

Evaluation des performances mécaniques des bétons autoplaçants renforcés de fibres non-métalliques

Moussa Coulibaly¹, Olivier Helson², Javad Eslami¹, Anne-Lise Beaucour¹, Albert Noumowé¹

¹ CY Cergy Pris Université - Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (L2MGC), Neuville Sur Oise 95031 Cergy-Pontoise Cedex, France

² Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA), 92290 Châtenay-Malabry Cedex, France

RESUME : L'objectif de ce travail expérimental est d'évaluer la contribution mécanique des fibres non-métalliques sur les performances des bétons, en vue d'une substitution d'une partie des armatures des éléments structurels en béton armé du projet cigéo. Les fibres utilisées dans cette étude sont les MiniBars™ fibres de basalte et de verre alcali-résistantes (AR) renforcées avec le polymère de type Vinylester. Les propriétés requises par les matériaux testés visent dans l'application proposée, une résistance mécanique minimale de 60 MPa à 28 jours. Les investigations portent sur les bétons autoplaçants renforcés de fibres (BAPF) avec variation de la fraction volumique (FV). La conception du mélange a été développée de manière à observer l'influence des fibres sur le comportement mécanique des bétons. Les performances mécaniques des spécimens sont évaluées sur la base d'essais de compression uniaxiale, de traction par fendage effectués sur des éprouvettes cylindriques (15×30 cm) et de traction par flexion quatre points conduits sur des éprouvettes prismatiques (14×14×56 cm). Une attention particulière est portée sur le comportement pré-pic et post-pic des éprouvettes résultant de l'essai de traction par flexion. Les modes de rupture des fibres sont mis en évidence par des observations microstructurales (MEB) des échantillons après rupture en flexion.

Mots-clefs : Bétons autoplaçants, Fibres non-métalliques, performances mécaniques.

I. INTRODUCTION

Le développement et les avancées dans le domaine des bétons renforcés de fibres (BRF) ont permis la production de matériaux de plus en plus performants. La substitution des armatures en acier par des fibres, est donc devenue une alternative prometteuse pour remplacer ou réduire le taux de ferrailage des structures en béton armé (BA) et potentiellement améliorer leur durabilité dans un environnement, où la corrosion des armatures métalliques est inévitable à très long terme. Une telle solution est envisagée par l'ANDRA, pour la conception des vousseurs du futur centre de stockage souterrain (Cigéo) des déchets de Haute Activité (HA) et de Moyenne Activité-Vie Longue (MA-VL). Ce centre après fermeture, se situera dans un environnement très spécifique : période d'exploitation avec carbonatation atmosphérique (ventilation), puis dégradation chimique sous eau (condition d'exposition XA2) et sous chargement mécanique (convergence du milieu géologique). Le mécanisme de corrosion des armatures dans le cas du projet Cigéo est particulier. Compte tenu du milieu anoxique du centre stockage après fermeture,

les conditions au sein du béton sont telles que le scénario envisagé par l'ANDRA est un endommagement mécanique du béton en raison de la croissance de la couche d'oxyde à l'état passif. La vitesse de corrosion est lente en milieu alcalin (inférieure au $\mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$), cependant l'impact de la corrosion n'est pas négligeable en raison des échelles de temps mises en jeu. La pérennité de la structure doit être évaluée en estimant les pertes de performances et la dégradation des matériaux de construction. Ces données d'entrée servent ensuite à alimenter les simulations numériques visant à représenter la rupture des revêtements sur des échelles plurimillénaires et donc indirectement à évaluer l'extension de l'endommagement de l'argilite du collovo-oxfordien (Cox) garant du confinement des déchets. Au vu de la dangerosité des colis stockés, le matériau de construction doit donc être particulièrement adapté à cet environnement et doit répondre fortement au principe de durabilité.

La majorité des fibres employées pour le renforcement des structures en béton, sont métalliques en raison des grandes performances mécaniques qu'elles procurent à la structures, comparées à celles fournies par de nombreux types de fibres. Toutefois l'incorporation de ces fibres peut être problématique. En effet, ces fibres, pour un taux d'incorporation assez-important, augmentent le poids propre de la structure (Wang et al., 2021), réduisent la maniabilité du béton et favorisent la formation d'amas de fibres (Branston et al., 2016) ; donc création de zone de faiblesse affectant les performances mécaniques et les indicateurs de durabilité. Aussi, à très long terme, ces fibres sont vulnérables à la corrosion, ce qui met en cause la pérennité de la structure. En dépit de ces différentes problématiques, l'utilisation des fibres non métalliques peut être une solution assurant la maîtrise de la fissuration du béton et la reprise des efforts au droit des fissures tout en améliorant la durabilité de l'ouvrage, puisque ces fibres, en plus d'avoir de faibles densités, ne sont pas soumises à la corrosion.

