.2. Essais cycliques

À la suite des résultats des essais monotones, de nouveaux essais cycliques ont été réalisés à 4 niveaux de déformation constante indiqués dans le tableau ci-dessous (3 éprouvettes testées par niveau de déformation pour chaque formulation).

Le Tableau 4 résume les résultats des essais cycliques, en termes de nombre de cycles supportés par les éprouvettes pour les 4 niveaux de déformation fixés.

% GR	Niveaux de déformation	Valeurs au palier (µm/m)	Nb d'éprouvettes	Rupture prématurée ou après les 10 cycles
0%	N1	750	3	Rupture après les 10 cycles
	N2	1250	3	Rupture après les 10 cycles
	N3	1800	3	Rupture après les 10 cycles
	N4	2000	3	Rupture prématurée
15%	N1	750	3	Rupture après les 10 cycles
	N2	1250	3	Rupture après les 10 cycles
	N3	1800	3	Rupture après les 10 cycles
	N4	2000	3	Rupture prématurée
25%	N1	750	3	Rupture après les 10 cycles
	N2	1250	3	Rupture après les 10 cycles
	N3	1800	3	Rupture après les 10 cycles
	N4	2000	3	Rupture prématurée
40%	N1	1000	3	Rupture après les 10 cycles
	N2	1650	3	Rupture après les 10 cycles
	N3	2000	3	Rupture après les 10 cycles
	N4	2500	3	Rupture prématurée

Tableau 4 - Nombre de cycles supportés par les éprouvettes en béton C25/30 à différents niveaux de déformation imposés (février 2022)

Toutes les formulations ont subi les 3 premiers niveaux de déformation composés de 10 cycles de chargement, sans rupture prématurée, et aucune éprouvette n'a pu subir les 10 cycles du 4^{ème} niveau.

Les Figure 7 à Figure 9 suivantes présentent l'évolution de la contrainte à rupture en compression, du module élastique en compression sur la 1^{ère} montée en charge et le module élastique en compression sur la phase de rupture (en dernier cycle atteint) en fonction du type de formulation (0%, 15%, 25% et 40%) et du niveau de chargement (niveau 1, 2, 3 et 4).

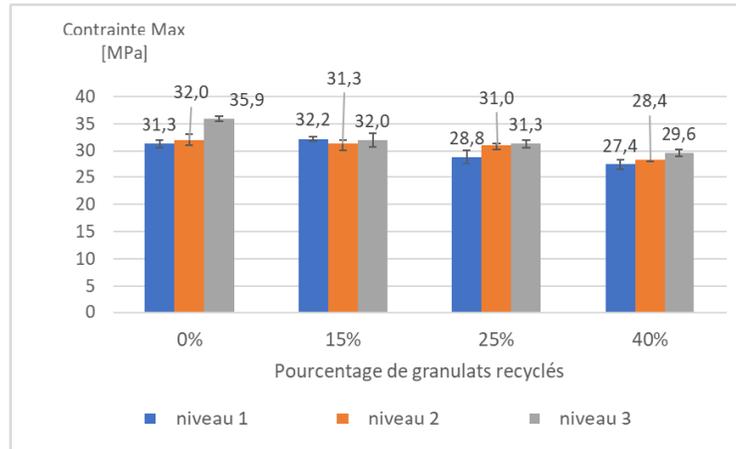


Figure 7 - Evolution de la contrainte à rupture en compression en fonction du taux de GR et des niveaux de déformation imposés

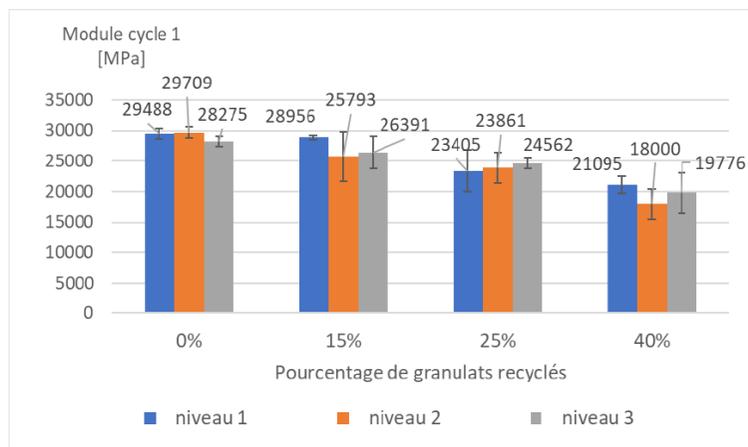


Figure 8 - Evolution du module élastique en compression (1^{ère} montée en charge) en fonction du taux de GR et des niveaux de déformation imposés

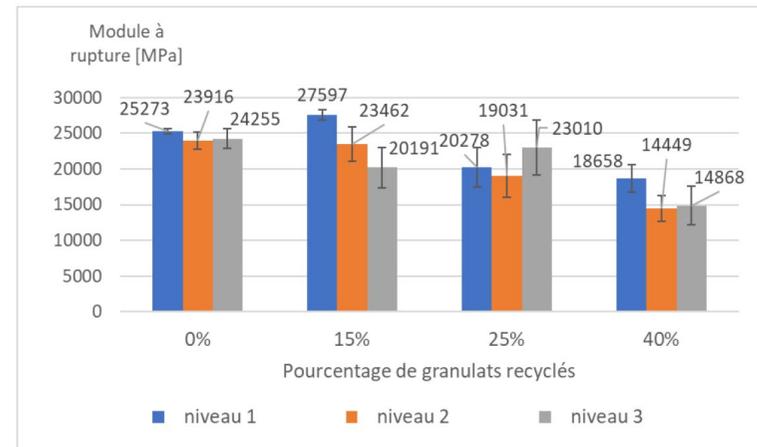


Figure 9 - Evolution du module élastique en compression (phase rupture) en fonction du taux de GR et des niveaux de déformation imposés

Globalement, le comportement sous chargement cyclique est très similaire pour les différents bétons testés. On note, toutefois, une meilleure capacité à se déformer pour les bétons de granulats recyclés avec la possibilité d'encaisser un nombre de cycles à une déformation imposée de 2‰ plus important pour 15% (rupture de l'éprouvette au bout de 5 cycles en moyenne), 25% (rupture de l'éprouvette au bout de 9 cycles en moyenne) et 40% de granulats recyclés (pas de rupture pour les 10 cycles) que pour 0% (rupture au bout de 4 cycles en moyenne).

La Figure 11 illustre le 3^{ème} niveau de déformation imposé (2‰) sur les éprouvettes avec 40% de granulats recyclés. On constate la possibilité d'atteindre des niveaux de déformation à rupture (c'est-à-dire après l'application des 10 cycles de charge/décharge) de 4‰ lors de la dernière montée en charge monotone. Ce niveau de déformation ultime est très similaire à celui obtenu avec le chargement monotone démontrant que les cycles n'ont pas eu d'influence négative sur les propriétés mécaniques des bétons de granulats recyclés. Il est également supérieur à la limite normative ϵ_{cu} de 3.5‰ de la NF EN 1992-1-1 utilisée pour le dimensionnement d'une section en béton armé. En comparaison, l'intensité du 3^{ème} niveau de déformation imposée sur les éprouvettes réalisées avec le béton de référence (sans granulats recyclés) a dû être réduit à 1.8‰ pour permettre l'application des 10 cycles de charge/décharge sans rupture. De plus, le niveau des déformations à rupture se situe entre 2.25 ‰ et 2.5 ‰ et est également plus faible que pour les éprouvettes avec 40%.

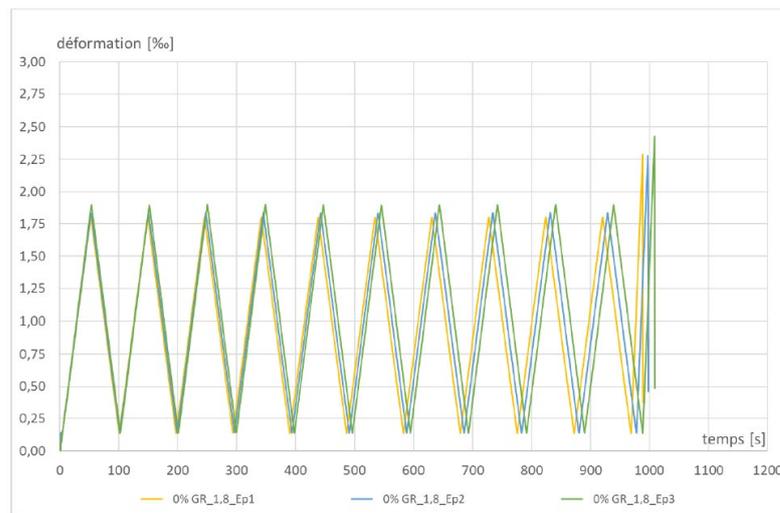


Figure 10 - Courbe $\epsilon = f(t)$ pour les 3 éprouvettes "Granulats recyclés = 0%" pour $\epsilon = 1,80‰$

