



Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE

Thème :2

Comportement du béton recyclé durci en fatigue par flexion pour utilisation routière

Auteur(s) :
Thierry Sedran
Julien Le Mouel

Organisme(s) :
Ifsttar-Centre de Nantes
Département Matériaux et Structures
Laboratoire Matériaux pour Infrastructures de transport

N° de rapport : R/16/RECY/035
N° de commande: LC/14/Recy/55
Date: 05/10/2017



RECYBETON

Projet National de recherche et développement

FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : Comportement du béton recyclé durci en fatigue par flexion pour utilisation routière

RAPPORT N° : à compléter par l'IREX

DATE D'ETABLISSEMENT : 10/10/2016

AUTEUR(S) : Thierry Sedran, Julien Le Mouel

ORGANISME(S) CHARGE(S) DE L'ACTION : Ifsttar

THEME DE RATTACHEMENT : Matériaux et Structures (n°2)

LETTRE DE COMMANDE : LC/14/Recy/55

SOMMAIRE

Résumé	3
Summary	3
1 Objectifs.....	4
2 Formulation des bétons	4
2.1 Choix des constituants.....	4
2.2 Cahier des charges des bétons	5
2.3 Formules retenues.....	5
3 Description des essais mécaniques.....	6
3.1 Résistance à la compression et module élastique.....	6
3.2 Résistance à la flexion statique et cyclique	7
4 Organisation de la campagne expérimentale	10
4.1 Protocole de pré-humidification des granulats.....	10
4.2 Malaxeur et protocole de malaxage.....	10
4.3 Répartition des gâchées	11
5 Résultats et analyse	11
5.1 Premiers constats	11
5.2 Conséquences sur un cas particulier de dimensionnement	12
5.3 Ces résultats sont-ils généralisables ?	13
6 Conclusion	16
7 Références.....	17

8 Annexes	18
8.1 Résultats des mélanges C-0R-0R	18
8.2 Résultats des mélanges C-50R-100R	23
8.3 Résultats des mélanges C-100R-100R	28

Résumé

Les bétons d'infrastructures de transport représentent, pour les granulats de béton recyclé, un débouché plus noble que dans les couches de fondation comme grave non traitée et potentiellement important, étant donnés les volumes mis en œuvre. Le dimensionnement d'une couche de béton routier dépend notamment de son module élastique et de son comportement à la fatigue. En l'absence de données disponibles dans la littérature, l'objet principal de cette étude est d'évaluer l'influence de l'introduction de recyclés (100% des gravillons, 50 à 100% du sable) sur le comportement à la fatigue en flexion de bétons routiers.

Les essais effectués semblent montrer que de forts taux de recyclage conduisent à ne détériorer que légèrement le comportement à la fatigue des bétons. On observe ainsi une diminution de l'endurance et une augmentation de l'écart type SN qui ne sont pas compensées complètement par la diminution concomitante du module élastique dans les calculs de dimensionnement des chaussées. L'étude déduit ainsi que pour une chaussée en béton armé continu sur grave bitume, l'utilisation de forts dosages de granulats recyclés conduit à des surconsommations en ciment par m² de chaussée importantes qui nuisent à l'intérêt économique et environnemental du recyclage. Toutefois, l'analyse montre que le choix particulier des granulats recyclés fait dans le cadre du PN Recybéton conduit à des valeurs probablement surestimées du fait d'un comportement en traction des granulats recyclés particulièrement mauvais et non pas directement du fait d'une forte dégradation du comportement en fatigue. De plus lorsque le recyclage n'est que partiel (typiquement pas de sable recycle et 30% de gravillon recyclé), la surconsommation en ciment attendue est limitée à quelques pourcents.

En conclusion, le comportement à la fatigue des bétons contenant des recyclés doit être plus largement vérifié, mais ne semble pas être un facteur de blocage pour le développement du recyclage à faible taux dans les bétons de roulement.

Summary

Concrete for transport infrastructures represent a more noble outlet for recycled concrete aggregates than in foundation layers as untreated aggregate and potentially large, given the volumes used. The design of a pavement concrete layer depends on its elastic modulus and fatigue behavior. In the lack of available data in the literature, the main objective of this study is to evaluate the influence of the introduction of recycled aggregate (100% of the gravel, 50 to 100% of the sand) on flexural fatigue behavior of concrete for pavements.

The tests carried out seem to show that high recycling rates lead to only slightly deteriorating the fatigue behavior of concrete. There is thus a decrease in endurance and an increase in the standard deviation SN, which are not completely compensated for by the concomitant decrease of elastic modulus in pavement design calculations. The study concludes that, for a continuously reinforced concrete pavement on a bituminous layer, the use of high dosages of recycled aggregates leads to overconsumption of cement per m² of pavement which is detrimental to the economic and environmental benefits of recycling. However, the analysis shows that the particular choice of recycled aggregates made within the framework of the PN Recybéton leads to values that are probably overestimated due the particularly poor tensile behavior of recycled aggregates and not directly due to a strong degradation of fatigue behavior.

Moreover, when recycling is only partial (typically, no recycled sand and 30% recycled gravel), the expected cement overconsumption is limited to a few percents.

In conclusion, the fatigue behavior of recycled concretes must be more widely verified, but does not appear to be a blocking factor for the development of low-level recycling in pavement concrete.

1 Objectifs

Les bétons d'infrastructures de transport représentent, pour les granulats de béton recyclé, un débouché plus noble que dans les couches de fondation comme grave non traitée et potentiellement important, étant donnés les volumes mis en oeuvre. C'est pourquoi, il a été décidé, dans le cadre du projet National Recybéton, d'évaluer les performances de bétons à forts taux de recyclage, pour un usage dans les bétons routiers.

Le Projet National RECYBETON, via son mandataire l'IREX qui en assure la gestion financière et administrative a donc passé commande à l'IFSTTAR de la présente étude (commande n° LC/14/Recy/55) selon la proposition PR14RECYTR3-2-11.

Le dimensionnement d'une couche de béton routier dépend de la durée de vie et du trafic envisagés pour la chaussée mais également des propriétés du matériau lui-même et notamment de son module élastique et de son comportement à la fatigue [1].

En l'absence de données disponibles dans la littérature, l'objet principal de cette étude est d'évaluer le comportement à la fatigue de trois bétons routiers dont on cherche à avoir des résistances en flexion proches:

- Un béton témoin sans granulats de béton recyclé : C-0R-0R
- Un béton dont 50% en masse du sable a été remplacé par du sable recyclé et 100% des gravillons par des gravillons recyclés : C-50R-100R
- Un béton dont 100% des granulats ont été remplacés par des granulats recyclés : C-100R-100R

L'objectif final est de voir si l'incorporation de granulats recyclés conduit à des comportements particuliers du béton routier et nécessite des spécifications particulières pour le dimensionnement des chaussées.

2 Formulation des bétons

2.1 Choix des constituants

Le choix des constituants a été approuvé à l'occasion du CST élargi du PN Recybéton du 19 décembre 2012.

Les granulats naturels ont été proposés par l'UNPG:

- sable semi-concassé lavé 0/4 de la carrière Lafarge de Sandrancourt (78)
- gravillons calcaires concassés 4/10 et 6,3/20: carrière Lafarge de Givet (08)

Les granulats recyclés sont issus d'une production spécifique effectuée sur la plateforme DLB de Gonesse (95). Ils sont fournis en 3 coupures 0/4, 4/10, 10/20. Les gravillons 4/10 sont classés Rcu98 et les gravillons 10/20 sont classés Rcu99 selon la norme 933-11.

Un ciment unique, le CEM II/A-L 42.5 de Rochefort fourni par Holcim a été sélectionné. Ce genre de ciment est couramment utilisé pour la confection de bétons C25/30 et C35/45.

Un filler calcaire, le Betocarb HP-OG d'Omya, a également été sélectionné pour améliorer le squelette granulaire des bétons, le cas échéant. Ce matériau relativement inerte et régulier.

MC Chimie, a été choisi par tirage au sort par le Synad pour fournir les adjuvants. Afin de minimiser les constituants, un superplastifiant unique a été retenu, le MC PowerFlow 3140, ainsi qu'un retardateur, le Centrament Retard 370 et un agent entraîneur d'air, le Centrament Air 205.

Les FTP et les caractéristiques de l'ensemble des constituants sont détaillées dans le rapport présentant les formules de référence du PN Recybéton [2].

2.2 Cahier des charges des bétons

Le cahier de charges initial pour les trois bétons routiers à étudier était typique d'un béton routier BC5 [1, 3] pour couche de roulement, à savoir :

- une classe d'exposition XF2 selon l'EN 206-1/CN conduisant à respecter un rapport $E/C \leq 0,55$, une teneur en ciment équivalent $C \geq 300 \text{ kg/m}^3$, une classe de résistance à la compression de C25/30 au minimum et une teneur en air comprise entre 4% et 5%
- une résistance au fendage moyenne $R_{tb} \geq 3,3 \text{ MPa}$.

Néanmoins, contrairement au cas des bétons routiers pour lesquels on vise typiquement un affaissement de 2 à 5 cm, on visait ici une valeur entre 10cm et 15cm, afin de pouvoir remplir les moules de fatigue trapézoïdaux facilement avec les moyens de laboratoire (en 3 couches à la table vibrante). On suppose ici que ce paramètre est sans influence sur les propriétés de fatigue.

Lors des essais préliminaires de réglage du dosage en agent entraîneur d'air, nous avons obtenu des valeurs erratiques de teneurs en air qui ne permettaient pas de produire plusieurs gâchées identiques avec la même formule. Or cela était indispensable, comme on le verra dans le chapitre 4. La raison de ces variations n'a pas pu être identifiée et, le programme expérimental ayant déjà pris du retard, il a été décidé de s'affranchir de l'exigence sur la teneur en air et de ne pas utiliser d'agent entraîneur d'air. Toutefois, le béton témoin sans granulats recyclés ne contenant pas, lui non plus, d'agent entraîneur d'air, nous avons supposé qu'un effet marginal des granulats recyclés sur les propriétés de fatigue pourrait être mis en évidence de la même façon, malgré cette décision.

2.3 Formules retenues

Les formules ont été optimisées avec le logiciel BetonlabPro, en s'appuyant sur la méthodologie décrite dans [2]. Les trois formules finalement retenues sont résumées dans le Tableau 1.

La nomenclature utilisée est la suivante C-xR-YR avec :

- xR le pourcentage de sable recyclé par rapport à la masse de sable totale
- yR le pourcentage de gravillon recyclé par rapport à la masse totale de gravillon

Tableau 1 : Formules de béton retenues pour l'étude

Gâchée (kg/m ³)	C-0R-0R	C-50R-100R	C-100R-100R
Eau d'ajout	179,5	245	271
Eau efficace	169,1	167,5	176,7
CEMII/A-L 42,5 N	308	385	443
Filler calcaire	45	50	63
Sable naturel 0/4	747	337	
Gravillon naturel 4/10	256		
Gravillon naturel 6,3/20	785		
Sable recyclé 0/4		337	653
Gravillon recyclé 4/10		229	296
Gravillon recyclé 10/20		615	430
Retardateur		2,7	3,6
Superplastifiant	0,7	2,3	3,5

3 Description des essais mécaniques

3.1 Résistance à la compression et module élastique

Les essais de module élastique ont été faits selon un mode opératoire interne au laboratoire MIT, proche de la norme NF EN 12390-13.