L'objectif du travail expérimental, présenté dans cet article, est donc d'évaluer l'apport mécanique des MiniBars™ fibres de basalte (BFRP) et verre-AR (GFRP) renforcées avec un polymère de type vinylester, sur les performances des bétons. L'étude porte sur des bétons autoplaçants fibrés (BAPF) avec variation du taux d'incorporation des fibres. Les fractions volumiques considérées dans cette étude sont 1%, 1,5% et 2%. Toutefois un béton sans renforts (béton de référence) est également considéré. Une attention particulière est accordée au comportement des bétons testés en flexion notamment en phase post-pic. De plus, les modes de rupture des fibres en flexion ainsi que l'interface matrice-fibres sont mis en évidence suite aux observations microstructurales MEB.

II. Programme expérimental

1. Matériaux et matériel utilisés :

Les investigations sont conduites sur sept groupes de bétons autoplaçants fibrés (BAPF), qui diffèrent par la fraction volumique (FV) et le type de fibres [tableau 1](#). Les fibres de l'étude (à l'exception de la densité) présentent les mêmes propriétés physiques et mécaniques [figure 1](#) : longueur = 43 mm, diamètre = 0,7 mm, densité (1,9 pour les fibres de basalte et 2,00 pour les fibres de verre) et une résistance à la traction > 1000 MPa. Les FV adoptées sont 1, 1,5 et 2% et les bétons sont référencés respectivement par B1, B1.5 et B2 pour les bétons renforcés avec les fibres de basalte (BAPF_{BFRP}) et G1, G1.5 et G2 pour les bétons renforcés avec les fibres de verre (BAPF_{GFRP}). Un béton sans renfort a également été formulé et considéré comme béton de référence (BR). Les bétons de l'étude ont en commun le même E/C = 0,392 (Camps, 2008) et pour tous les bétons, les graviers ont été substitués par les fibres. Ces différentes substitutions ont été faites dans le but de

compenser les pertes d'ouvrabilité engendrées par l'augmentation de la FV des fibres. Afin d'étudier l'influence des fibres sur les performances mécaniques des bétons, tous les paramètres, entrant dans le processus de formulation (constituants, processus de malaxage...), ont été maintenus constants, à l'exception de la quantité de superplastifiant. Les essais de résistance des bétons en compression et en traction par fendage, ont été menés sur des éprouvettes de dimensions 15×30 cm à 28 jours. Certains échantillons destinés aux essais de compression, sont instrumentés par quatre jauges de déformations (deux axiales et deux transversales) de 3 cm de longueur, et la vitesse de chargement a été prise égale 0,5 mm/min. Le comportement des bétons en flexion est évalué suite aux essais de flexion quatre points conduits sur des éprouvettes prismatiques 14×14×56 cm à 56 jours. Toutes les éprouvettes testées ont été conservées suivant les recommandations de la NF EN 12390-2.

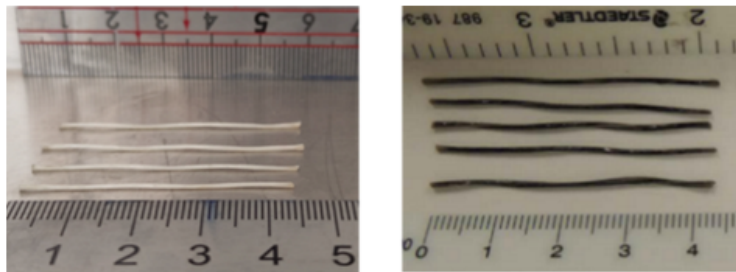


FIGURE 1. Les Fibres de l'étude, GFRP-AR (à gauche), BFRP (à droite)

TABLEAU 1. Propriétés physiques, rhéologiques et composition pour un m³ des bétons de l'étude

Constituants	BR	G1	B1	G1.5	B1.5	G2	B2
Gravier calcaire concassé 4/12 (kg/m ³)	710,2	683,6	683,6	670,3	670,3	657,1	657,1
Sable calcaire concassé 0/4 (kg/m ³)	976,6	976,6	976,6	976,6	976,6	976,6	976,6
Filler calcaire (bétoflow) (kg/m ³)	75	75	75	75	75	75	75
Ciment CEM I 52.5 N (kg/m ³)	475	475	475	475	475	475	475
Superplastifiant Tempo 9 (kg/m ³)	8,2	8,8	9,4	9,9	9,5	11,1	11,6
Fibre de verre (GFRP) (kg/m ³)	0	20	0	30	0	40	0
Fibre de basalte (BFRP) (kg/m ³)	0	0	19	0	28,5	0	38
Eau efficace (kg/m ³)	186,2	186,2	186,2	186,2	186,2	186,2	186,2
Étalement (cm)	55	66	55	56	53	55	55,5
Masse volumique théorique (kg/m ³)	2431	2425	2421	2420	2425	2423	2421
Masse volumique réelle (kg/m ³)	2421	-	2405	2360	2420	2417	2375