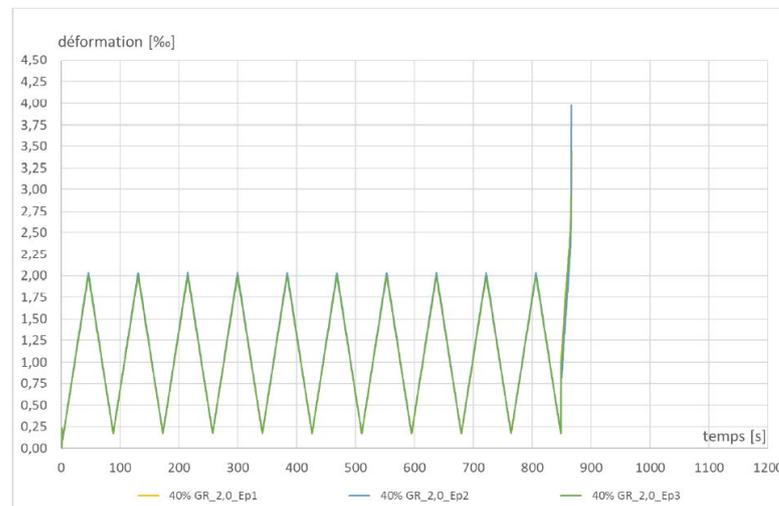


Figure 11 - Courbe $\epsilon = f(t)$ pour les 3 éprouvettes "Granulats recyclés = 40%" pour $\epsilon = 2,00‰$

2.4.2. Béton C35/45 (Avril 2023)

2.4.2.1. Essais monotones (chargement statique)

Le Tableau 5 présente un résumé des essais de compression monotone, indiquant les valeurs moyennes de la contrainte ultime $\sigma_{ult,moyen}$ et le module d'élasticité $E_{cm,moyen}$.

% GR	0%	15%	25%	40%
$\sigma_{ult,moyen}$ [MPa]	42,4 ± 0,9	42,5 ± 2,4	40,3 ± 0,8	39,8 ± 1,3
$E_{cm,moyen}$ [MPa]	30 826 ± 933	30948 ± 2197	27513 ± 1785	28219 ± 453

Tableau 5 - Résultats moyens des essais de compression monotones sur des éprouvettes en béton C35/45 à différents pourcentages de GR

La Figure 12 présente l'ensemble des 12 courbes de contrainte en fonction de la déformation, obtenues à partir des 12 essais de compression monotones sur des éprouvettes C35/45 avec les 4 pourcentages de granulats recyclés (0%, 15%, 25% et 40%).

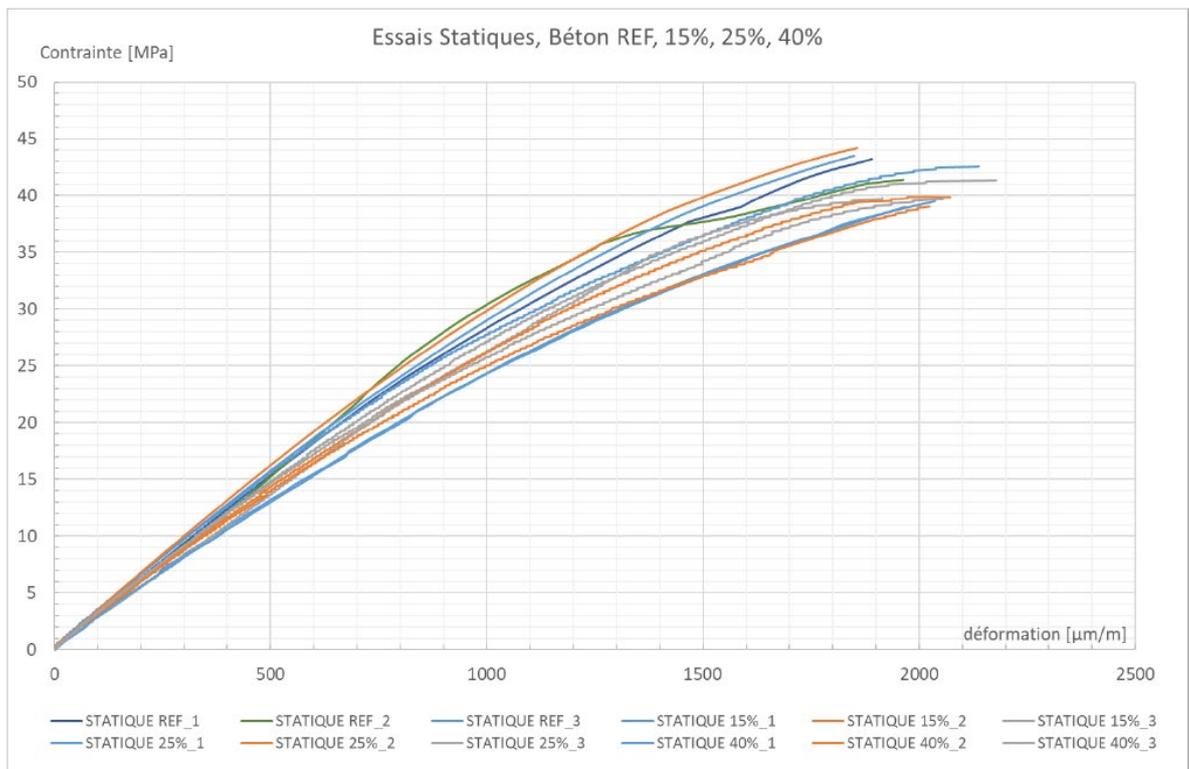


Figure 12 - Courbe contrainte-déformation du béton C35/45 à différents pourcentages de GR

Comme le montre la Figure 12, les courbes contrainte-déformation sont tronquées dans leur partie post-pic, indiquant ainsi un comportement « fragile ». Cela est dû à une erreur de pilotage pendant l'essai avec un pilotage réalisé par le laboratoire en force plutôt qu'en déplacement. Lorsque le déplacement est contrôlé, il est possible de réduire la charge appliquée lorsque le matériau entre dans la phase post-pic. Cela permet ainsi de tracer l'ensemble de la courbe contrainte-déformation, y compris la partie post-pic, montrant ainsi un comportement plus ductile plus représentatif de celui indiqué sur la figure 1. En revanche, dans un pilotage en force, l'augmentation de la déformation sans une diminution correspondante de la force conduit à une rupture brusque, donnant l'impression d'un comportement fragile du matériau.

2.4.2.2. Essais cycliques

À la suite des résultats des essais monotones, de nouveaux essais cycliques ont été réalisés à 4 niveaux de déformation constante indiqués dans le Tableau 6 (3 éprouvettes testées par niveau de déformation pour chaque formulation).

Le Tableau 6 résume les résultats des essais cycliques, en termes de nombre de cycles supportés par les éprouvettes pour les 4 niveaux de déformation fixés.

% GR	Niveaux	Valeurs au palier (µm/m)	Nb d'éprouvettes	Rupture prématurée ou après les 10 cycles
0%	N1	979	3	Rupture après les 10 cycles
	N2	1567	3	Rupture après les 10 cycles
	N3	1750	3	Rupture après les 10 cycles
	N4	1900	1	Rupture après les 10 cycles
		2000	2	Rupture prématurée
15%	N1	831	3	Rupture après les 10 cycles
	N2	1567	3	Rupture après les 10 cycles
	N3	1750	3	Rupture après les 10 cycles
	N4	1900	1	Rupture après les 10 cycles
		1950	1	Rupture après les 10 cycles
		1950	1	Rupture prématurée
25%	N1	979	3	Rupture après les 10 cycles
	N2	1567	3	Rupture après les 10 cycles
	N3	1750	3	Rupture prématurée → annulation des essais au 4 ^{ème} niveau de déformation imposé N4.
40%	N1	1008	3	Rupture après les 10 cycles
	N2	1612	3	Rupture après les 10 cycles
	N3	1750	3	Rupture après les 10 cycles
	N4	1900	1	Rupture après les 10 cycles
		2000	1	Rupture prématurée
		1950	1	Rupture prématurée

Tableau 6 - Nombre de cycles supportés par les éprouvettes en béton C35/45 à différents niveaux de déformation imposés (avril 2023)

Toutes les formulations ont subi les 3 premiers niveaux de déformation composés de 10 cycles de chargement, hormis la formulation avec 25% de granulats recyclés où une éprouvette n'a pas dépassé la première montée en charge.

Les Figure 13 à Figure 15 présentent l'évolution de la contrainte à rupture en compression, du module élastique en compression sur la 1^{ère} montée en charge et le module élastique en compression sur la phase de rupture (en dernier cycle atteint) en fonction du type de formulation (0%, 15%, 25% et 40%) et du niveau de chargement (niveau 1, 2, 3 et 4).