L'essai se déroule de la façon suivante :

- Après surfacage au soufre, l'éprouvette Ø16x32 cm est équipée d'un extensomètre à béton J2P constitué de 2 couronnes solidarisiées entre elles par des entretoises (voir Figure 1). Une fois les couronnes fixées en position centrale autour du cylindre par 3 vis disposées à 120° respectivement, elles sont désolidarisées l'une de l'autre, en enlevant les entretoises. Leur distance initiale est ainsi égale à L=12 cm. Les variations de distance ΔL entre les deux couronnes, correspondent alors aux déformations de l'éprouvette. Elles sont mesurées à l'aide de la moyenne de 3 LVDT positionnés à 120° ;
- La presse est équipée d'un système permettant l'enregistrement simultané de la variation de distance entre les couronnes et de la force appliquée sur le cylindre ;
- L'éprouvette est soumise à trois cycles de chargement successifs dont les caractéristiques sont les suivantes :
 - Vitesse de rampe montante (MPa/s) : + 0,1
 - Contrainte palier haut (MPa) : $R_c/3$
 - Durée palier haut (s) : + 2
 - Vitesse de rampe descendante (MPa/s) : - 0,1
 - Force palier bas (MPa) : + 0,99
 - Durée palier bas (s) : + 2
- A l'issue des essais, on calcule par la méthode des moindres carrés, la pente de la partie montante de la courbe $\sigma=f(\Delta L/L)$, lors du 2^{ème} et du 3^{ème} cycle. Le lissage est fait pour σ compris entre une valeur basse incluse dans l'intervalle [palier bas ; palier bas+0,15MPa] et une valeur haute incluse dans l'intervalle [palier haut-0,5MPa ; palier haut]. Cette pente donne directement le module d'élasticité. Le module retenu est la valeur obtenue sur le dernier cycle, si l'écart avec la valeur de l'avant dernier cycle est inférieur à 5%. Dans le cas contraire, il faut répéter l'essai jusqu'à ce que cette condition soit vérifiée.

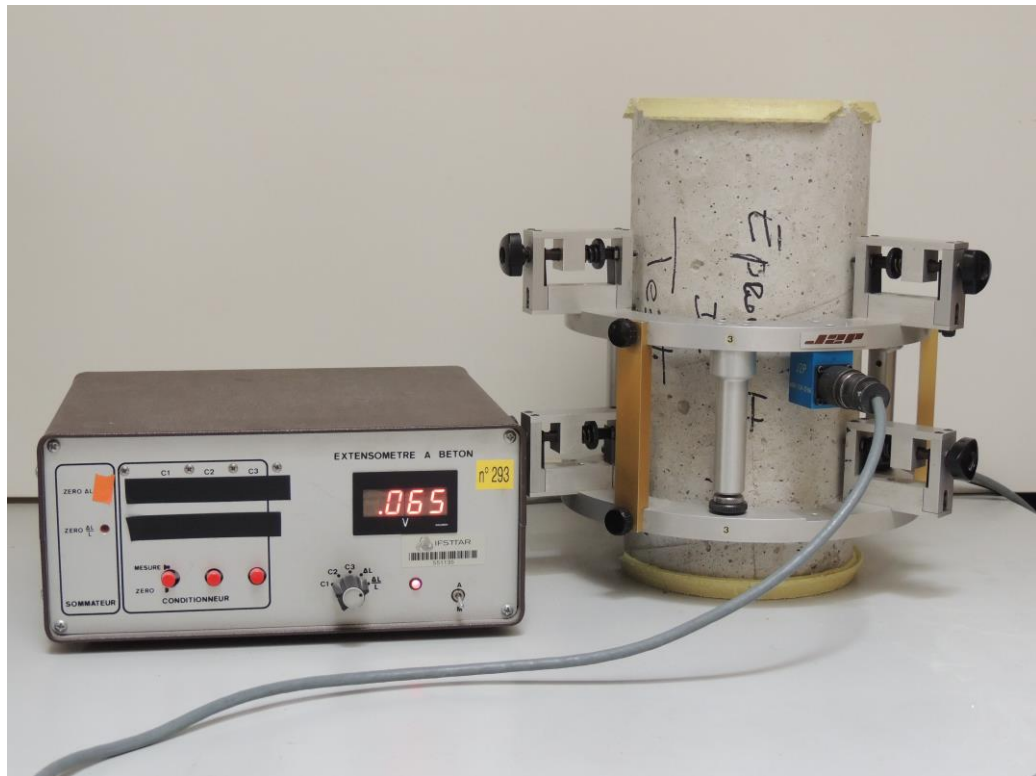


Figure 1: Epreuve de béton équipée du capteur J2P

A l'issue de l'essai de module qui est non destructif, l'extensomètre est retiré de l'éprouvette et on réalise un essai de compression suivant la norme NF EN 12390-3.

3.2 Résistance à la flexion statique et cyclique

Le comportement à la fatigue des bétons est déterminé suivant la norme NFP98-233-1 qui consiste à soumettre 27 échantillons bi-trapézoïdaux à une sollicitation en contrainte cyclique d'amplitude σ imposée, et à mesurer le nombre de cycles N à la rupture.

Pour cela on utilise le montage présenté sur la Figure 2 et monté sur un bâti rigide de béton sur lequel est fixé un socle en acier traversé par 2 rails. L'éprouvette bi-trapézoïdale, réalisée conformément à la norme NF P 98-232-4, est collée à un casque inférieur lui-même encastré dans le socle. Un second casque en acier est collé au sommet de l'éprouvette et transmet les déplacements par une liaison « souple » (afin d'éviter des flexions parasites). Le dispositif assurant l'oscillation est composé d'une équerre fixée au socle et d'un vérin. La mesure de l'amplitude de la force appliquée à l'éprouvette se fait à l'aide d'un capteur de force de 10 kN situé entre la tête du vérin et la liaison souple. Le dispositif est complété par un accéléromètre PCB Piezotronics collé sur le casque qui permet de calculer l'effort d'inertie et de le soustraire à l'effort total mesuré, pour obtenir l'effort véritablement transmis à l'éprouvette. Un laser est également utilisé pour mesurer les déplacements en tête de l'éprouvette et valider les mesures issues de l'accéléromètre.

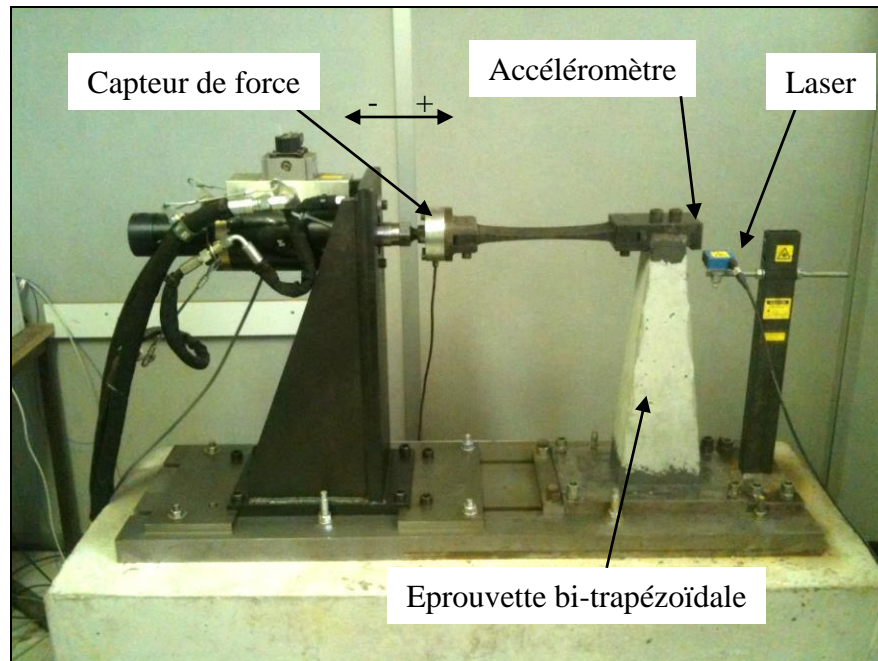


Figure 2: Bâti de fatigue disponible à l'Ifsttar, centre de Nantes. L'effort est transmis par le vérin en tête de l'éprouvette de béton dont la base est collée sur le socle du bâti.

La norme NFP98-233-1 précise que la sollicitation cyclique doit être réalisée à 50 Hz. Des essais préliminaires ont montré qu'avec le montage adopté, les efforts d'inertie passant au travers du capteur étaient importants et difficiles à corriger précisément. Ceci est dû à un léger manque de rigidité du bâti et à la position du capteur qui encaisse les mouvements de la liaison souple. Il a donc été décidé d'abaisser la fréquence d'essai à 30 Hz ce qui permettait de limiter le bruit lié à l'effort d'inertie tout en maintenant la durée d'essai inférieure à une journée (le nombre maximum de cycles est de 3 millions pour un essai dit de longue durée soit moins de 28 h à 30 Hz). Le béton étant élastique, nous supposons ici que l'influence de la fréquence n'a pas d'influence sur son comportement à la fatigue.

Conformément à ce qui avait été proposé par l'Ifsttar lors de la commande pour alléger le coût des essais, le module élastique n'a pas été suivi lors des essais de fatigue. Cette mesure nécessite en effet le collage de jauges qui est assez fastidieux. La mesure de déplacement en tête de l'éprouvette avec le laser aurait pu être utilisée pour mesurer le module du béton. Toutefois les premiers essais ont montré qu'un certain nombre de jeux mécaniques (fixation du casque inférieur sur le bâti, rigidité de la colle...) faussaient les mesures et conduisaient à des modules trop faibles.

Notons toutefois que l'information sur le module, importante pour le dimensionnement des chaussées, est obtenue par ailleurs en compression, comme expliqué au chapitre précédent.

Avant de réaliser un essai de fatigue à un niveau de contrainte σ , on détermine au préalable la valeur de résistance en flexion statique σ_0 sur le même montage suivant la norme NFP98-232-4.

Il est couramment admis que la loi de fatigue reliant σ/σ_0 à $\text{Log}(N)$ est linéaire, comme indiqué sur la Figure 3. Le comportement à la fatigue est alors caractérisé par deux paramètres :

- l'endurance σ_6/σ_0 , où σ_6 est la contrainte conduisant à 10^6 cycles. On peut également utiliser la valeur de la pente de fatigue β ;
- l'écart-type SN observé sur le logarithme du nombre de cycles N pour une contrainte σ fixée, servant à déterminer une valeur caractéristique de l'endurance.