III. Résultats et discussion

1. Comportement en compression

Lors de la mise en charge des éprouvettes, on note l'apparition des microfissures sur les surfaces latérales provenant des contraintes de traction développées par effet poisson. Les déformations radiales, moins importantes que les déformations axiales génèrent des contraintes de traction entraînant l'apparition de ces fissures. L'expansion des microfissures sur les surfaces des

épreuves dépend du type de béton. L'analyse des faciès des BR [figure 2 \(a et b\)](#), montre une multitude de microfissures localisées à mi-hauteur des éprouvettes, due à une concentration de contrainte dans cette zone. La dispersion des morceaux de bétons sur la presse, atteste une rupture fragile de ces bétons. Cependant, l'ajout des fibres dans la composition des bétons, a entraîné une dispersion des fissures en assurant une répartition de ces dernières, tout au long de l'éprouvette. Elles ont diminué efficacement l'impact des déformations radiales engendrées par l'effort de traction. Ces éprouvettes font donc état de présence de fissures moins larges que celles observées sur les BR [figure 2 \(c et d\)](#).

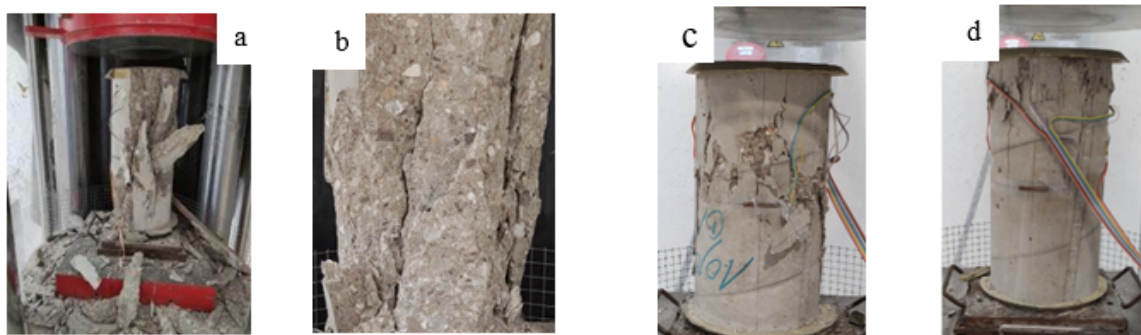
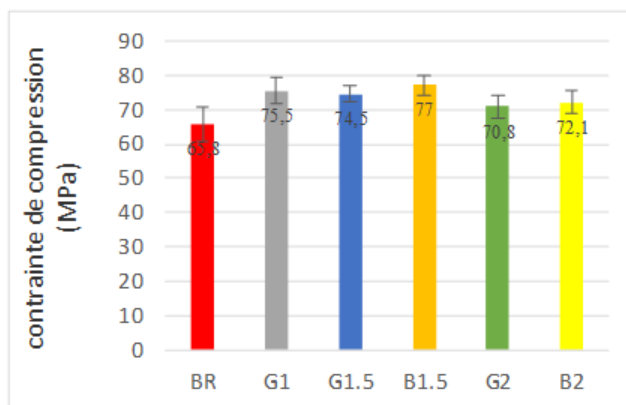


FIGURE 2. Faciès de rupture des éprouvettes après l'essai de compression uniaxiale, BR (a et b), BAPFGFRP (c), BAPFBFRP (d)

La [figure 3](#) montre que l'ajout des fibres influence la résistance à la compression des bétons selon le type et la FV des fibres. L'introduction de 1,5% et 2% de BFRP, augmente la résistance à la compression des bétons de 17% et 9,6% respectivement. Dosées à 1%, 1,5% et 2%, les GFRP améliorent les performances mécaniques à la compression des bétons de 14,7%, 13,2% et 7,6% respectivement. Toutefois, une diminution des taux d'amélioration des performances des bétons avec l'augmentation de la FV des fibres, est notée. L'évolution des modules de Young et du coefficient de Poisson est représentée par [figure 3 \(b et c\)](#). L'ajout des minibars a conduit à la réduction des valeurs du module d'élasticité et du coefficient de Poisson des bétons.