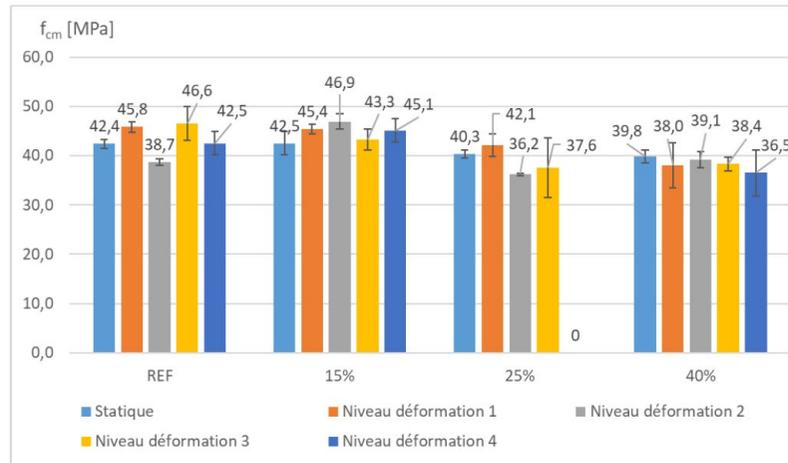


Figure 13 - Evolution de la contrainte à rupture en compression en fonction du taux de GR et des niveaux de déformation imposés

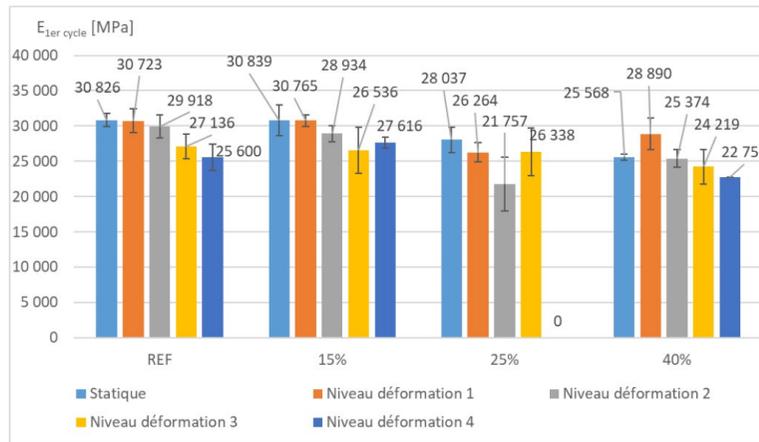


Figure 14 - Evolution du module élastique en compression (1^{ère} montée en charge) en fonction du taux de GR et des niveaux de déformation imposés

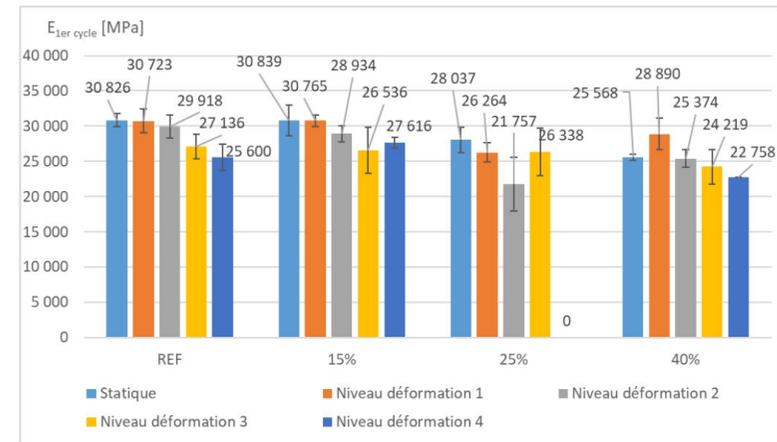


Figure 15 - Evolution du module élastique en compression (phase rupture) en fonction du taux de GR et des niveaux de déformation imposés

Le comportement sous chargement cyclique pour les niveaux de déformation entre 0 et ϵ_{c1} (N1, N2 et N3) ne montre pas de différence entre le béton de référence (avec 0% de granulats recyclés) et les bétons de granulats recyclés (15%, 25% et 40% de GR) pour la classe de résistance C35/45.

Les essais monotones sur les bétons C35/45, ayant été pilotés en force plutôt qu'en déplacement, ont conduit à un comportement fragile des corps d'épreuve, empêchant ainsi une analyse adéquate de la ductilité du béton pour différentes formulations. Il a donc été décidé de reprendre les essais monotones et cycliques en déplacement imposé, mais uniquement sur les bétons C35/45 contenant 0% et 40% de granulats recyclés pour limiter le nombre d'éprouvettes à refaire.

2.4.3. Béton C35/45 (Février 2024 – nouvelle campagne)

2.4.3.1. Essais monotones (chargement statique)

Le Tableau 7 présente un résumé des essais de compression monotone (pilotés en déplacement) réalisés sur 2 éprouvettes pour chaque formulation, indiquant les valeurs moyennes de la contrainte ultime $\sigma_{ult,moyen}$ et le module d'élasticité $E_{cm,moyen}$.

% GR	0%	40%
$\sigma_{ult,moyen}$ [MPa]	43,8 ± 1,1	47,4 ± 1,2
$E_{cm,moyen}$ [MPa]	31 000 ± 2453	28 749 ± 1234

Tableau 7 - Valeurs moyennes des résultats des essais de compression monotones sur des éprouvettes en béton C35/45 à 0% et 40% de GR

Les Figure 16 et Figure 17 présentent l'ensemble des courbes de contrainte en fonction de la déformation, obtenues à partir des 4 essais de compression monotones sur des éprouvettes C35/45 avec les 2 pourcentages de granulats recyclés (0% et 40%).

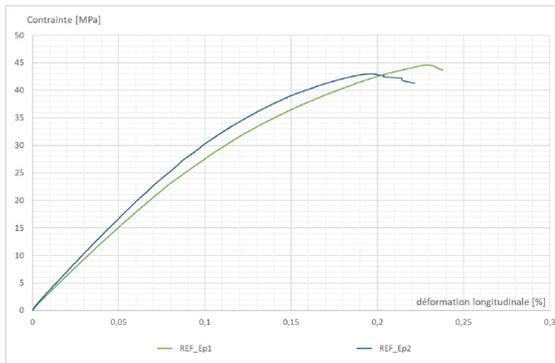


Figure 16 - Courbes contrainte-déformation pour les 2 éprouvettes "béton C35/45 – 0% GR" testées en statique

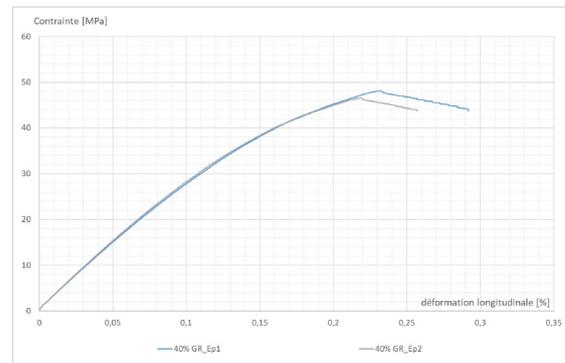


Figure 17 - Courbes contrainte-déformation pour les 2 éprouvettes "béton C35/45 – 40% GR" testées en statique

On constate pour des bétons de classe de résistance visée C35/45 une légère augmentation de la ductilité avec le pourcentage de granulats recyclés avec des déformations ultimes à rupture (mesurées post-pic) plus importantes pour 40% ($2.5‰ \leq \epsilon_{cu} \leq 3‰$) que pour le granulat naturel de référence ($\epsilon_{cu} \leq 2.5‰$). Globalement, le comportement post-pic des bétons avec des granulats recyclés s'améliore avec l'augmentation du pourcentage de granulats recyclés pour les 2 classes de résistances testées dans cette étude. A noter que compte tenu des fortes valeurs de résistance en compression obtenues sur les éprouvettes (47.4 MPa), la classe de résistance testée est en réalité plus représentative d'un C40/50 que d'un C35/45.

2.4.3.2. Essais cycliques

À la suite des résultats des essais monotones de nouveaux essais cycliques (pilotes en déplacement) ont été réalisés à 3 niveaux de déformation constante (N2, N3 et N4) comme indiqués dans le Tableau 8 (1 éprouvette testée par niveau de déformation pour chaque formulation).

Le Tableau 8 résume les résultats des essais cycliques, en termes de nombre de cycles supportés par les éprouvettes pour les 4 niveaux de déformation fixés.

% GR	Niveaux	Valeurs au palier ($\mu\text{m/m}$)	Nb d'éprouvettes	Rupture prématurée ou après les 10 cycles
0%	N2	1600	1	Rupture après les 10 cycles
	N3	2000	1	Rupture prématurée → annulation des essais au 4 ^{ème} niveau de déformation imposé N4.
40%	N2	1600	1	Rupture après les 10 cycles
	N3	2000	1	Rupture après les 10 cycles
	N4	2100	1	Rupture après les 10 cycles

Tableau 8 - Nombre de cycles supportés par les éprouvettes en béton C35/45 à différents niveaux de déformation imposés (février 2024)

Les Figure 18 à Figure 20 présentent l'évolution de la contrainte à rupture en compression, du module élastique en compression sur la 1^{ère} montée en charge et le module élastique en compression sur la phase de rupture (en dernier cycle atteint) en fonction du type de formulation (0% et 40%) et du niveau de chargement (niveau 2, 3 et 4).