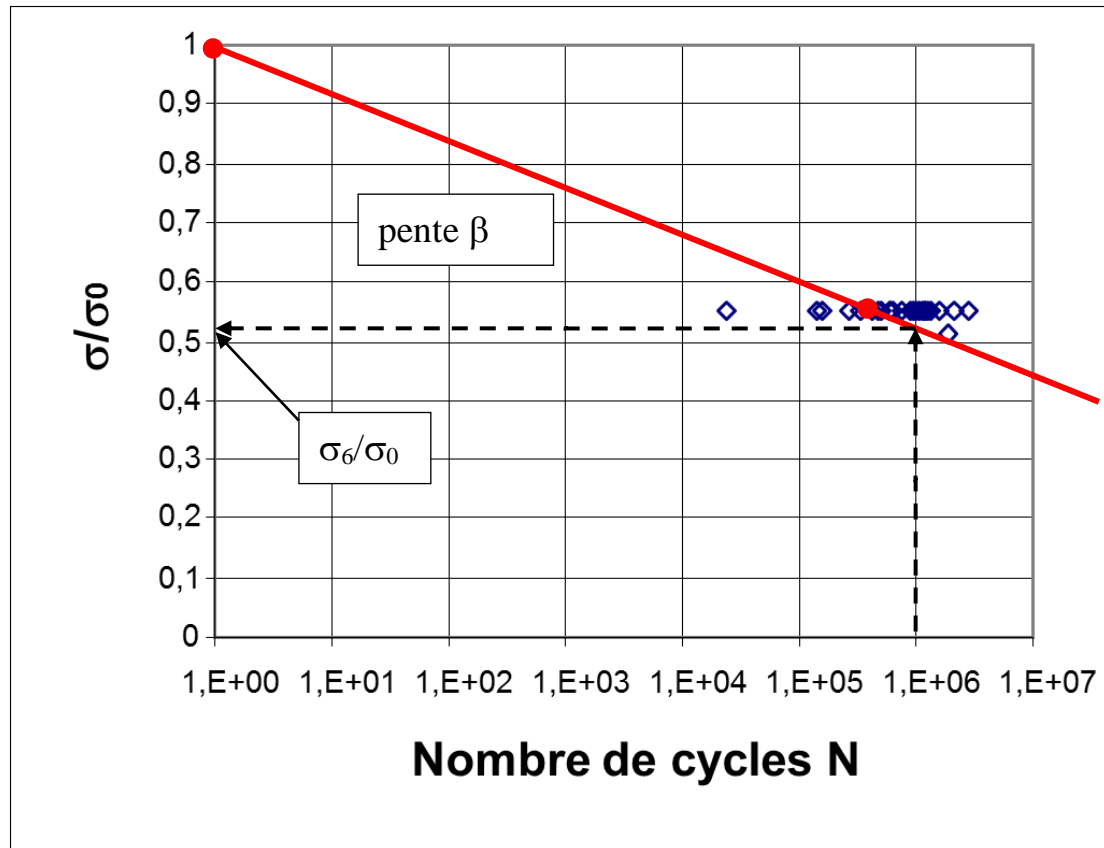


Figure 3: Courbe de fatigue d'un béton exprimant le nombre de cycles à la rupture en fonction du taux de chargement par rapport à la résistance en flexion statique σ_0

Pour une résistance en flexion statique σ_0 et un module élastique fixés, l'épaisseur nécessaire de matériau augmente lorsque l'endurance diminue (ou β augmente en valeur absolue), ou l'écart type SN augmente. A contrario, l'épaisseur diminue lorsque σ_0 , σ_6/σ_0 et SN sont fixés et que le module élastique diminue.

Le principe de déroulement d'un essai de fatigue est le suivant :

- Les 3 premières éprouvettes testées en fatigue vont servir à évaluer le taux de contrainte $e'=\sigma_6/\sigma_0$ conduisant à une durée de vie proche de $N=10^6$ cycles. On applique à la 1^{ère} éprouvette un taux de contrainte de 0,5 et selon la valeur obtenue on augmente ou on diminue ce taux pour se rapprocher des 10^6 cycles ;
- On fixe alors le taux de contrainte et on l'applique sur les éprouvettes restantes ;
- Comme on le voit sur la Figure 3, on obtient alors un ensemble de valeurs N pour un même taux de contrainte. La valeur moyenne et l'écart type de $\text{Log}(N)$ sont alors déterminés à l'aide de la droite de Henry comme indiqué dans l'annexe A de la norme.

Les essais dépassant $3 \cdot 10^6$ cycles sont arrêtés. Ils sont alors considérés comme des essais de longue durée (LD) et pris en compte dans l'analyse statistique.

En cas de rupture d'une éprouvette avant 10 000 cycles, l'essai est considéré comme invalide.

4 Organisation de la campagne expérimentale

4.1 Protocole de pré-humidification des granulats

Comme précisé dans [2], les granulats recyclés ont été utilisés dans un état d'humidité correspondant à leur absorption plus 1% (en valeur absolue) soit d'après le chapitre 2 à une teneur en eau de:

- 9,9% pour le sable recyclé 0/4
- 6,6 % pour le gravillon recycle 4/10
- 6,8 % pour le gravillon recyclé 10/20

Il est donc en général nécessaire de pré-humidifier ces granulats qui sont stockés en laboratoire, selon la procédure suivante:

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

Les granulats naturels étaient quant à eux utilisés dans leur état naturel, pourvu qu'ils soient saturés.

4.2 Malaxeur et protocole de malaxage

Un malaxeur Skako-Couvrot MTV125 à train valseur, de capacité maximale de 90 litres (voir Figure 4) a été utilisé pour fabriquer les bétons, suivant le protocole suivant :

- 0 à 1': Malaxage à sec de tous les constituants
- 1' à 1'30": Introduction eau + adjuvants éventuels (superplastifiant + retardateur),
- 1'30" à 5": Malaxage



Figure 4: malaxeur Skako-Couvrot MTV125

4.3 Répartition des gâchées

La capacité du malaxeur disponible ne permettait pas de fabriquer l'ensemble des éprouvettes en 3 gâchées (lots) tel que suggéré par la norme NF P 98-233-1. L'organisation suivante en 4 gâchées a donc été adoptée.

1^{ère} gâchée (70 litres)

- Mesure de l'affaissement ;
- 3 éprouvettes trapézoïdales pour évaluation de la résistance en flexion σ_0 ;
- 3 éprouvettes trapézoïdales pour calage du taux de chargement e' à viser dans l'essai de fatigue ;
- 2 éprouvettes $\emptyset 16 \times 32$ cm pour essai de résistance en compression et module élastique ;

3 gâchées suivantes (90 l)

- Mesure de l'affaissement
- 3 éprouvettes trapézoïdales pour vérification de la résistance en flexion σ_0 ;
- 8 éprouvettes trapézoïdales testées en fatigue
- 2 éprouvettes $\emptyset 16 \times 32$ cm pour essai de résistance en compression et module élastique

L'ensemble des éprouvettes trapézoïdales et cylindriques sont conservées de la façon suivante :

- 24h dans les moules
- 41 jours dans l'eau à 20°C
- A 20°C dans l'air jusqu'aux essais : à 95 jours pour la résistance à la compression et le module, entre 88 et 122 jours pour les essais de fatigue.

Ce mode de conservation a été choisi car les essais de fatigue sont longs à réaliser et pour limiter le facteur évolution des performances dans le temps il était nécessaire de laisser vieillir les éprouvettes suffisamment longtemps.

5 Résultats et analyse

5.1 Premiers constats

L'ensemble détaillé des résultats est présenté en annexe.

Une synthèse des résultats est donnée dans le Tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2: performances obtenues

	C-0R-0R	C-50R-100R	C-100R-100R
Rc à 95 jours (MPa)	44,6	55,7	57
E à 95 jours (GPa)	37,2	29,5	28,8
σ_0 à -95 jours (MPa)	4,7	4,5	4,0
σ_6/σ_0 à -100 jours	0,505	0,46	0,48
β à -100 jours	-1/12,1	-1/11,1	-1/11,6
SN à -100 jours	0,7	0,9	1,2

Ces premiers résultats semblent montrer que de forts taux de recyclage conduisent à diminuer l'endurance et à augmenter légèrement l'écart type SN. Ceci est défavorable au dimensionnement, c'est-à-dire que cela conduit à augmenter les épaisseurs de matériaux nécessaires pour un trafic donné. D'un autre côté, comme attendu, le module élastique diminue. Ceci est lié à l'accroissement du

volume de pâte dans les bétons avec recyclés et au faible module élastique des granulats recyclés. Ce constat est cette fois ci favorable en termes de dimensionnement.

Avant de généraliser ces résultats, il serait nécessaire de les vérifier plus amplement sur d'autres formulations, les essais de fatigue étant, par essence, dispersés.

On voit par exemple que la valeur SN pour le béton sans recyclés est ici de l'ordre de 0,7 alors qu'en général, le guide de dimensionnement des chaussées routières [1] retient une valeur moyenne SN=1. On peut également se poser la question de la qualité de l'estimation de la valeur moyenne de ce paramètre pour les bétons avec recyclés sur si peu d'essais, en remarquant que le SN ne décroît pas de façon régulière lorsque l'on augmente le taux de sable recyclé de 0 à 100%.

5.2 Conséquences sur un cas particulier de dimensionnement

Pour évaluer de façon plus quantitative l'impact du recyclage sur le dimensionnement d'une chaussée, nous traitons ici le cas d'une structure en béton armé continu sur 5 cm de grave bitume de classe 3 elle-même posée sur une plateforme de 120 MPa. Cette structure correspond à la fiche 21 du catalogue des structures [4].

Le dimensionnement est réalisé pour 30 ans avec le logiciel Alizé et les hypothèses de calcul sont notamment issues de [5] et de la norme NF P 98 086 :

- CAM (coefficient d'agressivité moyen) =1,3
- $K_s=1$ (plateforme de 120 MPa)
- $K_d=1/1,07$
- $K_c=1,5$
- $S_h=0,01$ m
- Risque= 1%
- L'interface béton/ grave bitume est normalement considérée collée pendant les 15 premières années et décollée au-delà de cette période. Par souci de simplification, on suppose l'interface semi-collée pendant 30 ans.
- Trafic :
 - MJA (Moyenne journalière annuelle) =3000 PI/j
 - Taux d'accroissement annuel= 5%
- Les propriétés des bétons sont celles du Tableau 3. La valeur de σ_0 est minorée de 30% et le module élastique E de 10% pour prendre en compte la dispersion sur chantier conformément à [1].

Le Tableau 3 résume les résultats des simulations. On constate dans le cas des formules étudiées dans ce rapport, que l'intérêt économique et environnemental du remplacement à 100% des granulats naturels par des granulats recyclés, est contrebalancé par une augmentation de 90% de la consommation de ciment au m² de chaussée.

Tableau 3 : dimensionnement BAC/GB3 sur la base des propriétés mesurées dans l'étude

	C-0R-0R	C-50R-100R	C-100R-100R
σ admissible (MPa)	1,26	0,89	0,78
Epaisseur de béton minimale (cm)	22	27	29
Ciment (kg/m ²)	68	104	128
Augmentation de la consommation de ciment par rapport à la solution sans recyclé (%)	0	53	90

5.3 Ces résultats sont-ils généralisables ?

La relation entre résistance à la compression et la résistance au fendage s'exprime de la façon suivante grâce à un coefficient de traction k_t du squelette granulaire :

$$R_{tb} = k_t R_c^{0,57}$$

Les granulats naturels et recyclés choisis dans le cadre du PN Recybéton présentent des coefficients de traction k_t particulièrement contrastés, respectivement 0,453 et 0,364 [2]. La faible valeur obtenue pour les granulats recyclés par rapport aux granulats naturels conduit ainsi à une forte augmentation de la demande en ciment pour un affaissement et une résistance à la traction par fendage (et donc en flexion) donnés.

La littérature ([6], [7], [8], [9]) montre qu'en général le remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés perturbe peu les valeurs de k_t du squelette global, même pour un taux de remplacement de 100%. Or, la valeur moyenne de k_t pour un squelette composé de plusieurs sources de granulats est la moyenne des valeurs de k_t individuelles des granulats, pondérées par les proportions volumiques respectives au sein du squelette. Cela signifie donc que les granulats recyclés ont en général des valeurs de k_t proches de celles des granulats naturels. Les figures suivantes illustrent cela et montrent que les valeurs de k_t sont principalement comprises entre 0,36 et 0,46.