a

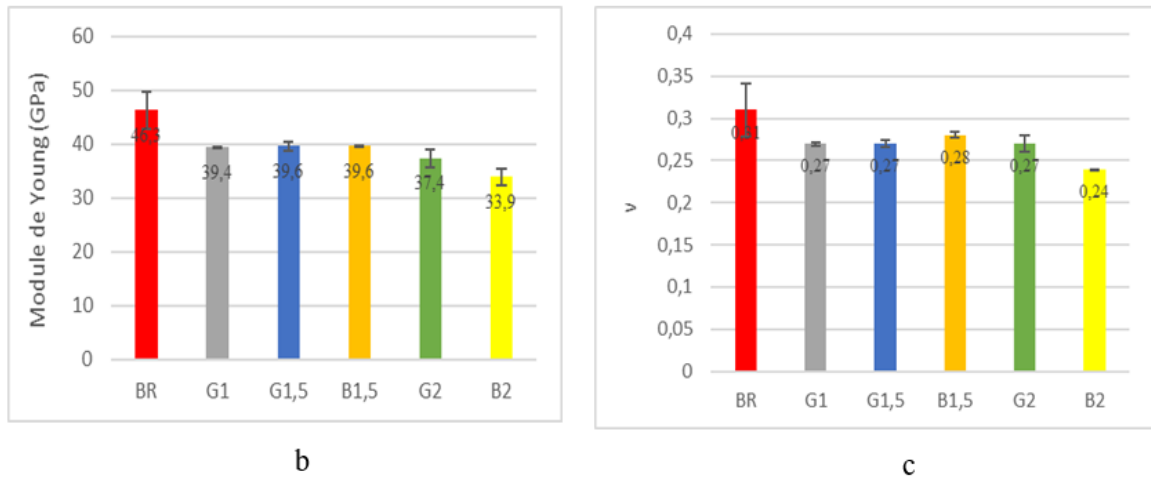


FIGURE 3. Résistance à la compression des bétons (a), module de Young (b), coefficient de Poisson (c)

Les fibres ont par contre modifié le comportement avant la rupture avec un accroissement de la partie non linéaire figure 4, témoignant de la multiplicité des microfissures et on peut observer globalement une augmentation de la déformation à la rupture en présence des fibres. Les éprouvettes pouvaient reprendre la charge même pour de larges plages de déformations. En d’autres termes, l’ajout des minibars améliore la ténacité des bétons en compression.

On peut également observer que les déformations volumiques des bétons de l’étude atteignent un minimum au-delà de 80% de la charge maximale pour ensuite augmenter très rapidement figure 4.b. Ce phénomène appelé dilatance, est dû à une expansion rapide des microfissures engendrées par effet Poisson.

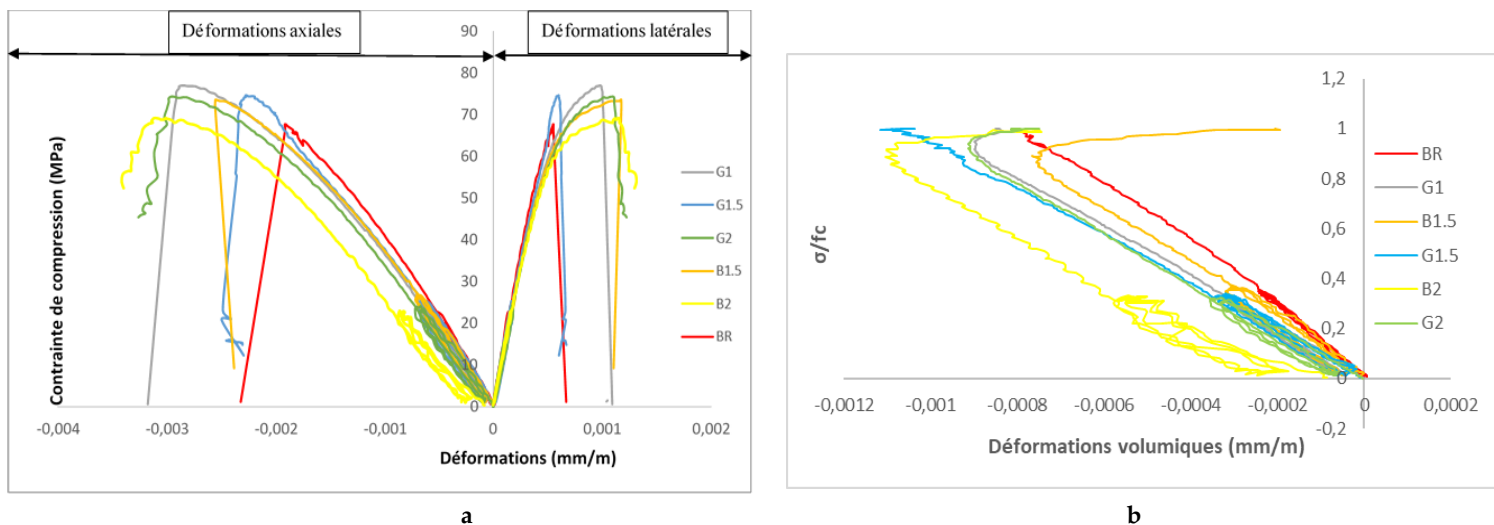


FIGURE 4. Evolution des contraintes de compression des bétons de l’étude en fonction des déformations axiales et latérales (a) et des déformations volumiques (b).