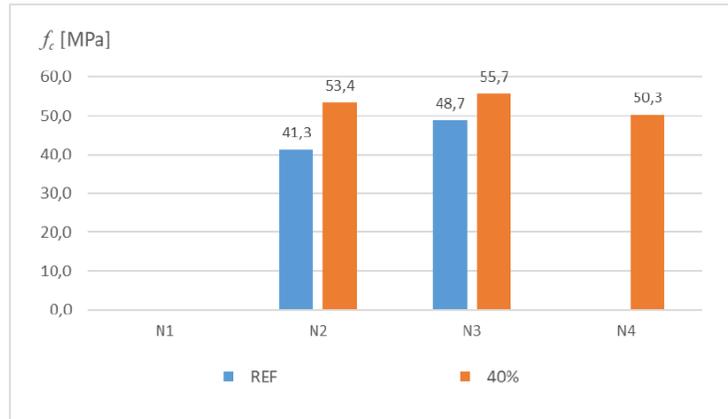


Figure 18 - Evolution de la contrainte à rupture en compression en fonction du taux de GR et des niveaux de déformation imposés

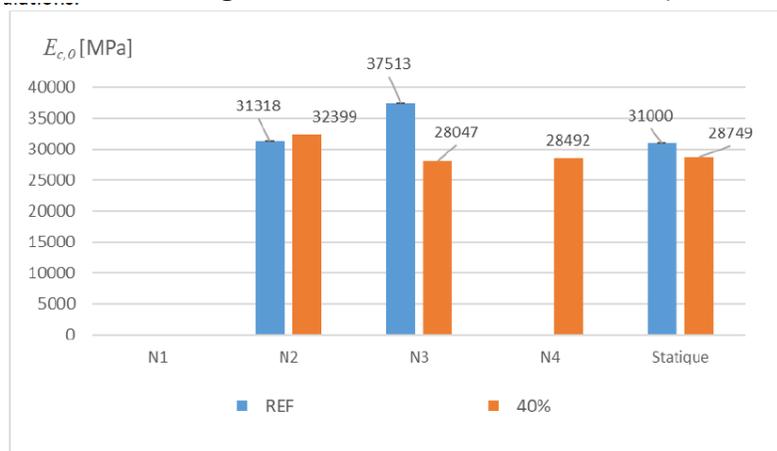


Figure 19 - Evolution du module élastique en compression (1^{ère} montée en charge) en fonction du taux de GR et des niveaux de déformation imposés

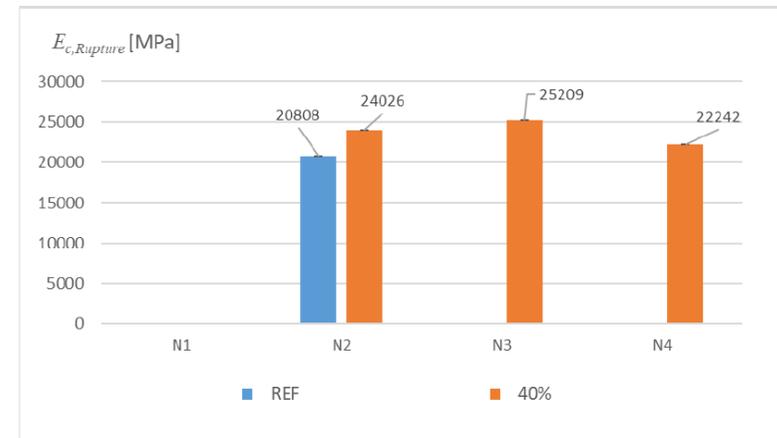


Figure 20 - Evolution du module élastique en compression (phase rupture) en fonction du taux de GR et des niveaux de déformation imposés

On note une meilleure capacité à se déformer pour le béton de granulat recyclé qui a la possibilité d'encaisser 10 cycles à une déformation imposée maximale de 2.1‰ sans rupture pour le béton avec 40% de GR (Figure 21) En comparaison, le béton de référence (sans granulats recyclés) supporte également 10 cycles sans rupture mais à un niveau de déformation maximale plus faible de 1,6 ‰ (Figure 22), et se rompt prématurément à une déformation inférieure à 2 ‰.

Comme illustré sur la Figure 21 pour ce niveau de déformation imposé (2.1‰), on constate la possibilité d'atteindre un niveau de déformation à rupture de 2.7‰ lors de la dernière montée en charge (réalisée après les 10 cycles). Ce niveau de déformation ultime est très similaire à celui obtenu avec le chargement monotone et reste supérieur au niveau de déformation obtenu (sous chargement statique ou sous chargement cyclique) pour le béton avec 0% de GR (<2.7‰). L'analyse de ces résultats démontrant que les cycles n'ont pas eu d'influence négative sur les propriétés mécaniques des bétons de granulats recyclés utilisés pour dimensionner une section en béton armé.

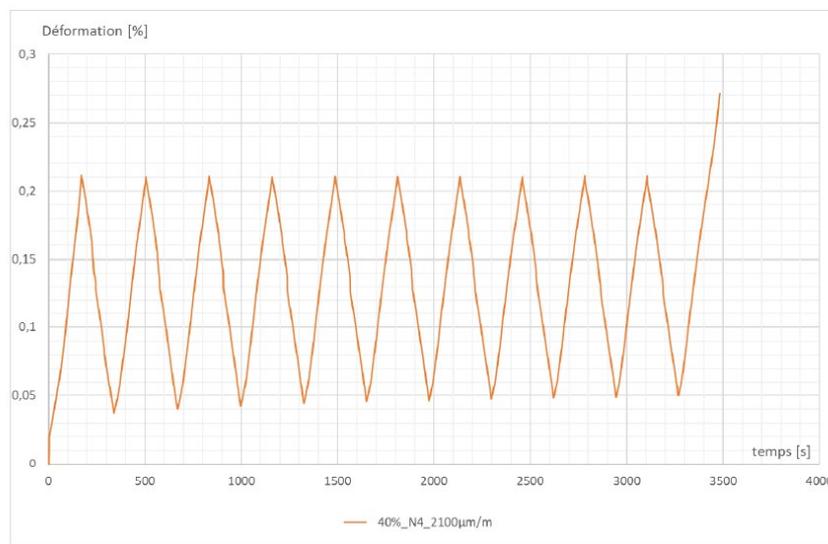


Figure 21 - Courbe $\epsilon = f(t)$ pour l'éprouvette "béton C35/45 avec 40% de GR" testée en cyclique _ N4

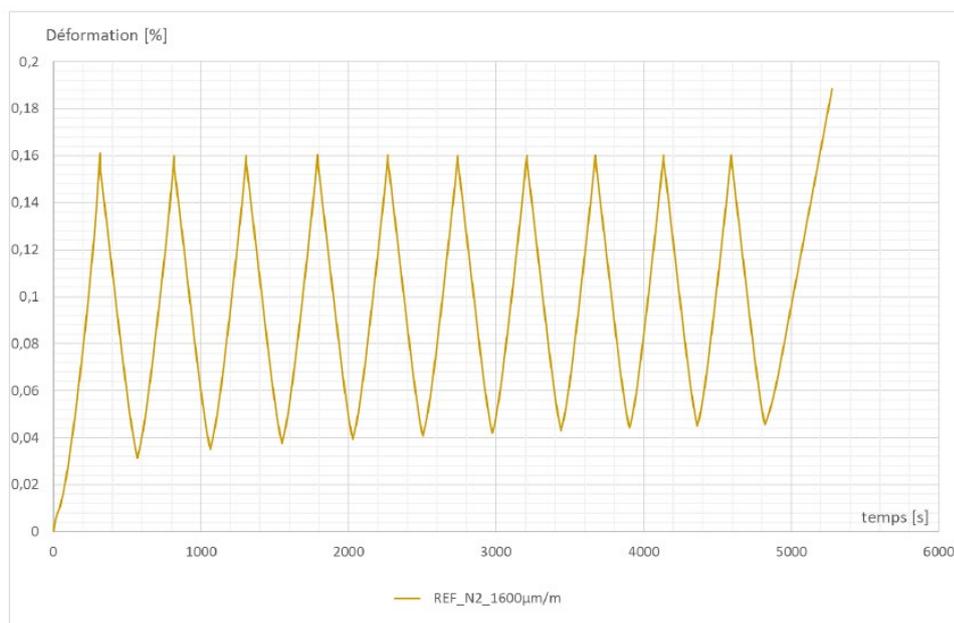
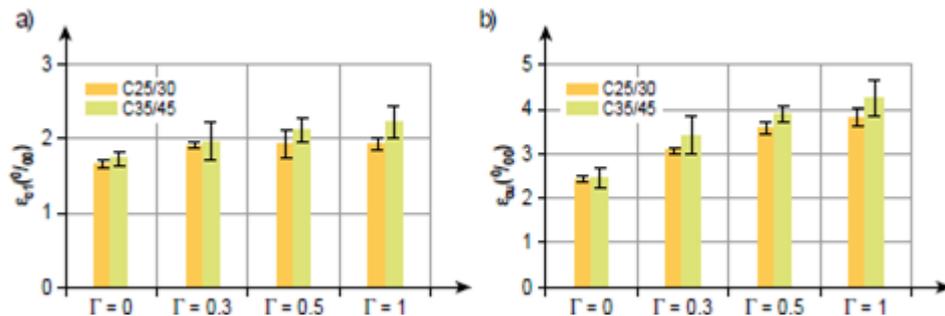


Figure 22 - Courbe $\epsilon = f(t)$ pour l'éprouvette "béton C35/45 - référence" testée en cyclique _ N2

2.4.4. Conclusion des essais statiques et monotones sur les 2 classes de béton C25/35 et C35/45

L'ensemble des différentes campagnes d'essais a permis de mettre en évidence :

- Une augmentation de la ductilité du matériaux béton avec le pourcentage de granulats recyclés sous chargement monotone (correspondant à une augmentation de la capacité de déformation post pic). Ces résultats confirment ainsi la tendance observée dans le projet RECYBETON (cf ouvrage de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018 Ouvrages Scientifiques, OSI4, 792 pages, ISBN 978-2-85782-747-4.) :



- A) Evolution de la déformation ϵ_{c1} au pic de contrainte (f_{cm}) pour différents taux de substitution pour les 2 classes de résistance visées ;
- B) Evolution de la déformation ultime ϵ_{cu1} à la rupture pour différents taux de substitution pour les 2 classes de résistance visées.