Une explication pourrait être qu'en général les granulats recyclés sont constitués de granulats naturels de nature voisine. En effet les granulats recyclés voyagent peu pour des raisons économiques et environnementales liées au transport. Donc les nouveaux bétons sont constitués, en général, des mêmes familles de granulats naturels que les anciens bétons qui ont été concassés. Notons que deux articles de la littérature ([10], [11]) comparent plus spécifiquement des granulats recyclés à des granulats naturels dont ils sont issus. Dans ce cas, l'analyse des documents montre que l'on observe une diminution de k_t de l'ordre de 6%, 13% respectivement lorsque l'on passe du granulat naturel au granulat recyclé. Même si la baisse constatée n'est pas nulle, elle semble en général plus basse que celle observée dans la présente étude.

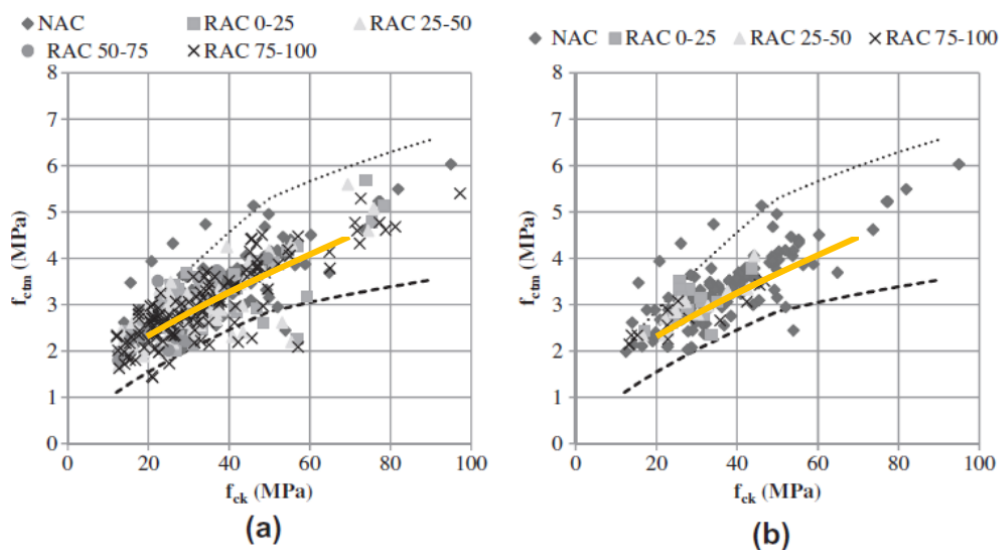


Figure 5: Relation entre la résistance caractéristique à la compression f_{ck} (prise égale à la résistance moyenne -8MPa) et la résistance à la traction directe prise égale à $0.9 R_{tb}$ pour différents taux de remplacement de gravillons (a) ou de sable (b) par des granulats recyclés (tiré de [7]). NAC : granulats naturels, RAC : granulats recyclés. Données issues de 630 bétons tirés de 41 articles. La courbe jaune est calculée pour un $k_t=0,433$ unique pour tous les granulats.

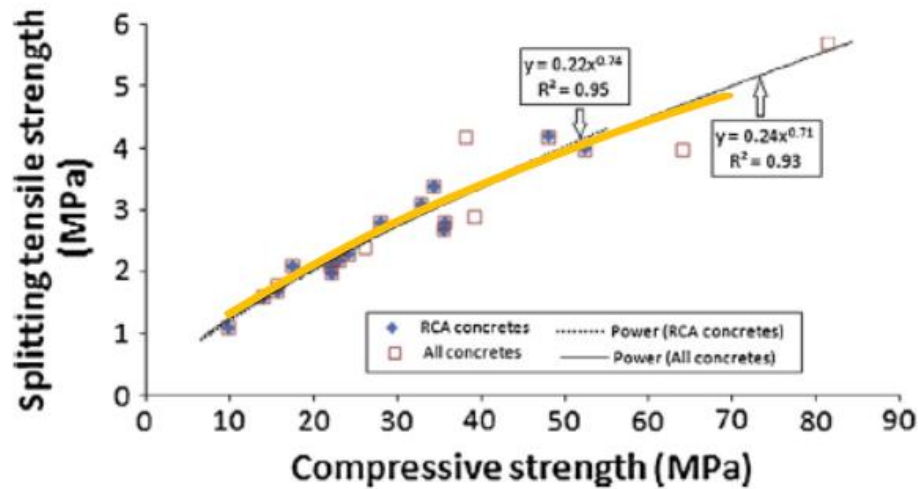


Figure 6: Relation entre la résistance à la compression sur cube prise égale à environ 0,8* la résistance sur cylindre, et la résistance au fendage pour différents taux de granulats recyclés (tiré de [8]). RCA : bétons avec recyclés. Données issues de 8 bétons avec des taux de remplacement de gravillons et/ou de sable jusqu'à 100%. La courbe jaune est calculée pour un $k_f=0,457$ unique pour tous les granulats.

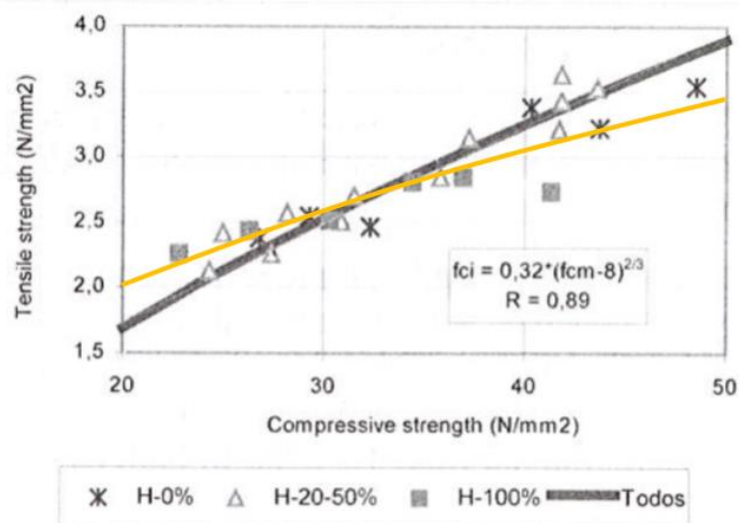


Figure 7: Relation entre la résistance à la compression et la résistance au fendage pour différents taux de granulats recyclés (tiré de [9]). Données issues de 24 bétons avec des taux de remplacement de gravillons uniquement jusqu'à 100%. La courbe jaune est calculée pour un $k_f=0,36$ unique pour tous les granulats.

En conséquence le choix des granulats naturels et recyclés faits dans le cadre du PN Recybéton semble un cas particulièrement sévère sur le plan de la résistance à la traction. Ceci est probablement lié à des origines géographiques différentes (le granulat recyclé vient de la région parisienne, les gravillons naturels viennent de la frontière avec la Belgique) ce qui, dans une logique de recyclage local, est peu probable.

Pour évaluer l'impact de ce choix sur les résultats observés dans le chapitre précédent, nous avons reformulé théoriquement grâce au logiciel BétonlabPro les bétons avec recyclés du chapitre 2.3 en visant le même affaissement et la même résistance au fendage à 90 jours (donc la même résistance à la flexion à 90 jours σ_0) mais avec les hypothèses suivantes :

- les granulats recyclés ont le même terme k_c (coefficient granulaire de compression) que dans [2] mais le terme k_t évolue entre à 0,4 et 0,45 pour se rapprocher des granulats naturels ;
- ou les granulats recyclés ont le même terme k_c et le même k_t que les granulats naturels ;
- on conserve les valeurs d'endurance σ_6/σ_0 et de dispersion SN obtenues dans le Tableau 2
- le module élastique des nouvelles formules est calculé à partir du module moyen du granulat naturel (64,7 GPa) et du module moyen du granulat recyclé (42,4 GPa), calibrés avec BétonlabPro sur les données obtenues dans [2].

Sur la base des propriétés des nouveaux bétons et en reprenant la démarche du chapitre 5.2, on calcule la consommation au m² de ciment pour la structure de BAC/GB. L'ensemble des résultats est résumé dans le Tableau 4 et le Tableau 5

Tableau 4 : dimensionnement BAC/GB3 sur la base des propriétés de bétons simulées pour le C-50R-100R avec différentes valeurs de k_t

k_t des recyclés	0,45	0,42	0,40
R _c à 90 jours (MPa)	43,6	47,7	50,7
E à 95 jours (GPa)	27,5	28,3	28,4
R _{tb} à 90 jours (MPa)	3,9	3,9	3,8
σ_0 à -90 jours (MPa)	4,7	4,7	4,7
σ_6/σ_0 à -100 jours	0,46	0,46	0,46
β à -100 jours	-1/11,1	-1/11,1	-1/11,1
SN à -100 jours	0,9	0,9	0,9
σ admissible (MPa)	0,925	0,925	0,925
Epaisseur de béton minimale (cm)	26	26	26
Ciment (kg/m ³)	318	341	359
Ciment (kg/m ²)	83	89	93
Augmentation de la consommation de ciment par m ² par rapport à la solution sans recyclé (%)	22	30	37

Tableau 5 : dimensionnement BAC/GB3 sur la base des propriétés de bétons simulées pour le C-100R-100R avec différentes valeurs de k_t

k_t des recyclés	0,45	0,42	0,40	0,45 et même k_c que le GN
R _c à 90 jours (MPa)	43,5	48,7	52,7	44,6
E à 95 jours (GPa)	26,7	26,5	27,0	27,0
R _{tb} à 90 jours (MPa)	3,9	3,8	3,8	3,8
σ_0 à -90 jours (MPa)	4,7	4,7	4,7	4,7
σ_6/σ_0 à -100 jours	0,48	0,48	0,48	0,48
β à -100 jours	-1/11,6	-1/11,6	-1/11,6	-1/11,6
SN à -100 jours	1,2	1,2	1,2	1,2
σ admissible (MPa)	0,923	0,923	0,923	0,923
Epaisseur de béton minimale (cm)	26	26	26	26
Ciment (kg/m ³)	363	398	427	308
Ciment (kg/m ²)	94	103	111	80
Augmentation de la consommation de ciment par m ² par rapport à la solution sans recyclé (%)	39	52	63	18

On constate dans ces tableaux que, comme attendu, l'augmentation du k_t des recyclés minimise la surconsommation en ciment par rapport à la solution sans recyclés. Ainsi, si le k_t du granulats recyclés est égal à celui granulats naturel, cette surconsommation est limitée à 39% pour un recyclage de 100%.

Dans l'hypothèse d'un granulats recyclés de caractéristiques mécaniques proches de celles d'un granulats naturel, tant en compression qu'en traction (k_c et k_t), comme on peut l'observer dans la littérature, on voit que l'effet marginal de la baisse de l'endurance et de l'augmentation du SN liées au recyclage ne conduisent qu'à une surconsommation de ciment de 18% (voir dernière colonne du Tableau 5)

En prenant l'hypothèse d'un k_t moyen de 0,42 pour le granulats recyclés, on constate que l'on peut écrire que la surconsommation de ciment ΔC calculée dans la dernière ligne du Tableau 4 et du Tableau 5 sous la forme $\Delta C = 0,44 S + 0,08 G$, avec S pourcentage de remplacement du sable et G pourcentage de remplacement du gravillon. On constate que l'introduction de sable recyclés a un poids plus important que celle du gravillon recyclés. En ne recyclant que des gravillons à un taux de 30%, la surconsommation de ciment se limiterait selon ce modèle à 2,4%.