2. Comportement en traction par fendage :

L'analyse des faciès des éprouvettes après ruine en traction par fendage, indique différents modes de ruptures dépendant du type de bétons. Pour les bétons de référence (BR), la rupture a lieu suivant le long du plan de chargement et les deux parties des éprouvettes fendues ont été dispersées de part et d'autre de la presse, attestant le comportement fragile de ces bétons. Pour tous les bétons fibrés de l'étude, la propagation des fissures a suivi un chemin tortueux [figure 5 \(c\)](#). Les fibres se sont opposées efficacement à la fissuration des bétons et les deux parties de l'éprouvette fendue sont restées connectées par les fibres. La [figure 5](#) montre les différentes observations faites sur les faciès des éprouvettes fendues après rupture.

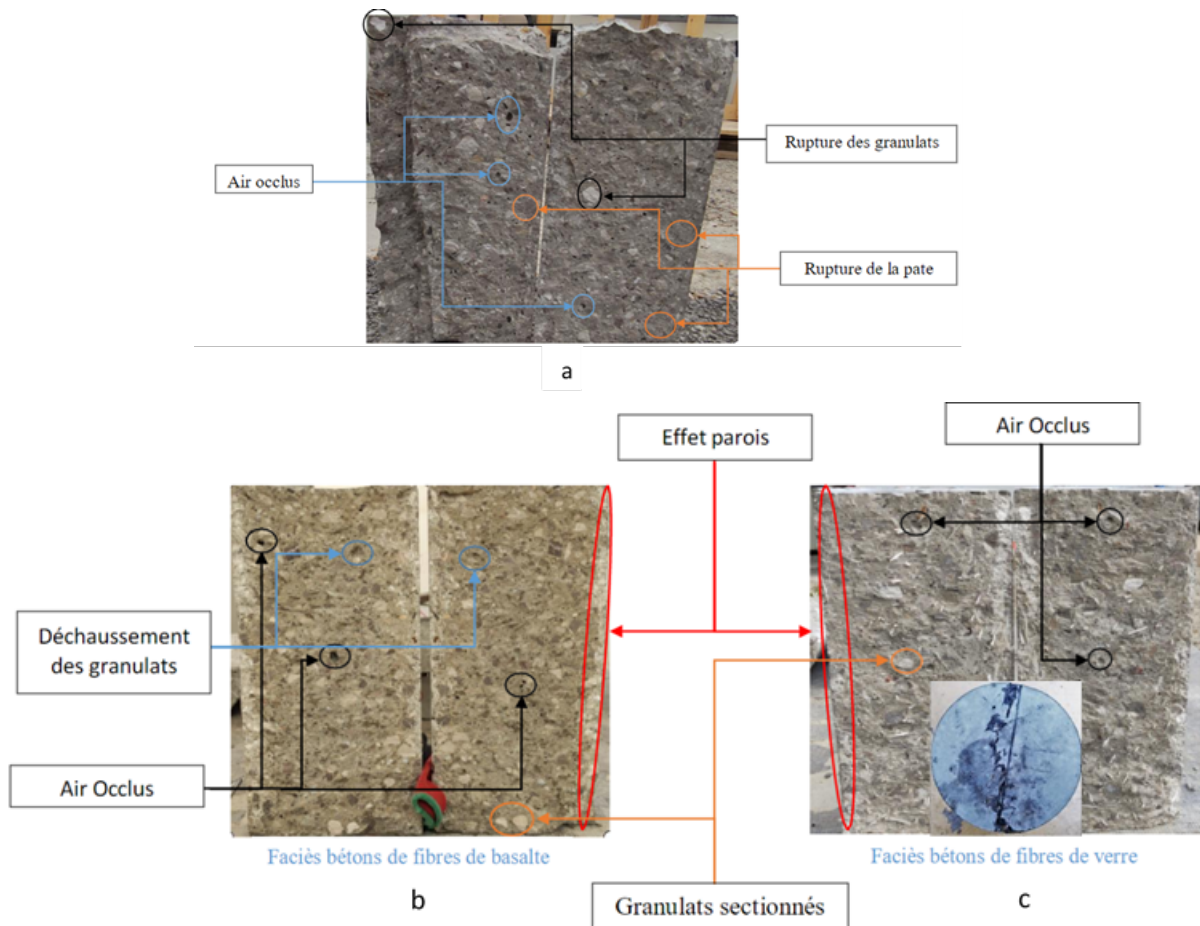


FIGURE 5. Faciès des BAPF après ruine en traction par fendage, BR (a) ; bétons avec les fibres de basalte (b), bétons avec les fibres de verre (c)

La [figure 6](#) montre que l'ajout des deux types fibres améliore la résistance à la traction des bétons selon le type et la FV des fibres. Les BFRP avec 1, 1.5 et 2% de FV ont amélioré la résistance à la traction de 52.3%, 50% et 52.3% respectivement. L'ajout des GFRP a entraîné une amélioration légèrement supérieure à celle des fibres de basalte (sauf avec 1% de FV). Avec 1, 1.5 et 2% de FV, elles ont augmenté respectivement la résistance à la traction par fendage des bétons de 28,5, 57,1% et 54,7%. On peut également observer que l'augmentation de la FV des fibres de basalte n'a pas d'effet significatif sur l'amélioration de la résistance à la traction par fendage des bétons, et quant

aux fibres de verre, à partir de $FV = 1,5\%$, une légère baisse de résistance est observée. Dans l'ensemble, les deux types de fibres ont presque les mêmes impacts sur les bétons en traction par fendage.