L'ensemble de ces essais comparatifs a permis de vérifier ainsi l'existence d'une ductilité suffisante du béton de granulats recyclés conformément aux prescriptions du paragraphe 5.2.3.4.c) de la NF EN 1998-1 qui indique qu'il convient que le béton utilisé dans les éléments sismiques primaires possède une résistance à la compression appropriée et une déformation à rupture ϵ_{cu1} qui dépasse avec une marge adéquate la déformation correspondante à la résistance à la compression maximale ϵ_{c1} . Le tableau 3.1 de NF EN 1992-1-1 donne les caractéristiques de résistance et de déformation attendues pour les bétons de référence.

- La comparaison des différents niveaux de déformation maximale imposés aux différentes éprouvettes pour les 10 cycles, l'absence de perte de résistance obtenue à la rupture pour le niveau de déformation maximale imposé pour les 10 cycles et le niveau de déformation ϵ_{cu} similaire entre les essais sous chargement statique et cyclique permettent de valider un comportement légèrement meilleur du matériau béton avec des granulats recyclés et son aptitude à être utilisé pour concevoir des ouvrages en zone sismique.
- Compte tenu d'une résistance en compression plus élevée (≈ 48 MPa) mesurée sur les éprouvettes de classe visée C35/45, les conclusions ci-dessus sont également applicables sur la classe C40/50.
- Pour le domaine d'emploi défini par les différentes campagnes d'essais (classe de résistance $\leq C40/50$ et pourcentage de GR $\leq 40\%$), l'utilisation de la norme EN1998-1-1 pour dimensionner en zone sismique un ouvrage réalisé avec des granulats recyclés ne semble donc pas poser de problème à condition de prendre en compte les caractéristiques mécaniques spécifiques de ces bétons telles que le module d'élasticité, et de respecter les limites fixées par la commission BNTRA EC2 dans la NF EN 1992-1-1/NA/A1.

3. Essais Pull-out monotones et cycliques

Dans le contexte de l'utilisation de béton de granulats recyclés en zones sismiques, il est également crucial de vérifier aussi l'ancrage des aciers pour assurer la sécurité et la durabilité des structures. Les essais de type Pull-out monotones et cycliques sont essentiels pour évaluer cette caractéristique. Ces tests permettent de mesurer la force d'adhérence entre l'acier et le béton sous des charges statiques et dynamiques, reproduisant ainsi les conditions réelles de sollicitations sismiques. En effectuant ces essais, on peut déterminer si le béton de granulats recyclés offre une performance comparable à celle du béton normal (béton de granulats courants), notamment en ce qui concerne la résistance à l'arrachement et la capacité à supporter les cycles de chargement sismique.

3.1. Protocole des essais Pull-out monotones et cycliques

Les essais Pull-out sont réalisés au CERIB selon l'annexe D de la norme NF EN 10080 « Aciers soudables pour béton armé » les 04, 05, 06, 07 et 08/03/2024.

L'effort consiste à exercer un effort d'arrachement via un vérin sur l'armature HA12 scellée dans des cubes de 200 mm de côté en béton C25/30 et C35/45 à 0% et à 40% de granulats recyclés.

Le protocole d'essais se définit selon les étapes suivantes :

- **1^{ère} phase : 3 essais monotones**

Le principe de l'essai consiste à appliquer un chargement monotone croissant (pilotage manuel en force) jusqu'à la rupture de l'adhérence (glissement de la barre d'acier) ou la rupture de la barre d'acier.

A partir des essais statiques, on déduit les charges de rupture (les charges maximales atteintes).

- **2^{ème} phase : 5 essais cycliques**

A partir des valeurs des charges de rupture des essais statiques, on déduit une charge maximale $N_{\max} = 0,75 N_{u, \text{stat}}$ (avec $N_{u, \text{stat}}$ correspondant à la moyenne des efforts de rupture des 3 essais statiques).

Au total 75 essais ont été réalisés avec les efforts aux paliers, présentés dans le Tableau 9. Après la réalisation de la totalité des cycles, l'essai est mené en monotone jusqu'à la rupture du corps d'épreuve.

N/N _{max}	Durée de maintien de la charge (s)	Nombres de cycles
0,2	≈ 2 s	25
0,3	≈ 2 s	15
0,4	≈ 2 s	5
0,5	≈ 2 s	5
0,6	≈ 2 s	5
0,7	≈ 2 s	5
0,8	≈ 2 s	5
0,9	≈ 2 s	5
1	≈ 2 s	5
Somme	-	75

Tableau 9 - Nombre de cycles et valeur des efforts aux différents paliers

En parallèle des essais Pull-out, des éprouvettes Ø160 × 320 mm confectionnées avec le même béton que les corps d'épreuve sont testées en compression simple et en fendage afin d'évaluer la résistance à la compression et la résistance à la traction du béton le jour des essais. Ceci permet de s'assurer que la différence de résistance à l'arrachement des barres n'est pas imputable à une différence de résistance à la compression/traction du béton.

3.2. Instrumentation

Pour les essais statiques et cycliques, un capteur de déplacement est installé en dessous du corps d'épreuve pour suivre le déplacement de la barre d'acier et le vérin est muni d'un capteur d'effort qui enregistre l'effort appliqué durant la totalité de l'essai.

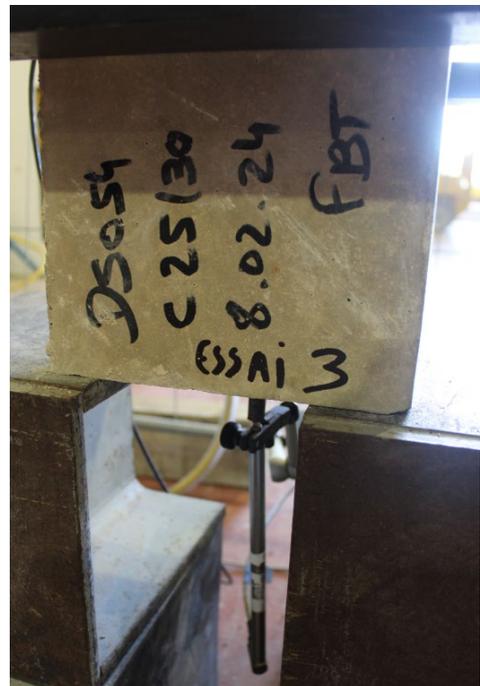


Figure 23 - Instrumentation pour les essais de Pull-out monotones et cycliques

3.3. Résultats des essais comparatifs Pull-out statiques et cycliques

3.3.1. Essais de compression et de traction par fendage

Le Tableau 10 présente les valeurs moyennes de résistance à la compression et de la résistance à la traction par fendage obtenues le jour des essais sur des éprouvettes Ø160 mm × 320 mm en béton C25/30 et C35/45 à 0% et à 40% de granulats recyclés (GR).

Béton	Résistance à la compression moyenne réelle* (MPa)	Résistance à la traction moyenne réelle (MPa)**
Béton de référence C25/30 (0% de GR)	43,7	3,1
Béton C25/30 à 40% de GR	42,6	3,0
Béton de référence C35/45 (0% de GR)	53,4	3,1
Béton C35/45 à 40% de GR	49,1	3,1

Tableau 10 - Résultats des essais de compression et de fendage sur des éprouvettes en béton C25/30 et C35/45 à 0% et 40% de GR

* Les essais de résistance à la compression sont réalisés sur 3 éprouvettes surfacées de dimension Ø160 × 320 mm pour chaque formulation.

** Les essais de résistance à la traction par fendage sont réalisés sur 3 éprouvettes de dimension Ø160 × 320 mm pour chaque formulation.

3.3.2. Essais monotones

Le Tableau 11 présente les valeurs des efforts de rupture moyennes calculées pour 3 corps d'épreuve pour chaque formulation (pour le détail des résultats, se référer au rapport d'essai n° 048393 rédigé par le CERIB).

Béton	Classe de résistance à la compression	Résistance maximale moyenne (kN)
Béton de référence (0% de GR)	C25/30	38,23
Béton à 40% de GR	C25/30	46,49
Béton de référence (0% de GR)	C35/45	47,20
Béton à 40% de GR	C35/45	57,89

Tableau 11 - Résultats des essais Pull-out statiques sur des barres HA12 ancrées dans des cubes en béton C25/30 et C35/45 à 0% et 40% de GR

Les Figure 24 à Figure 27 présentent les courbes de l'effort appliqué en fonction de temps pour des bétons C25/30 et C35/45 à 0% et à 40% de granulats recyclés. Le comportement et les courbes sont similaires pour l'ensemble des corps d'épreuve.