6 Conclusion

Les essais effectués lors de cette étude semblent montrer que de forts taux de recyclage (100% des gravillons, 50 à 100% du sable) conduisent à détériorer légèrement le comportement à la fatigue des bétons routiers. On observe ainsi une diminution de l'endurance et une augmentation de l'écart type SN qui ne sont pas compensées complètement par la diminution concomitante du module élastique dans les calculs de dimensionnement des chaussées.

Il faut toutefois noter que les évolutions sont modérées et probablement entachées de dispersion. Avant de généraliser ces résultats, il serait donc nécessaire de les vérifier plus amplement sur d'autres formulations.

Le calcul de dimensionnement d'une chaussée en béton armé continu sur grave bitume réalisé dans cette étude, montre que l'utilisation de forts dosages de granulats recyclés conduit à des surconsommations en ciment au m² de chaussée importantes qui nuisent à l'intérêt économique et environnemental du recyclage. Toutefois, il faut noter que le choix particulier des granulats recyclés fait dans le cadre du PN Recybéton conduit à des valeurs probablement surestimées du fait d'un comportement en traction des granulats particulièrement mauvais et non pas directement du fait d'une forte dégradation du comportement en fatigue (endurance et dispersion).

De plus, la communauté technique semble s'orienter vers des taux de recyclage inférieurs (de l'ordre de 30% pour les gravillons et pas de sable recyclés), comme le suggère d'ailleurs la norme NF EN 206/CN. Ceci permet notamment de limiter fortement l'accroissement de la demande en ciment, pour un affaissement et une résistance à la compression donnés. Il est probable que dans ce cas, les performances à la fatigue se rapprochent fortement de celles des bétons de granulats naturels, puisque les écarts sur les paramètres de fatigue observés dans la présente étude sont limités et représentent des valeurs maximales attendues. Un premier calcul montre que l'accroissement de la quantité de ciment par m² de chaussée en béton armé continu serait alors limité à quelques %. Ce point nécessite toutefois des investigations complémentaires.

En conclusion, le comportement à la fatigue des bétons contenant des recyclés doit être plus largement vérifié, mais ne semble pas être un facteur de blocage pour le développement du recyclage à faible taux dans les bétons de roulement.

7 Références

- [1] SETRA, LCPC, Guide Français de dimensionnement des chaussées, décembre 1994
- [2] SEDRAN T., Mise au point des formules de béton de référence, rapport n°R13 Recy003 du PN Recybéton, juillet 2013
- [3] SETRA, LCPC, Guide Technique des chaussées en béton, mai 1997
- [4] SETRA, LCPC, Catalogue des structures types de chaussées neuves, 1998
- [5] SETRA, Structures Béton Armé Continu sur Grave Bitume, note conclusive, mars 2011
- [6] Suman Saha and Rajasekaran C, Mechanical properties of recycled aggregate concrete produced with Portland Pozzolana Cement, *Advances in Concrete Construction*, Vol. 4, No. 1 (2016) 027-035
- [7] R.V. Silva, J. de Brito, R.K. Dhir, Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 83 (2015) 108–118
- [8] Adel Gorjinia Khoshkenari, Payam Shafigh, Mahmoud Moghimi, Hilmi Bin Mahmud, The role of 0–2 mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete
- [9] Marta Sanchez de Juan, Pilar Aleajos Gutiérrez, Influence of recycled aggregate quality on concrete properties, *International Rilem Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, 8-11 November 2004, Barcelona, Spain, pp 545-553
- [10] Dao D-T, (Multi)-recyclage du béton hydraulique ((Multi)-recycling of concrete), PhD thesis, doctoral school SPIGA.
- [11] A.B. Ajdukiewicz and A.T. Kliszczewicz , Comparative Tests of Beams and Columns Made of Recycled Aggregate Concrete and Natural Aggregate Concrete. *Advanced Concrete Technology*, 2007. 5(2): p. 259-273.

8 Annexes

8.1 Résultats des mélanges C-0R-0R

Résistance à la compression et module élastique							
formule	éprouvette	coulage	date	age (j)	Mv (kg/m3)	Rc (MPa)	E (GPa)
T3_C_OR_OR_13_a	15-100	04/06/2015	05/08/2015	62,0	2302,8	36,5	32,2
	15-101	04/06/2015	05/08/2015	62,0	2324,4	34,2	34,5
T3_C_OR_OR_13_b	15-108	17/06/2015	21/09/2015	96,0	2350,9	38,6	35,0
	15-109	17/06/2015	21/09/2015	96,0	2352,2	47,4	
	15-121	17/06/2015	21/09/2015	96,0	2347,2	41,3	35,6
T3_C_OR_OR_13_c	15-122	16/07/2015	19/10/2015	95,0	2378,6	50,3	40,6
	15-123	16/07/2015	19/10/2015	95,0	2383,4	49,0	40,1
T3_C_OR_OR_13_d	15-135	30/07/2015	02/11/2015	95,0	2328,9	41,4	34,3
	15-136	30/07/2015	02/11/2015	95,0	2358,8	41,9	37,8
formule	age (j)	Mv moy (kg/m3)	Rc moy (MPa)	E moy (Gpa)			
T3_C_OR_OR_13_a	62	2313,6	35,3	33,4			
T3_C_OR_OR_13_b	96	2350,1	42,4	35,3			
T3_C_OR_OR_13_c	95	2381,0	49,7	40,4			
T3_C_OR_OR_13_d	95	2343,8	41,7	36,1			

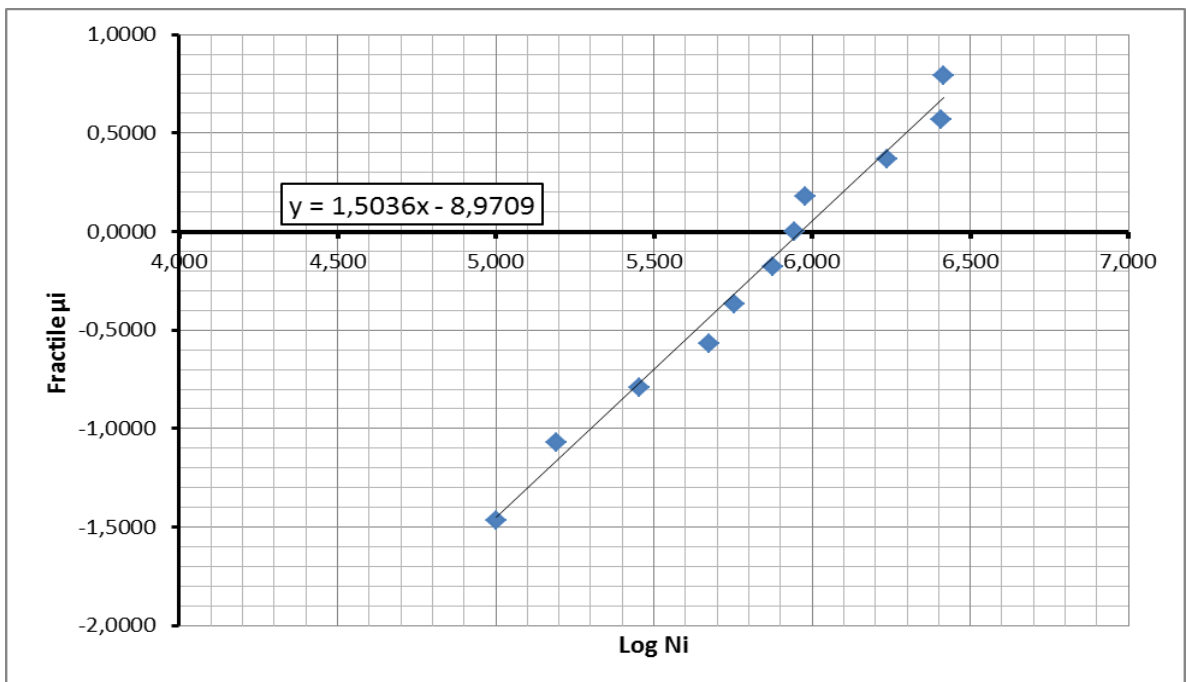
Résistance à la flexion						
formule	éprouvette	coulage	date	age (j)	Mv (kg/m3)	σ_0 moy (MPa)
T3_C_OR_OR_13_a	15-102	04/06/2015	03/08/2015	60,0	2317,2	3,76
	15-103	04/06/2015	03/08/2015	60,0	2337,5	3,19
	15-104	04/06/2015	04/08/2015	61,0	2330,6	3,38
T3_C_OR_OR_13_b	15-110	17/06/2015	14/09/2015	89,0	2380,6	4,49
	15-111	17/06/2015	14/09/2015	89,0	2391,0	4,64
	15-112	17/06/2015	15/09/2015	90,0	2377,7	4,70
	15-115*	17/06/2015	17/09/2015	92,0	2393,4	4,67
	15-118*	17/06/2015	25/09/2015	100,0	2353,9	4,23
T3_C_OR_OR_13_c	15-124	16/07/2015	08/10/2015	84,0	2443,7	4,84
	15-125	16/07/2015	08/10/2015	84,0	2440,0	3,77
	15-126	16/07/2015	09/10/2015	85,0	2455,0	5,44
	15-127*	16/07/2015	12/10/2015	88,0	2424,2	4,72
	15-128*	16/07/2015	15/10/2015	91,0	2449,1	4,55
	15-129*	16/07/2015	19/10/2015	95,0	2411,1	5,44
	15-132*	16/07/2015	26/10/2015	102,0	2398,2	5,36
T3_C_OR_OR_13_d	15-137	30/07/2015	28/10/2015	90,0	2403,7	3,69
	15-138**	30/07/2015	29/10/2015	91,0	2404,4	3,91
	15-139**	30/07/2015	30/10/2015	92,0	2397,0	4,00
	15-140	30/07/2015	30/10/2015	92,0	2391,7	4,21
	15-141	30/07/2015	02/11/2015	95,0	2407,9	4,35
	15-142*	31/07/2015	04/11/2015	96,0	2396,9	4,92
	15-143*	30/07/2015	06/11/2015	99,0	2374,0	4,81
* test après essais de fatigue LD						
** rupture incorrecte dans la colle, non pris en compte						
formule	age (j)	Mv moy (kg/m3)	σ_0 moy (MPa)			
T3_C_OR_OR_13_a	60,3	2328,4	3,44			
T3_C_OR_OR_13_b	92,0	2379,3	4,55			
T3_C_OR_OR_13_c	89,9	2431,6	4,87			
T3_C_OR_OR_13_d	93,6	2396,5	4,57			