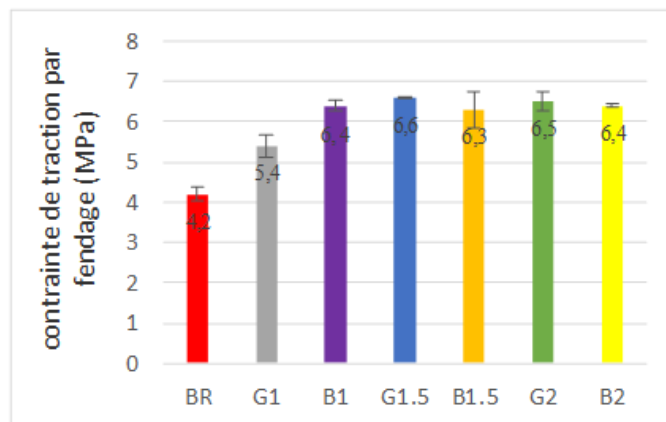


FIGURE 6. Résistances des bétons en traction par fendage

3. Comportement en flexion

Le comportement des bétons fibrés de l'étude en flexion peut être divisé en trois grandes phases données par la figure 7 ci-dessous :

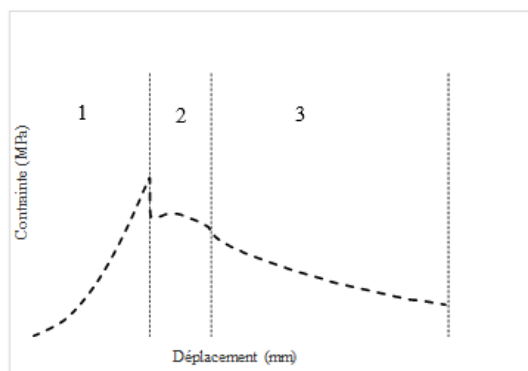


FIGURE 7. Comportement des bétons fibrés en flexion

Durant les premières phases de l'application de la charge, les éprouvettes prismatiques se déforment de manière quasi-élastiques (phase 1), montrant une montée quasi-linéaire des courbes contrainte-déplacement. Durant cette phase, les fibres n'interviennent pas, seule la matrice cimentaire régit le comportement des bétons fibrés. L'intervention des fibres n'est observée qu'à la fin de cette phase, c'est-à-dire après le début d'endommagement de la matrice, se caractérisant par la chute de la charge après l'apparition du premier pic. Cette chute atteste que la contrainte limite en traction de la matrice est atteinte et à ce niveau, une microfissure se localise entre les appuis supérieurs, conduisant à l'apparition de la macrofissure principale. Lorsque la contrainte limite de traction de la matrice cimentaire est atteinte, la reprise des efforts appliqués est assurée

par l'activation des fibres (phase 2). Pour cela, la FV, l'orientation, la distribution et le mécanisme d'adhésion des fibres jouent un rôle crucial. L'efficacité des fibres est certes améliorée par la qualité de la matrice cimentaire, notamment par sa compacité (Boulekbache et al., 2016), qui favorise une meilleure adhérence matrice-fibre, mais aussi par l'orientation et la répartition des fibres dans la matrice (Delsol, 2012) (Doyon Barbant, 2018). Deux observations sont faites pour les bétons de l'étude, et ces dernières dépendent essentiellement du type et de la FV des fibres. Les bétons renforcés avec des FV inférieures à 2%, présentent de légères reprises d'effort, et ces dernières demeurent inférieures à la contrainte atteinte au premier pic. Ceci indique un comportement quasi-fragile de ces bétons. D'autre part, pour une FV élevée (B2 et G2), un comportement durcissant est observé, indiquant le comportement ductile de ces bétons. Les contraintes résiduelles de ces bétons après la rupture de la matrice sont plus élevées que celles des bétons avec des FV inférieures. Toutefois, les meilleurs comportements en flexion sont obtenus avec les bétons renforcés avec 2% de fibres de verre. Il est important de noter que les minibars BFRP et GFRP n'améliorent pas les résistances à la traction par flexion. Comme le montre la figure 8, la résistance du BR est supérieure à celle des bétons fibrés.