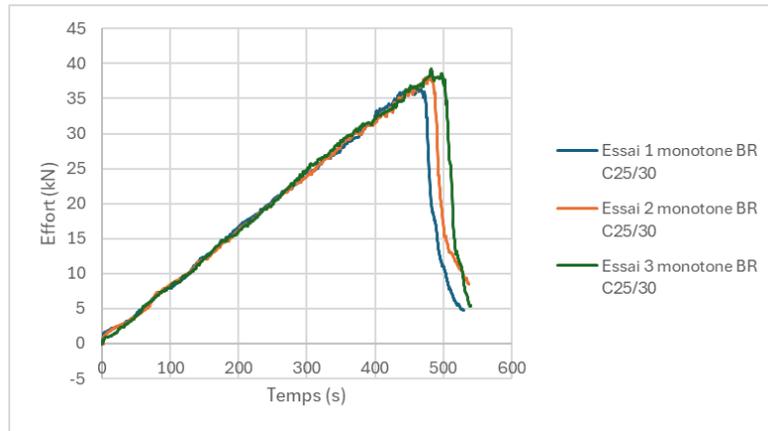


Figure 24 - Courbes de chargement monotone sur des éprouvettes en béton normal C25/30

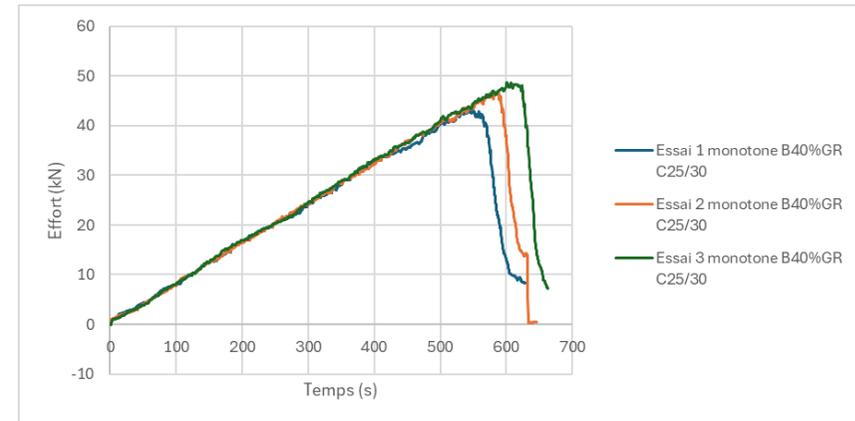


Figure 25 - Courbes de chargement monotone sur des éprouvettes en béton C25/30 à 40% de GR

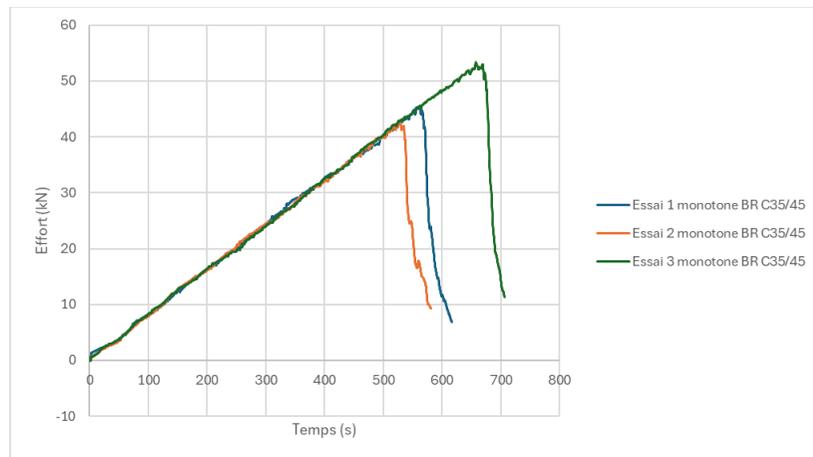


Figure 26 - Courbes de chargement monotone sur des éprouvettes en béton normal C35/45

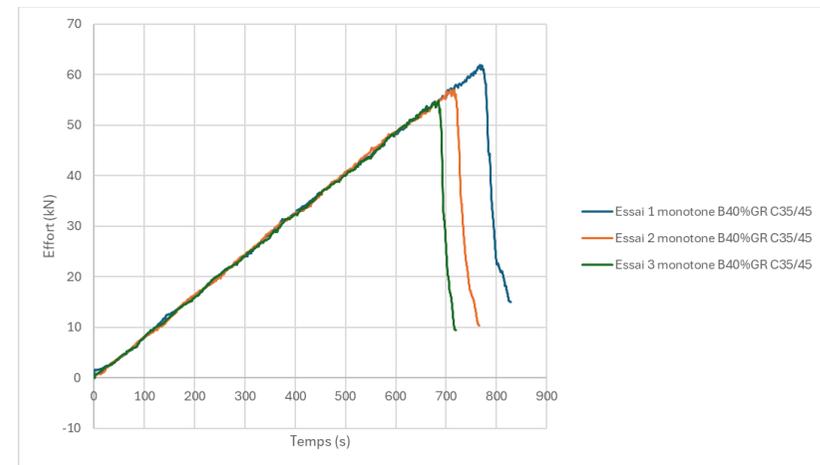


Figure 27 - Courbes de chargement monotone sur des éprouvettes en béton C35/45 à 40% de GR

3.3.3. Essais cycliques

A la suite des essais monotones, on obtient les valeurs N_{max} suivantes :

Béton C25/30		Béton C35/45	
BR	B40%GR	BR	B40%GR
28,67 kN	34,87 kN	35,40 kN	43,42 kN

Tableau 12 - Efforts N_{max} déduits des essais monotones

Les 5 essais cycliques pour chaque formulation, sont réalisés suivant les cycles décrits dans le paragraphe 3.1.

Le Tableau 13 présente les valeurs moyennes de résistance à l'arrachement pour les essais Pull-out cycliques réalisés sur du béton C25/30 et C35/45 à 0% et à 40% de granulats recyclés.

Béton	Classe de résistance à la compression	Résistance maximale moyenne $N_{max,cyc}$ (kN)	Résistance maximale moyenne corrigée $N_{max,cyc,corrigée}$ (kN)***
Béton de référence (0% de GR)	C25/30	39,14	-
Béton à 40% de GR	C25/30	51,52	53,28
Béton de référence (0% de GR)	C35/45	45,65	-
Béton à 40% de GR	C35/45	55,83	55,83

Tableau 13 - Résultats des essais Pull-out cycliques sur des barres HA12 ancrées dans des cubes en béton C25/30 et C35/45 à 0% et 40% de GR

*** La résistance à l'arrachement du béton à 40% de granulats recyclés obtenue à partir des résultats des essais Pull-out cycliques est corrigée en fonction du rapport entre la résistance en traction moyenne du béton de référence (0% de granulats recyclés) et celle du béton à 40% de granulats recyclés de même classe de résistance à la compression visée.

$$N_{max,cyc,corrigée,B40\%GR} = N_{max,cycB40\%GR} \times \frac{f_{ctm,BR}}{f_{ctm,B40\%GR}}$$

Avec :

- $\frac{f_{ctm,BR}}{f_{ctm,B40\%GR}} = 1,03$ pour les bétons C25/30 ;
- $\frac{f_{ctm,BR}}{f_{ctm,B40\%GR}} = 1$ pour les bétons C35/45.

Cette correction permet de comparer les contraintes d'adhérence entre les deux bétons d'une manière équitable en s'assurant que la différence des résistances à l'arrachement n'est pas imputable à la différence de la résistance à la traction du béton.

Les Figure 28 à Figure 31 présentent les courbes cycliques de l'effort appliqué en fonction de temps pour des bétons C25/30 et C35/45 à 0% et à 40% de granulats recyclés. Le comportement et les courbes sont similaires pour l'ensemble des corps d'épreuve. La totalité des 75 cycles est encaissée par les corps d'épreuve sans aucun endommagement et la rupture se produit à la montée monotone finale.

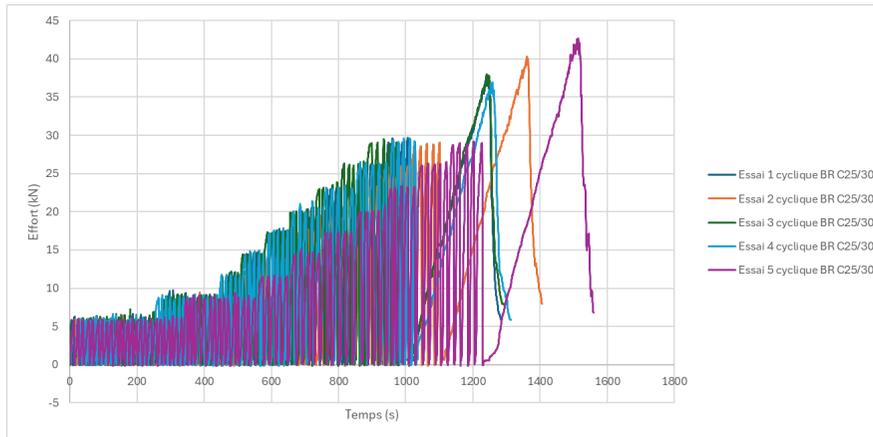


Figure 28 - Courbes de chargement cyclique sur des éprouvettes en béton normal C25/30