Essai par flexion à amplitude de contrainte constante										
formule	éprouvette	Coulage	date	age (j)	Mv (kg/m3)	Mv (kg/m3)	σ (Mpa)	Nbre de cycles Ni	σ/σ_0	Commentaire
T3_C_OR_OR_13_a	15-105	04/06/2015	05/08/2015	62	2335,8	2338,4	1,58	30 362	0,459	non pertinent: inertie corrigée a priori 50Hz non pertinent: inertie corrigée a priori 50Hz non pertinent inertie corrigée a priori (essai 50Hz puis 30 Hz)
	15-106	04/06/2015	05/08/2015	62	2340,8		1,31	587 572	0,380	
	15-107	04/06/2015	07/08/2015	64	2338,6		1,13	765 376	0,328	
T3_C_OR_OR_13_b	15-113	17/06/2015	15/09/2015	90	2396,9	2404,5	2,21	474 272	0,486	rupture dans la colle à (15 424 cycles) essai interrompu par erreur à 2 391 846 cycles
	15-114	17/06/2015	16/09/2015	91	2407,7		2,25		0,495	
	15-115	17/06/2015	17/09/2015	92	2393,4		2,15	0,473		
	15-116	17/06/2015	18/09/2015	93	2434,9		2,27	754 776	0,499	
	15-117	17/06/2015	22/09/2015	97	2398,3		2,28	LD	0,502	
	15-118	17/06/2015	25/09/2015	100	2398,2		2,24	LD	0,493	
	15-119	17/06/2015	25/09/2015	100	2407,4		2,24	155 367	0,493	
	15-120	17/06/2015	29/09/2015	104	2399,1		2,22	2 613 551	0,488	
T3_C_OR_OR_13_c	15-127	16/07/2015	12/10/2015	88	2393,7	2416,8	2,24	LD	0,460	rupture dans la colle à (140 561 cycles)
	15-128	16/07/2015	14/10/2015	90	2413,7		2,24	LD	0,460	
	15-129	16/07/2015	15/10/2015	91	2411,1		2,24	LD	0,460	
	15-130	16/07/2015	19/10/2015	95	2441,3		2,44	100 455	0,501	
	15-131	16/07/2015	20/10/2015	96	2432,7		2,46	2 563 585	0,505	
	15-132	16/07/2015	22/10/2015	98	2398,2		2,46	LD	0,505	
	15-133	16/07/2015	26/10/2015	102	2410,5		2,44	0,501		
	15-134	16/07/2015	27/10/2015	103	2433,6		2,46	949 049	0,505	
T3_C_OR_OR_13_d	15-140	30/07/2015			2391,7	2388,8				Essai testé en statique Essai testé en statique
	15-141	30/07/2015			2407,9					
	15-142	30/07/2015	03/11/2015	96	2396,9		2,07	LD	0,453	
	15-143	30/07/2015	04/11/2015	97	2374,0		2,06	LD	0,451	
	15-144	30/07/2015	14/11/2015	107	2391,9		2,43	1 726 710	0,531	
	15-145	30/07/2015	16/11/2015	109	2373,8		2,42	883 646	0,529	
	15-146	30/07/2015	17/11/2015	110	2379,0		2,44	566 908	0,534	
	15-147	30/07/2015	18/11/2015	111	2395,4		2,43	285 144	0,531	

Exploitation de l'essai de fatigue par la droite de Henry

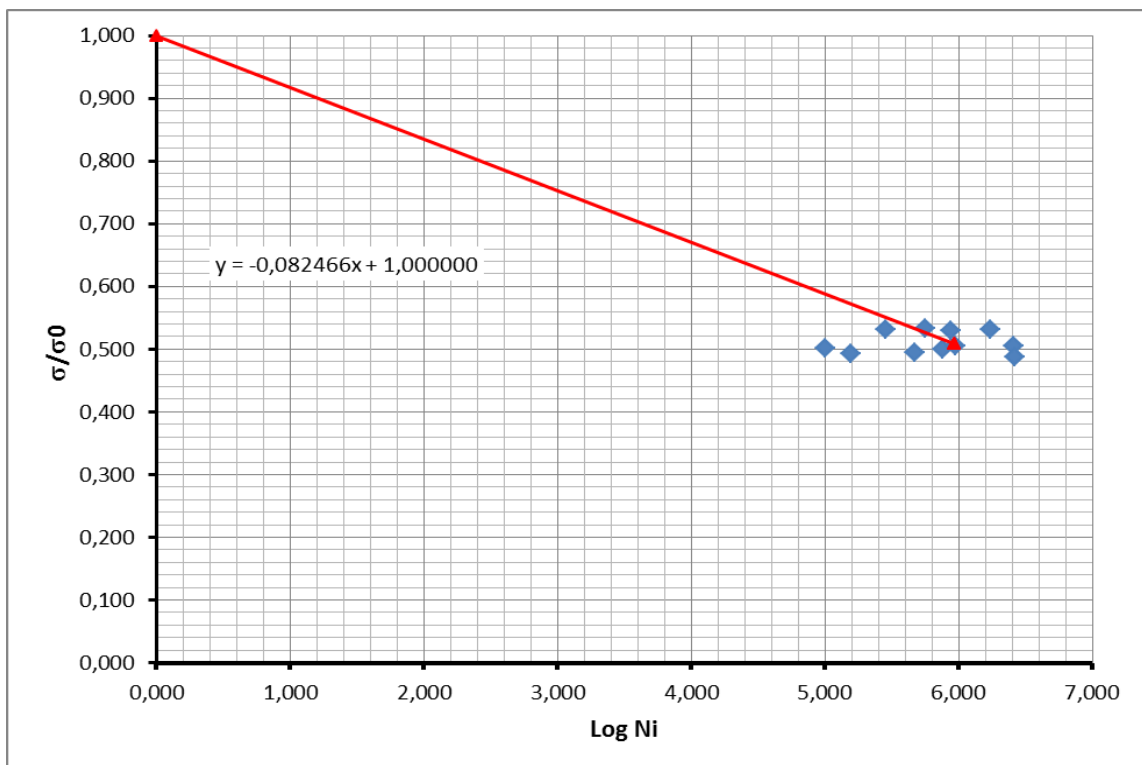
Nombre d'essais valides	14
Ruptures immédiates (RI)	0
Longues durées (LD)	3

éprouvette	Nbre de cycles Nij	σ/σ_0	Nbre de cycles Nij	σ/σ_0	Log Ni	Fréquence	Fréquence cumulée	Valeur réduite (fractile μ_i)
15-130	100 455	0,501	100 455	0,501	5,002	0,0714	0,0714	-1,4652
15-119	155 367	0,493	155 367	0,493	5,191	0,0714	0,1429	-1,0676
15-147	285 144	0,531	285 144	0,531	5,455	0,0714	0,2143	-0,7916
15-114	474 272	0,495	474 272	0,495	5,676	0,0714	0,2857	-0,5659
15-146	566 908	0,534	566 908	0,534	5,754	0,0714	0,3571	-0,3661
15-116	754 776	0,499	754 776	0,499	5,878	0,0714	0,4286	-0,1800
15-145	883 646	0,529	883 646	0,529	5,946	0,0714	0,5000	0,0000
15-134	949 049	0,505	949 049	0,505	5,977	0,0714	0,5714	0,1800
15-144	1 726 710	0,531	1 726 710	0,531	6,237	0,0714	0,6429	0,3661
15-131	2 563 585	0,505	2 563 585	0,505	6,409	0,0714	0,7143	0,5659
15-120	2 613 551	0,488	2 613 551	0,488	6,417	0,0714	0,7857	0,7916
15-118	LD	0,493	LD	0,493				
15-117	LD	0,502	LD	0,502				
15-132	LD	0,505	LD	0,505				



Courbe et paramètres de fatigue

Taux de contrainte moyen de l'essai	0,508
Médiane Ni	924 903
σ_6/σ_0	0,505
$-1/\beta$	12,1
$-1/b$	14,0
SN	0,67



8.2 Résultats des mélanges C-50R-100R

Résistance à la compression et module élastique							
formule	éprouvette	coulage	date	age (j)	Mv (kg/m3)	Rc (MPa)	E (GPa)
T3_C_50R_100R_a	15-208	22/10/2015	26/01/2016	96,0	2221,8	55,4	28,1
	15-209	22/10/2015	26/01/2016	96,0	2219,3	57,3	27,6
T3_C_50R_100R_b	15-216	29/10/2015	01/02/2016	95,0	2244,0	56,0	28,9
	15-217	29/10/2015	01/02/2016	95,0	2244,0	57,1	29,4
T3_C_50R_100R_c	15-229	19/11/2015	22/02/2016	95,0	2278,4	50,7	31,7
	15-230	19/11/2015	22/02/2016	95,0	2267,8	50,7	31,5
T3_C_50R_100R_d	15-242	17/12/2015	21/03/2016	95,0	2253,0	59,9	30,5
	15-243	17/12/2015	21/03/2016	95,0	2237,1	58,5	28,2
formule	age (j)	Mv moy (kg/m3)	Rc moy (MPa)	E moy (Gpa)			
T3_C_50R_100R_a	96	2220,6	56,3	27,8			
T3_C_50R_100R_b	95	2244,0	56,6	29,1			
T3_C_50R_100R_c	95	2273,1	50,7	31,6			
T3_C_50R_100R_d	95	2245,1	59,2	29,3			

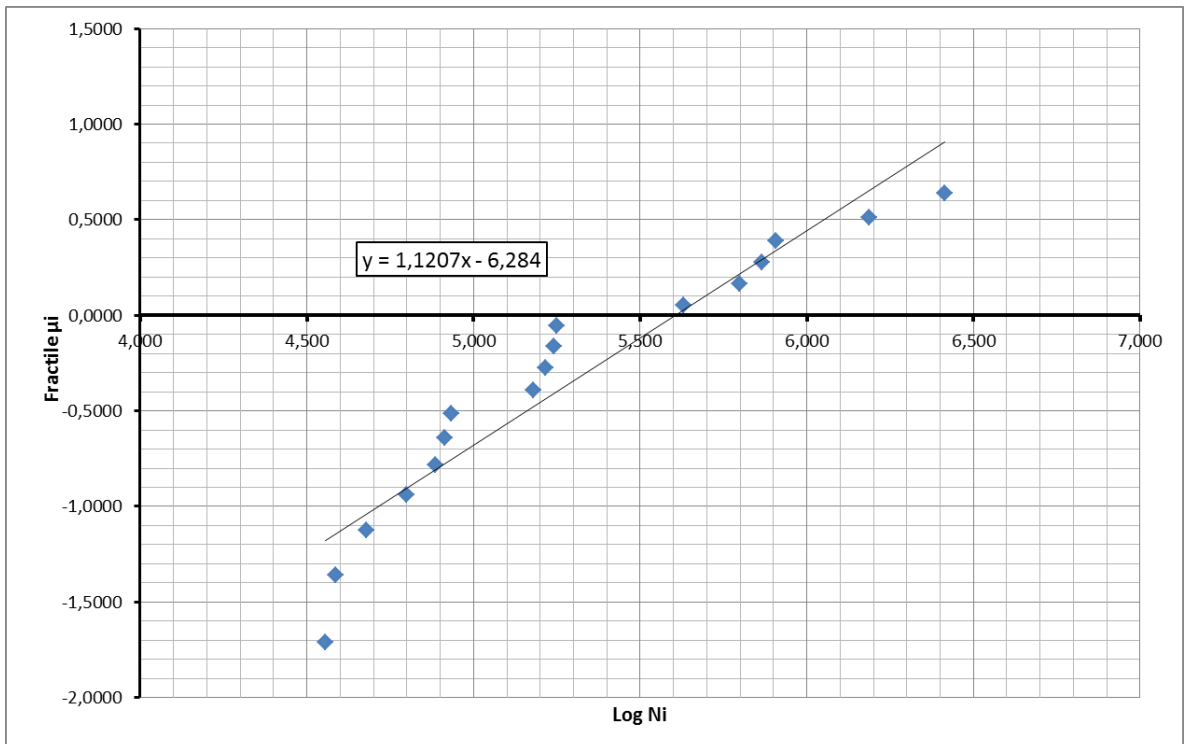
T3_C_50R_100R						
Résistance à la flexion						
formule	éprouvette	coulage	date	age (j)	Mv (kg/m3)	σ_0 moy (MPa)
T3_C_50R_100R_a	15-210	22/10/2015	01/02/2016	102,0	2207,9	4,51
	15-211	22/10/2015	02/02/2016	103,0	2221,7	4,26
	15-212	22/10/2015	02/02/2016	103,0	2216,9	4,83
T3_C_50R_100R_b	15-218	29/10/2015	08/02/2016	102,0	2223,0	4,48
	15-219	29/10/2015	09/02/2016	103,0	2233,3	4,65
	15-220	29/10/2015	09/02/2016	103,0	2219,1	4,01
	15-222*	29/10/2015	12/02/2016	106,0	2224,7	4,71
	15-225*	29/10/2015	19/02/2016	113,0	2223,0	4,92
	15-226*	29/10/2015	22/02/2016	116,0	2225,8	4,96
T3_C_50R_100R_c	15-231	19/11/2015	25/02/2016	98,0	2258,6	3,72
	15-232	19/11/2015	26/02/2016	99,0	2254,7	3,18
	15-233	19/11/2015	26/02/2016	99,0	2270,4	3,30
T3_C_50R_100R_d	15-244	17/12/2015	14/03/2016	88,0	2245,5	4,01
	15-245	17/12/2015	14/03/2016	88,0	2242,2	4,17
	15-246	17/12/2015	15/03/2016	89,0	2245,3	4,13
	15-250*	17/12/2015	21/03/2016	95,0	2252,3	4,35
	15-252*	17/12/2015	24/03/2016	98,0	2250,3	4,24
* test après essais de fatigue LD						
formule	age (j)	Mv moy (kg/m3)	σ_0 moy (MPa)			
T3_C_50R_100R_a	102,7	2215,5	4,53			
T3_C_50R_100R_b	107,2	2224,8	4,62			
T3_C_50R_100R_c	98,7	2261,2	3,40			
T3_C_50R_100R_d	91,6	2247,1	4,18			