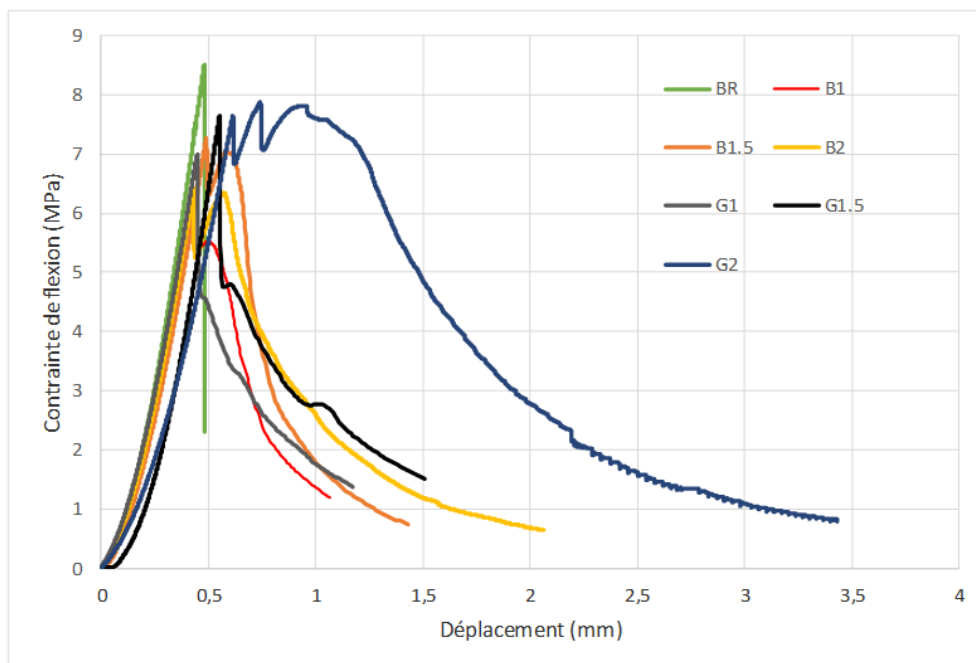


FIGURE 8. Evolution des courbes contraintes de traction par flexion en fonction des déplacements du plateau de la presse

Après cette phase, s'ensuit une rupture de pente sur les diagrammes, montrant l'ouverture importante de la macrofissure principale, correspondant à la dégradation du renforcement (phase 3). Cette dégradation est due à la rupture, à la perte d'adhésion ou à l'arrachement des fibres. La figure 10 montre deux modes de rupture de fibres : l'arrachement des fibres exprimé par les filaments presque dépourvus de polymère de renforcement. Cette absence de polymère est due au frottement matrice-fibre lors de la rupture de la matrice. La rupture (ou cassure) des fibres est imputée à la cassure des fibres lors des processus de malaxage des bétons. J. Branston et al

(Branston et al., 2016) ont rapporté que le comportement ductile du béton renforcé de MiniBars™, est dû à leur rupture progressive par arrachement. En se basant sur le meilleur comportement post-fissuration en flexion des bétons de l'étude, on peut déduire que les fibres de verre notamment à 2% de FV présentent plus d'arrachement comparé aux fibres de basalte. Cependant, la liaison matrice-fibre semble très difficile à analyser à partir des images MEB figure 10. Globalement, on observe des fibres avec une bonne adhérence avec la matrice et d'autres présentent une faible adhérence avec la matrice. Ces images mettent également en évidence la répartition plutôt périphérique des polymères sur les fibres.