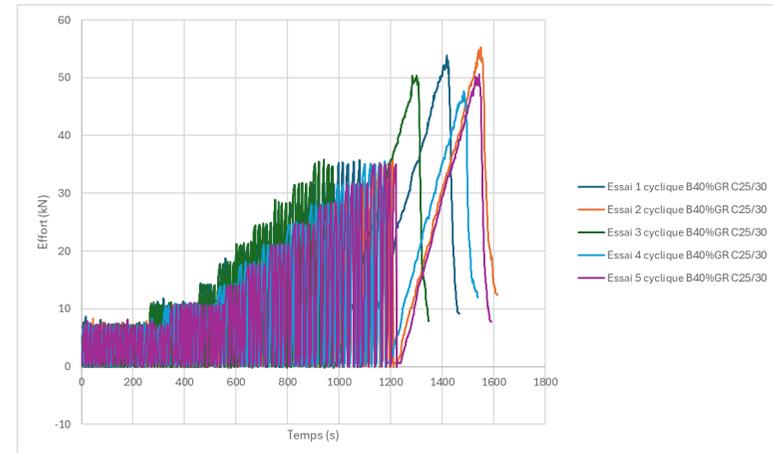


Figure 29 - Courbes de chargement cyclique sur des éprouvettes en béton C25/30 à 40% de GR

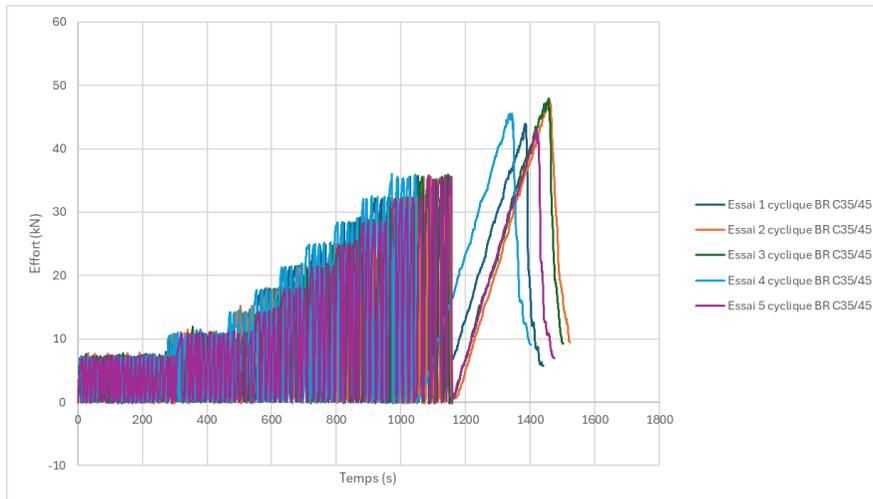


Figure 30 - Courbes de chargement cyclique sur des éprouvettes en béton normal C35/45

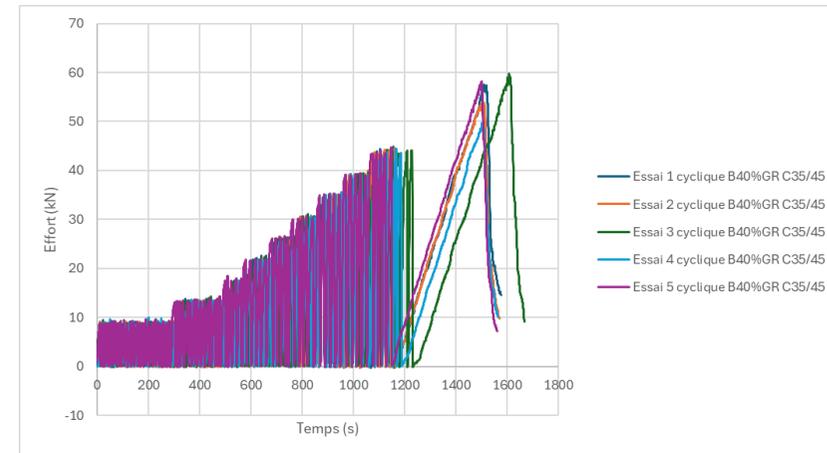


Figure 31 - Courbes de chargement cyclique sur des éprouvettes en béton C35/45 à 40% de GR

La résistance à l'arrachement de barres HA12 mm ancrées dans le béton à 40% de granulats recyclés pour les 2 classes de résistance visée C25/30 et C35/45 est en valeurs individuelles et en valeurs moyennes supérieures à celles des barres HA12 mm ancrées dans du béton de référence (0% de granulats recyclés). On constate alors une adhérence légèrement supérieure entre l'acier et le béton de granulats recyclés que celle entre l'acier et le béton de référence pour cette campagne d'essai.

La résistance maximale atteinte lors de ces essais monotones pour les deux types de béton (avec et sans granulats recyclés) et les deux résistances visées (C25/30 et C35/45) est quasiment identique à celle atteinte lors des essais cycliques avec un coefficient $\frac{F_{\max,cyc,B40\%GR}}{F_{\max,stat,B40\%GR}} \approx 1$ et $\frac{F_{\max,cyc,BR}}{F_{\max,stat,BR}} \approx 1$.

En conséquence, on conclut que le chargement cyclique n'altère pas l'adhérence entre l'acier et le béton pour les 4 types de béton testés (0% de GR C25/30 - 40% de GR C25/30 - 0% de GR C35/45 - 40% de GR C35/45).

Comme pour les essais de compression monotones et cycliques, compte tenu de la valeur élevée de la résistance du béton en compression mesurée sur les éprouvettes testées le jour des essais, les conclusions de l'étude sont applicables pour la classe C40/50.

4. Conclusion générale de l'étude

Afin de vérifier l'aptitude des bétons avec des granulats recyclés à être utilisés dans des zones sismiques et leurs conditions d'utilisation, le SG de la CN/PS "Calcul des bétons contenant des granulats recyclés en ZONE SISMIQUE » a défini une liste de justifications expérimentales minimales nécessaires à réaliser. Les essais demandés avaient pour objectif de démontrer que les règles de l'Eurocode NF EN 1998-1 « Calcul Structures Résistance Séismes – Règles générales » étaient bien applicables à ce type de matériau moyennant la prise en compte ou pas de la modification de certaines propriétés et/ou hypothèses de calcul.

En conclusion, les résultats des essais comparatifs de compression monotones et cycliques démontrent de manière positive que les performances des bétons avec des granulats recyclés sont légèrement meilleures par rapport à celles obtenues pour le béton normal de référence. Pour les classes de résistance C25/30 et C40/50 testées, les bétons réalisés avec des granulats recyclés présentent des comportements plus ou moins similaires à ceux des bétons normaux de référence (béton de granulats courants) en termes de résistance aux sollicitations sismiques. De plus, les essais de compression monotones ont révélé que le béton de granulats recyclés possède une meilleure ductilité que le béton de référence, comme en témoigne un plateau post-pic plus important sur la courbe effort-déplacement. Ces résultats confirment ainsi la tendance observée dans le projet RECYBETON (cf ouvrage de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018 Ouvrages Scientifiques, OSI4, 792 pages, ISBN 978-2-85782-747-4.). L'ensemble de ces essais comparatifs a donc permis de vérifier la conformité des bétons de granulats recyclés testés avec les prescriptions du paragraphe 5.2.3.4.c) de la NF EN 1998-1 qui indique qu'il convient que le béton utilisé dans les éléments sismiques primaires possède une résistance à la compression appropriée et une déformation à rupture ϵ_{cu1} qui dépasse avec une marge adéquate la déformation correspondante à la résistance à la compression maximale ϵ_{c1} .

Les essais comparatifs de type Pull-out indiquent également que l'utilisation de granulats recyclés n'affecte pas négativement l'adhérence entre le béton et l'acier aussi bien sous chargement statique que sous chargement cyclique. L'adhérence entre le béton avec des granulats recyclés et l'acier n'est pas altérée par l'application de différents cycles de chargement et les valeurs des contraintes d'adhérence maximales mesurées à rupture sont identiques à celles mesurées pour le béton normal de référence (béton de granulats courants).

Ces différentes justifications ont donc permis d'écarter, pour les bétons testés avec des granulats recyclés, la suspicion d'un comportement anormal pour une utilisation en zone sismique et évitent, ainsi, l'introduction de limites complémentaires autres que celles déjà introduites dans l'annexe nationale NF EN 1992-1-1/NA/A1 par la commission BNTRA pour dimensionnement un ouvrage réalisé avec des granulats recyclés.

Sur la base de ce constat, une proposition de note de synthèse a alors été rédigée en juin 2024 pour reprendre la conclusion technique indiquée ci-dessus et synthétiser l'ensemble du travail d'analyse réalisé au sein du SG/CNPS :

« L'Eurocode 8 (NF EN 1998-1 et son annexe nationale et NF EN 1998-2 et son annexe nationale) est utilisable pour dimensionner, en zone sismique, un ouvrage réalisé avec des bétons de granulats recyclés de classe de résistance maximale C40/50 avec un taux maximal de substitution en granulats recyclés de type 1 de 40% sans exigence supplémentaire que celles indiquées dans la NF EN 1992-1-1/NA/A1. »

Un retour des travaux réalisés par le SG/CNPS sera fait en commission plénière le 18 septembre 2024. Sous réserve d'une validation par la commission plénière, cette note pourrait être alors introduite dans les annexes nationales (AN) des prochaines normes NF EN 1998-1 (Bâtiment) et NF EN 1998-2 (Ponts) en cours de révision.