Essai par flexion à amplitude de contrainte constante											
formule	éprouvette	Coulage	date	age (j)	Mv (kg/m3)	Mv (kg/m3)	σ (Mpa)	Nbre de cycles Ni	σ/σ0	Commentaire	
T3_C_50R_100R_a	15-213	22/10/2015	03/02/2016	104	2191,8	2208,1	2,22	735 831	0,490	rupture dans la colle	
	15-214	22/10/2015	04/02/2016	105	2213,1		2,28		0,503		
	15-215	22/10/2015	05/02/2016	106	2219,3		2,32		177 808		0,512
T3_C_50R_100R_b	15-221	29/10/2015	10/02/2016	104	2231,3	2225,4	2,28	628 409	0,493	rupture dans la colle	
	15-222	29/10/2015	11/02/2016	105	2224,7		2,28	LD	0,493		
	15-223	29/10/2015	12/02/2016	106	2214,7		2,26		0,489		
	15-224	29/10/2015	15/02/2016	109	2221,5		2,28	2 602 307	0,493		
	15-225	29/10/2015	17/02/2016	111	2223,0		2,28	LD	0,493	rupture dans la colle	
	15-226	29/10/2015	20/02/2016	114	2225,8		2,33	LD	0,504		
	15-227	29/10/2015	22/02/2016	116	2224,3		2,39		0,517		
	15-228	29/10/2015	23/02/2016	117	2238,1		2,4	LD	0,519		
T3_C_50R_100R_c	15-234	19/11/2015	29/02/2016	102	2247,9	2263,4	1,68	85 648	0,494		
	15-235	19/11/2015	01/03/2016	103	2264,9		1,71	810 302	0,503		
	15-236	19/11/2015	02/03/2016	104	2256,8		1,69	426 532	0,497		
	15-237	19/11/2015	03/03/2016	105	2264,9		1,67	47 617	0,491		
	15-238	19/11/2015	04/03/2016	106	2266,2		1,67	38 585	0,491		
	15-239	19/11/2015	07/03/2016	109	2268,9		1,68	62 854	0,494		
	15-240	19/11/2015	08/03/2016	110	2271,0		1,68	164 107	0,494		
	15-241	19/11/2015	09/03/2016	111	2266,5		1,7	151 097	0,500		
T3_C_50R_100R_d	15-247	17/12/2015	15/03/2016	89	2246,1	2249,6	1,99	35 974	0,476	rupture dans la colle	
	15-248	17/12/2015	16/03/2016	90	2252,0		2	82 100	0,478		
	15-249	17/12/2015	17/03/2016	91	2246,4		1,72		0,411		
	15-250	17/12/2015	21/03/2016	95	2252,3		2,03	LD	0,486		
	15-251	17/12/2015	21/03/2016	95	2262,8		2,01	173 814	0,481		
	15-252	17/12/2015	22/03/2016	96	2250,3		2,03	LD	0,486		
	15-253	17/12/2015	24/03/2016	98	2244,0		2	77 016	0,478		
	15-254	17/12/2015	26/03/2016	100	2242,6		2,04	1 537 245	0,488		rupture incorrecte

Exploitation de l'essai de fatigue par la droite de Henry

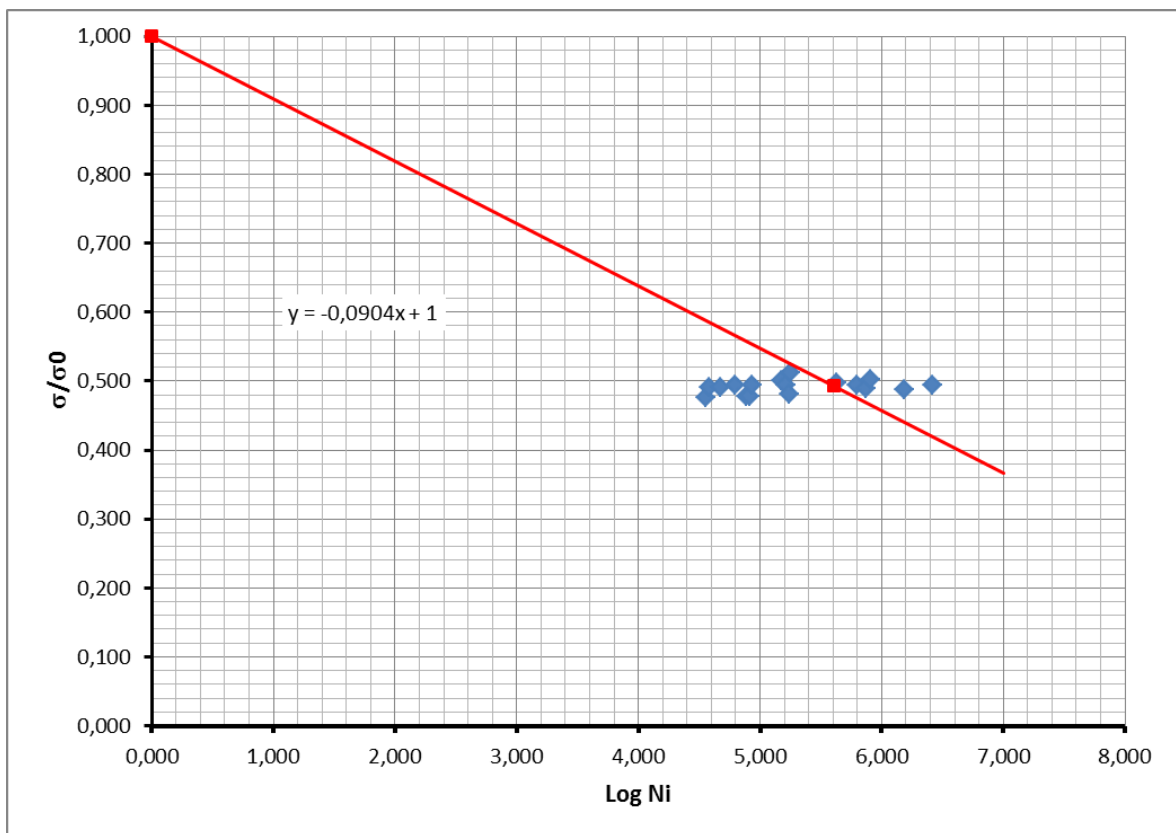
Nombre d'essais valides	23
Ruptures immédiates (RI)	0
Longues durées (LD)	6

éprouvette	Nbre de cycles Nij	σ/σ_0	Nbre de cycles Nij	σ/σ_0	Log Ni	Fréquence	Fréquence cumulée	Valeur réduite (fractile μ_i)
15-247	35 974	0,476	35 974	0,476	4,556	0,0435	0,0435	-1,7117
15-238	38 585	0,491	38 585	0,491	4,586	0,0435	0,0870	-1,3597
15-237	47 617	0,491	47 617	0,491	4,678	0,0435	0,1304	-1,1243
15-239	62 854	0,494	62 854	0,494	4,798	0,0435	0,1739	-0,9388
15-253	77 016	0,478	77 016	0,478	4,887	0,0435	0,2174	-0,7810
15-248	82 100	0,478	82 100	0,478	4,914	0,0435	0,2609	-0,6407
15-234	85 648	0,494	85 648	0,494	4,933	0,0435	0,3043	-0,5119
15-241	151 097	0,500	151 097	0,500	5,179	0,0435	0,3478	-0,3912
15-240	164 107	0,494	164 107	0,494	5,215	0,0435	0,3913	-0,2759
15-251	173 814	0,481	173 814	0,481	5,240	0,0435	0,4348	-0,1642
15-215	177 808	0,512	177 808	0,512	5,250	0,0435	0,4783	-0,0545
15-236	426 532	0,497	426 532	0,497	5,630	0,0435	0,5217	0,0545
15-221	628 409	0,493	628 409	0,493	5,798	0,0435	0,5652	0,1642
15-213	735 831	0,490	735 831	0,490	5,867	0,0435	0,6087	0,2759
15-235	810 302	0,503	810 302	0,503	5,909	0,0435	0,6522	0,3912
15-254	1 537 245	0,488	1 537 245	0,488	6,187	0,0435	0,6957	0,5119
15-224	2 602 307	0,493	2 602 307	0,493	6,415	0,0435	0,7391	0,6407
15-222	LD	0,493	LD	0,493				
15-225	LD	0,493	LD	0,493				
15-226	LD	0,504	LD	0,504				
15-228	LD	0,519	LD	0,519				
15-250	LD	0,486	LD	0,486				
15-252	LD	0,486	LD	0,486				



Courbe et paramètres de fatigue

Taux de contrainte moyen de l'essai	0,493
Médiane Ni	404 667
σ_6/σ_0	0,457
$-1/\beta$	11,1
$-1/b$	11,5
SN	0,89