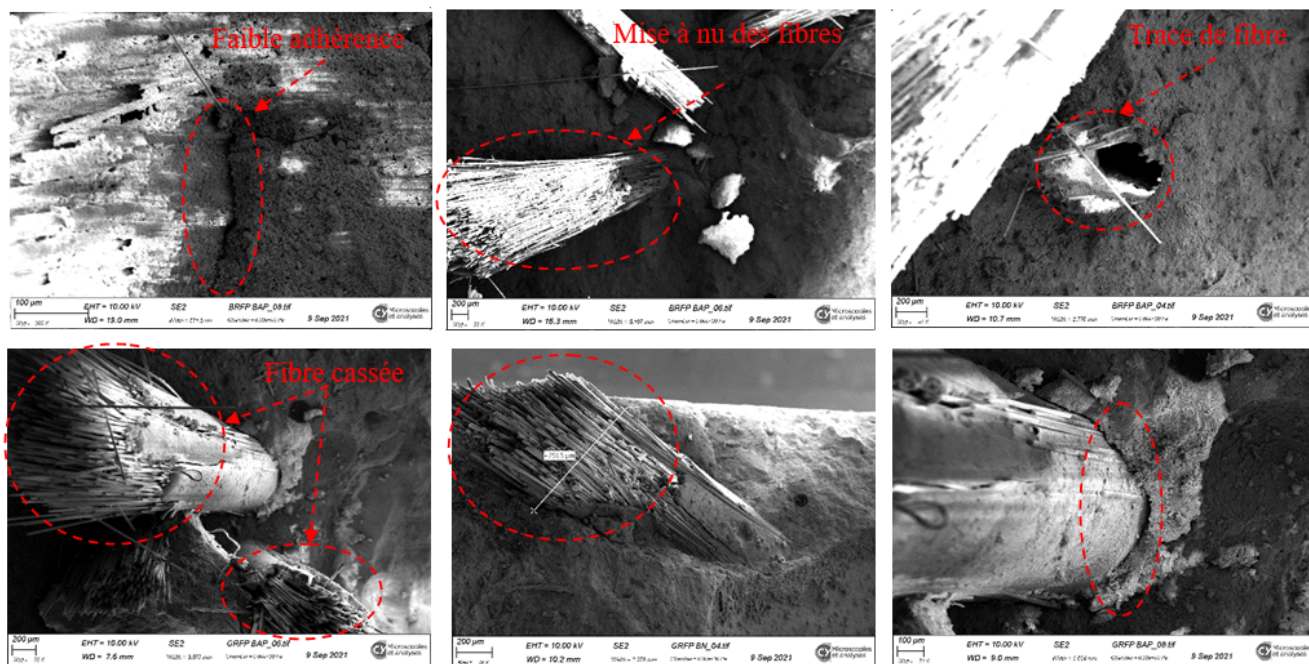


FIGURE 9. Modes de ruptures des fibres et interfaces matrices-fibres

4. Conclusion

Les conclusions présentées dans ce document sont basées sur les différents résultats obtenus dans cette étude, et sont les suivantes :

- L'augmentation de la FV des fibres a entraîné des problèmes d'obstruction de mouvement des bétons à l'état frais, due à l'agglomération des fibres. Cet encombrement de fibres a non seulement généré leur cassure (durant le malaxage) et l'augmentation de la quantité de superplastifiant (pour compenser la perte d'ouvrabilité), mais aussi une augmentation de la quantité d'air piégée par la grande taille des fibres (43 mm de long).
- Durant les sollicitations des bétons en compression, en traction par fendage et en flexion, les MiniBars™ fibres de verre-AR et de basalte modifient le mécanisme de fissuration des bétons, en empêchant les ruptures fragiles. Toutes les éprouvettes fibrées après rupture, restent presque monolithiques.
- L'ajout des MiniBars™ fibres de verre-AR et basalte dans les bétons, augmente les performances des bétons en compression. Les BFRP ont été plus efficaces en compression

comparées aux GFRP. Toutefois, des pertes de propriétés d'élasticité sont notées pour tous les bétons fibrés. La réduction des propriétés élastiques des bétons serait due à la substitution des graviers par des fibres (diminution du G/S) ou la quantité d'air entraîné par la grande taille des fibres (macrofibres) et l'augmentation de la quantité de superplastifiant avec les FV des fibres. La diminution du G/S entraîne l'augmentation de la porosité des bétons (Amriou et al., 2022). Or plus la porosité augmente, moins la déformation latérale augmente ; en d'autres termes, plus le module de Young et le coefficient de Poisson diminuent.

- En traction par fendage, les minibars BFRP et GFRP ont permis d'améliorer les résistances des bétons à hauteur de 50%. Toutefois l'augmentation des FV des fibres, n'a pas engendré une augmentation des performances des bétons. Dans l'ensemble, les fibres de verre ont été plus efficaces que les fibres de basalte.
- En flexion, tous les bétons ont les mêmes comportements en phase pré-pic (comportement quasi-élastique). Les comportements des bétons ne diffèrent qu'en phase post-pic. Le comportement des bétons en phase post-pic dépend essentiellement des taux d'incorporation des fibres. Plus ces derniers augmentent, plus les contraintes résiduelles après la chute de la charge du premier pic des bétons, augmentent. A cet effet, il serait très intéressant d'augmenter les FV des fibres (jusqu'à 4%), en vue d'envisager une substitution d'une partie des armatures métalliques en acier dans les bétons.

5. REFERENCES

- Amriou, A., Hocine, Z., Deboucha, S., Bencheikh, M., 2022. Effect of Gravel Content on Mechanical Performance and Porous Structure of Concrete. *Annales de Chimie Science des Matériaux* N° 46, PP 19-25.
- Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M., Amziane, S., 2016. Flexural behaviour of steel fibre-reinforced concrete under cyclic loading. *Construction and Building Materials* 126, 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.035>
- Branston, J., Das, S., Kenno, S.Y., Taylor, C., 2016. Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 124, 878–886. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.009>
- Camps, G., 2008. Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton (phd). Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- Delsol, S., 2012. Évaluation du coefficient d'orientation dans les bétons renforcés de fibres métalliques (masters). École Polytechnique de Montréal.
- Doyon Barbant, J., 2018. Impact de l'orientation des fibres sur les comportements en traction, en flexion et en cisaillement d'un béton renforcé de fibres métalliques (masters). École Polytechnique de Montréal.
- Wang, Q., Ding, Y., Randl, N., 2021. Investigation on the alkali resistance of basalt fiber and its textile in different alkaline environments. *Construction and Building Materials* 272, 121670. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121670>.