Bibliographie

- [1] Rapport n° RE_048393-A rédigé par le CERIB sur les essais Pull-out sur les bétons C25/30 et C35/45 à 0% et 40% de granulats recyclés (avril 2024).
- [2] Rapport rédigé par LMC² de l'université Claude Bernard Lyon 1 sur les essais de compression statiques et cycliques sur le béton C25/30 sans et avec granulats recyclés (version 2, février 2022).
- [3] Rapport rédigé par LMC² de l'université Claude Bernard Lyon 1 sur les essais de compression statiques et cycliques sur le béton C35/45 (version 3, avril 2023).
- [4] Rapport des essais de compression statiques et cycliques sur le béton C35/45 rédigé par LMC² de l'université Claude Bernard Lyon 1 (version 1, février 2024).
- [5] Livre de Recybéton cf ouvrage de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018 Ouvrages Scientifiques, OSI4, 792 pages, ISBN 978-2-85782-747-4.).
- [6] AFNOR CN-PS_N644 SOUS-GROUPE CN/PS "Calcul des bétons contenant des granulats recyclés en ZONE SISMIQUE" (2023-08-31).pdf.
- [7] AFNOR CN PS_N647_Présentation Matthieu SCALLIET (ESSAIS SISMIQUES).pdf
- [8] AFNOR N483_CEN/TC 250/SC 8 Lettre AFNOR (2021-04-27) Bétons Granulats recyclés.pdf.

Index des figures

Figure 1 - Courbe contrainte déformation type d'un béton à 0% de granulats recyclés (l'Eurocode 1992-1-1, Paragraphe 3.1.5, figure 3.2)	7
Figure 2 - Instrumentation pour les essais de compression monotones et cycliques	8
Figure 3 - Courbe contrainte-déformation du béton de référence (0% de GR)	10
Figure 4 - Courbe contrainte-déformation du béton à 15% de GR	10
Figure 5 - Courbe contrainte-déformation du béton à 25% de GR	10
Figure 6 - Courbe contrainte-déformation du béton à 40% de GR	10
Figure 7 - Evolution de la contrainte à rupture en compression en fonction du taux de GR et des niveaux de déformation imposés.....	12
Figure 8 - Evolution du module élastique en compression (1 ^{ère} montée en charge) en fonction du taux de GR et des niveaux de déformation imposés	12
Figure 9 - Evolution du module élastique en compression (phase rupture) en fonction du taux de GR et des niveaux de déformation imposés.....	12
Figure 10 - Courbe $\epsilon = f(t)$ pour les 3 éprouvettes "Granulats recyclés = 0%" pour $\epsilon = 1,80\%$	13
Figure 11 - Courbe $\epsilon = f(t)$ pour les 3 éprouvettes "Granulats recyclés = 40%" pour $\epsilon = 2,00\%$	13
Figure 12 - Courbe contrainte-déformation du béton C35/45 à différents pourcentages de GR.....	14
Figure 13 - Evolution de la contrainte à rupture en compression en fonction du taux de GR et des niveaux de déformation imposés	16
Figure 14 - Evolution du module élastique en compression (1 ^{ère} montée en charge) en fonction du taux de GR et des niveaux de déformation imposés	16
Figure 15 - Evolution du module élastique en compression (phase rupture) en fonction du taux de GR et des niveaux de déformation imposés.....	16
Figure 16 - Courbes contrainte-déformation pour les 2 éprouvettes "béton C35/45 - 0% GR" testées en statique	17
Figure 17 - Courbes contrainte-déformation pour les 2 éprouvettes "béton C35/45 - 40% GR" testées en statique	17
Figure 18 - Evolution de la contrainte à rupture en compression en fonction du taux de GR et des niveaux de déformation imposés	19
Figure 19 - Evolution du module élastique en compression (1 ^{ère} montée en charge) en fonction du taux de GR et des niveaux de déformation imposés	19
Figure 20 - Evolution du module élastique en compression (phase rupture) en fonction du taux de GR et des niveaux de déformation imposés.....	19
Figure 21 - Courbe $\epsilon = f(t)$ pour l'éprouvette "béton C35/45 avec 40% de GR" testée en cyclique _ N4.....	20
Figure 22 - Courbe $\epsilon = f(t)$ pour l'éprouvette "béton C35/45 - référence" testée en cyclique _ N2	20
Figure 23 - Instrumentation pour les essais de Pull-out monotones et cycliques	23
Figure 24 - Courbes de chargement monotone sur des éprouvettes en béton normal C25/30.....	25
Figure 25 - Courbes de chargement monotone sur des éprouvettes en béton C25/30 à 40% de GR.....	25
Figure 26 - Courbes de chargement monotone sur des éprouvettes en béton normal C35/45.....	25
Figure 27 - Courbes de chargement monotone sur des éprouvettes en béton C35/45 à 40% de GR.....	25
Figure 28 - Courbes de chargement cyclique sur des éprouvettes en béton normal C25/30	27
Figure 29 - Courbes de chargement cyclique sur des éprouvettes en béton C25/30 à 40% de GR	27
Figure 30 - Courbes de chargement cyclique sur des éprouvettes en béton normal C35/45	27
Figure 31 - Courbes de chargement cyclique sur des éprouvettes en béton C35/45 à 40% de GR	27

Index des tableaux

Tableau 1 - Programme des essais de compression monotones et cycliques	8
Tableau 2 - Ensemble des campagnes d'essais de compression	9
Tableau 3 - Résultats moyens des essais de compression monotones sur des éprouvettes en béton C25/30 à différents pourcentages de GR.....	9
Tableau 4 - Nombre de cycles supportés par les éprouvettes en béton C25/30 à différents niveaux de déformation imposés (février 2022)	11
Tableau 5 - Résultats moyens des essais de compression monotones sur des éprouvettes en béton C35/45 à différents pourcentages de GR.....	14
Tableau 6 - Nombre de cycles supportés par les éprouvettes en béton C35/45 à différents niveaux de déformation imposés (avril 2023).....	15
Tableau 7 - Valeurs moyennes des résultats des essais de compression monotones sur des éprouvettes en béton C35/45 à 0% et 40% de GR.....	17
Tableau 8 - Nombre de cycles supportés par les éprouvettes en béton C35/45 à différents niveaux de déformation imposés (février 2024)	18
Tableau 9 - Nombre de cycles et valeur des efforts aux différents paliers	23
Tableau 10 - Résultats des essais de compression et de fendage sur des éprouvettes en béton C25/30 et C35/45 à 0% et 40% de GR	24
Tableau 11 - Résultats des essais Pull-out statiques sur des barres HA12 ancrées dans des cubes en béton C25/30 et C35/45 à 0% et 40% de GR.....	24
Tableau 12 - Efforts N_{max} déduits des essais monotones	26
Tableau 13 - Résultats des essais Pull-out cycliques sur des barres HA12 ancrées dans des cubes en béton C25/30 et C35/45 à 0% et 40% de GR.....	26

RAPPORT

ÉTUDES ET RECHERCHES

DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES

MERYEM BOUMEDIENE
MATTHIEU SCALLIET



/ Cerib - CS 10010
28233 Épernon cedex

/ 02 37 18 48 00
cerib@cerib.com

JUSTIFICATION DE L'APPLICABILITÉ DE L'EUROCODE 8 POUR DIMENSIONNER EN ZONE SISMIQUE UN OUVRAGE RÉALISÉ AVEC DES BÉTONS DE GRANULATS RECYCLÉS

Afin de vérifier l'aptitude des bétons incorporant des granulats recyclés à être utilisés dans des zones sismiques et leurs conditions d'utilisation, le SG de la CN/PS «Calcul des bétons contenant des granulats recyclés en ZONE SISMIQUE » a défini une liste de justifications expérimentales minimales nécessaires à réaliser :

- Essais comparatifs de compression monotones et cycliques sur des éprouvettes en béton de granulats courants et de granulats recyclés ;
- Essais pull-out comparatifs sur des barres d'acier HA ancrées dans des cubes en béton de granulats courants et de granulats recyclés.

L'analyse des résultats des essais demandés et les informations techniques disponibles dans le projet RECYBETON ont permis d'écarter, pour des bétons de classe de résistance maximale C40/50 avec un taux maximal de substitution en granulats recyclés de type 1 de 40%, la suspicion d'un comportement anormal en zone sismique et évitent, ainsi, l'introduction d'exigences supplémentaires à celles déjà indiquées dans la NF EN 1992-1-1/NA/A1 pour dimensionner un ouvrage réalisé avec des granulats recyclés.

JUSTIFICATION OF THE APPLICABILITY OF EUROCODE 8 TO DESIGN A STRUCTURE MADE WITH RECYCLED AGGREGATE CONCRETE IN A SEISMIC ZONE

To verify the suitability of the use of concretes incorporating recycled aggregates in seismic zones and their conditions of use, the General Secretariat of the CN/PS established a list of minimal experimental justifications to be conducted:

- Comparative monotonic and cyclic compression tests on concrete specimens made with conventional aggregates and recycled aggregates.
- Comparative pull-out tests on HA steel bars anchored in concrete cubes made with conventional aggregates and recycled aggregates.

The analysis of the test results and the technical information available from the RECYBETON project made it possible to rule out, for concretes with a maximum strength class of C40/50 and a maximum substitution rate of 40% of type 1 recycled aggregates, any suspicion of abnormal behavior in seismic zones. This eliminates the need for additional requirements beyond those already indicated in NF EN 1992-1-1/NA/A1 for designing a structure using recycled aggregates.