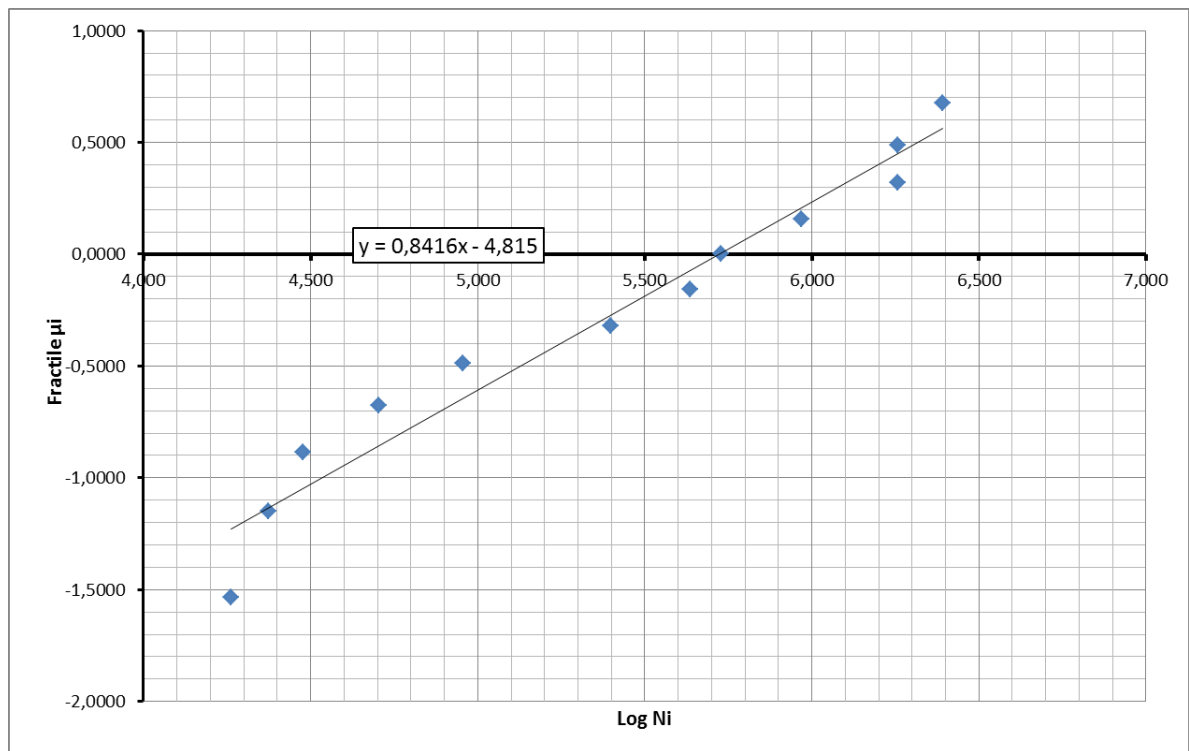


8.3 Résultats des mélanges C-100R-100R

Résistance à la compression et module élastique							
formule	éprouvette	coulage	date	age (j)	Mv (kg/m ³)	Rc (MPa)	E (GPa)
T3_C_100R_100R_a	15-148	20/08/2015	23/11/2015	95,0	2204,3	46,7	26,2
	15-149	20/08/2015	23/11/2015	95,0	2207,4	58,5	25,8
T3_C_100R_100R_b	15-156	27/08/2015	30/11/2015	95,0	2220,2	60,4	27,7
	15-157	27/08/2015	30/11/2015	95,0	2213,0	57,4	27,3
T3_C_100R_100R_c	15-169	10/09/2015	14/12/2015	95,0	2214,7	54,2	26,9
	15-170	10/09/2015	14/12/2015	95,0	2221,0	53,9	27,1
T3_C_100R_100R_d	15-182	08/10/2015	11/01/2016	95,0	2222,9	52,3	25,2
	15-183	08/10/2015	11/01/2016	95,0	2219,9	51,5	27,5
formule	age (j)	Mv moy (kg/m ³)	Rc moy (MPa)	E moy (Gpa)			
T3_C_100R_100R_a	95	2205,9	52,6	26,0			
T3_C_100R_100R_b	95	2216,6	58,9	27,5			
T3_C_100R_100R_c	95	2217,8	54,1	27,0			
T3_C_100R_100R_d	95	2221,4	51,9	26,4			

Résistance à la flexion						
formule	éprouvette	coulage	date	age (j)	Mv (kg/m3)	σ_0 moy (MPa)
T3_C_100R_100R_a	15-150	20/08/2015	19/11/2015	91,0	2233,4	3,83
	15-151	20/08/2015	20/11/2015	92,0	2242,6	4,39
	15-152	20/08/2015	20/11/2015	92,0	2222,5	4,33
T3_C_100R_100R_b	15-158	27/08/2015	25/11/2015	90,0	2240,2	3,78
	15-159	27/08/2015	26/11/2015	91,0	2234,7	4,37
	15-160	27/08/2015	26/11/2015	91,0	2234,7	4,25
	15-164*	27/08/2015	03/12/2015	98,0	2197,2	3,48
	15-168*	27/08/2015	14/12/2015	109,0	2210,1	4,33
T3_C_100R_100R_c	15-172	10/09/2015	15/12/2015	96,0	2220,3	3,33
	15-173	10/09/2015	15/12/2015	96,0	2238,6	3,17
	15-174	10/09/2015	21/12/2015	102,0	2232,7	2,88
	15-175	10/09/2015	22/12/2015	103,0	2230,8	2,50
	15-176*	10/09/2015	06/01/2016	118,0	2225,1	3,04
	15-177*	10/09/2015	08/01/2016	120,0	2223,6	3,58
	15-179*	10/09/2015	11/01/2016	123,0	2276,6	3,90
T3_C_100R_100R_d	15-184	22/10/2015	12/01/2016	82,0	2217,5	3,70
	15-185	22/10/2015	14/01/2016	84,0	2221,3	3,74
	15-186	22/10/2015	14/01/2016	84,0	2208,1	3,42
	15-190*	22/10/2015	22/01/2016	92,0	2231,1	3,58
	15-191*	22/10/2015	25/01/2016	95,0	2223,0	3,38
	15-192*	22/10/2015	27/01/2016	97,0	2224,7	4,22
	15-193*	22/10/2015	29/01/2016	99,0	2212,1	3,61
	15-194*	22/10/2015	01/02/2016	102,0	2220,6	4,93
* test après essais de fatigue LD						
formule	age (j)	Mv moy (kg/m3)	σ_0 moy (MPa)			
T3_C_100R_100R_a	91,7	2232,8	4,18			
T3_C_100R_100R_b	95,8	2223,4	4,04			
T3_C_100R_100R_c	108,3	2235,4	3,20			
T3_C_100R_100R_d	91,9	2219,8	3,82			

T3_C_100R_100R										
Resultats en prenant le vrai σ_0 pour les éprouvettes LD et non pas la valeur moyenne de σ_0 de la gâchée										
Essai par flexion à amplitude de contrainte constante										
formule	éprouvette	Coulage	date	age (j)	Mv (kg/m3)	Mv (kg/m3)	σ (Mpa)	Nbre de cycles Ni	σ/σ_0	Commentaire
T3_C_100R_100R_a	15-153	20/08/2015	21/11/2015	93	2196,5	2193,0	2,22	1 805 799	0,531	
	15-154	20/08/2015	23/11/2015	95	2186,3		2,23	533 930	0,533	
	15-155	20/08/2015	24/11/2015	96	2196,1		2,18	50 627	0,521	
T3_C_100R_100R_b	15-161	27/08/2015	27/11/2015	92	2197,6	2197,5	2,20	90 563	0,544	
	15-162	27/08/2015	26/11/2015	91	2183,5		2,10	18 279	0,520	
	15-163	27/08/2015	30/11/2015	95	2195,7		1,97	250 384	0,487	
	15-164	27/08/2015	01/12/2015	96	2197,2		1,99	LD	0,572	
	15-165	27/08/2015	03/12/2015	98	2202,0		1,99	2 470 596	0,492	
	15-166	27/08/2015	07/12/2015	102	2196,6		2,00	29 953	0,495	
	15-168	27/08/2015	10/12/2015	105	2210,1		1,99	LD	0,460	
T3_C_100R_100R_c	15-176	11/09/2015	04/01/2016	115	2224,1	2235,9	1,42	LD	0,467	Eprouvette testée en statique Eprouvette testée en statique Eprouvette testée en statique
	15-177	11/09/2015	06/01/2016	117	2222,6		1,43	LD	0,399	
	15-179	11/09/2015	08/01/2016	119	2275,6		1,53	LD	0,392	
	15-180	11/09/2015	11/01/2016	122	2227,6		1,70	23 716	0,531	
	15-181	12/09/2015	12/01/2016	122	2229,5		1,74	432 968	0,544	
T3_C_100R_100R_d	15-187	08/10/2015	15/01/2016	99	2219,0	2219,3	1,77	1 806 797	0,463	Essai testé en statique Essai testé en statique Essai testé en statique
	15-188	08/10/2015	18/01/2016	102	2220,6		1,77	932 139	0,463	
	15-189	08/10/2015	19/01/2016	103	2203,6		1,75	97 460	0,458	
	15-190	08/10/2015	20/01/2016	104	2231,1		1,78	LD	0,497	
	15-191	08/10/2015	22/01/2016	106	2223,0		1,77	LD	0,524	
	15-192	08/10/2015	26/01/2016	110	2224,7		1,79	LD	0,424	
	15-193	08/10/2015	27/01/2016	111	2212,1		1,78	LD	0,493	
	15-194	08/10/2015	29/01/2016	113	2220,6		1,89	LD	0,383	



T3_C_100R_100R								
Exploitation de l'essai de fatigue par la droite de Henry								
Resultats en prenant le vrai σ_0 pour les éprouvettes LD et non pas la valeur moyenne de σ_0 de la gâchée								
Nombre d'essais valides		16						
Ruptures immédiates (RI)		0						
Longues durées (LD)		4						
épreuve	Nbre de cycles N_{ij}	σ/σ_0	Nbre de cycles N_{ij}	σ/σ_0	Log N_i	Fréquence	Fréquence cumulée	Valeur réduite (fractile μ_i)
15-162	18 279	0,520	18 279	0,520	4,262	0,0625	0,0625	-1,5341
15-180	23 716	0,531	23 716	0,531	4,375	0,0625	0,1250	-1,1503
15-166	29 953	0,495	29 953	0,495	4,476	0,0625	0,1875	-0,8871
15-155	50 627	0,521	50 627	0,521	4,704	0,0625	0,2500	-0,6745
15-161	90 563	0,544	90 563	0,544	4,957	0,0625	0,3125	-0,4888
15-163	250 384	0,487	250 384	0,487	5,399	0,0625	0,3750	-0,3186
15-181	432 968	0,544	432 968	0,544	5,636	0,0625	0,4375	-0,1573
15-154	533 930	0,533	533 930	0,533	5,727	0,0625	0,5000	0,0000
15-188	932 139	0,463	932 139	0,463	5,969	0,0625	0,5625	0,1573
15-153	1 805 799	0,531	1 805 799	0,531	6,257	0,0625	0,6250	0,3186
15-187	1 806 797	0,463	1 806 797	0,463	6,257	0,0625	0,6875	0,4888
15-165	2 470 596	0,492	2 470 596	0,492	6,393	0,0625	0,7500	0,6745
15-176	LD	0,467	LD	0,467				
15-193	LD	0,493	LD	0,493				
15-190	LD	0,497	LD	0,497				
15-191	LD	0,524	LD	0,524				

T3_C_100R_100R	
Courbe et paramètres de fatigue	
Resultats en prenant le vrai σ_0 pour les eprouvettes LD et non pas la valeur moyenne de σ_0 de la gâchée	
Taux de contrainte moyen de l'essai	0,507
Médiane Ni	526 535
σ_6/σ_0	0,483
-1/ β	11,6
-1/b	12,7
SN	1,19

