

Analyse croisée du comportement mécanique et de l’empreinte carbone dans des poutres en béton armé multicouche

Salma ES-SATTE^{1,2}, Syed Yasir ALAM¹, Jean-Michel TORRENTI^{3,4}, Ahmed LOUKILI^{1,2}

¹ Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, 1 rue de la Noë, Nantes 44321, France

² Chaire Edycem, 3 Rue Nicolas Sadi Carnot, 85600 Montaigu-Vendée

³ ESITC Paris, 79 Av. Aristide Briand, 94110 Arcueil, France

⁴ UMR MCD, Université Gustave Eiffel, F-77454 Marne-la-Vallée, France

RESUME

Dans un contexte de transition écologique, le secteur du BTP doit réduire son empreinte carbone, en repensant notamment les formulations et procédés de mise en œuvre du béton armé. Le coulage multicouche, combiné à l’utilisation de bétons différenciés (ordinaire et fibré), apparaît comme une solution prometteuse pour optimiser localement les propriétés mécaniques tout en limitant l’impact environnemental.

Cette étude propose une analyse croisée du comportement mécanique et de l’empreinte carbone de poutres en béton armé coulées en deux couches successives. Deux paramètres sont étudiés : la classe de résistance du béton et le taux de ferrailage. Des essais en flexion, couplés à un suivi de la fissuration par corrélation d’images, sont menés. L’empreinte carbone des différentes configurations est quantifiée à partir de facteurs d’émission des matériaux.

Les résultats permettent d’identifier des configurations optimisées conciliant performance mécanique et réduction de l’impact carbone, ouvrant la voie à une conception plus durable des structures en béton multicouche.

Mots-clefs Béton armé multicouche, Empreinte carbone, Optimisation structurelle, Conception durable

I. INTRODUCTION

Le secteur de la construction est l’un des plus émetteurs de gaz à effet de serre, contribuant à environ 38 % des émissions mondiales de CO₂, principalement en raison de la production de ciment et d’acier (International Energy Agency, 2023). Le béton armé, matériau central du BTP, est largement utilisé pour sa robustesse, sa durabilité et sa disponibilité. Toutefois, son empreinte environnementale reste élevée, notamment parce que la production de ciment représente à elle seule près de 8 % des émissions mondiales (Andrew, 2018). Dans ce contexte, il devient essentiel de repenser les formulations et les méthodes de mise en œuvre pour concevoir des structures plus sobres et durables.

De récentes études ont mis en lumière le rôle crucial des choix de conception dans la réduction de l’impact carbone des ouvrages en béton. Olsson *et al.* (Olsson, et al., 2023) ont montré qu’une

combinaison d'ajustements dans la formulation des matériaux, les procédés de fabrication et les décisions structurelles pourrait permettre de réduire jusqu'à 76 % des émissions liées au béton, sans recourir à des solutions radicales ou coûteuses. Ce constat encourage le développement de solutions constructives innovantes, combinant performance mécanique et efficacité environnementale.

Le coulage multicouche, consistant à déposer successivement plusieurs couches de béton aux formulations différenciées, s'inscrit dans cette logique d'optimisation. Cette approche permet une gradation fonctionnelle des propriétés mécaniques, en adaptant les zones de la section aux sollicitations, ce qui ouvre la voie à une réduction ciblée des matériaux à forte intensité carbone. Toutefois, cette technique soulève des interrogations quant à la qualité de l'interface entre couches, son effet sur le comportement en flexion, ainsi que sur le développement de la fissuration. Dans cette logique, l'usage combiné du béton ordinaire et du béton fibré permet de tirer parti d'une configuration hybride, où les armatures en acier assurent la résistance en traction ultime et la rigidité globale, tandis que les fibres contribuent à la capacité post-fissuration, à la répartition diffuse des contraintes de traction et au contrôle de l'ouverture des fissures. Ce choix, plus pertinent qu'un renforcement par barres supplémentaires, s'inscrit dans l'approche de gradation fonctionnelle recherchée.

Dans cette étude, nous adoptons une approche expérimentale comparative, en analysant le comportement mécanique et l'empreinte carbone de poutres en béton armé bicouche, par rapport à des poutres monolithiques. Toutes les poutres ont été dimensionnées conformément à l'Eurocode 2 (CEN (European Committee for Standardization), 2004), afin de garantir une base commune de comparaison. Ce choix permet d'évaluer objectivement l'intérêt du coulage multicouche en termes de gain mécanique et de réduction carbone, à sollicitation équivalente.

L'évaluation environnementale est conduite à partir d'un bilan carbone simplifié, selon une approche cradle to gate (Munro, et al., 2024), en utilisant des facteurs d'émission spécifiques issus des bases INIES (INIES, 2024) et DIOGEN (DIOGEN, 2022). L'objectif est d'identifier des configurations efficaces, conciliant performances mécaniques et réduction de l'empreinte carbone, en vue de promouvoir une conception structurelle plus durable pour les ouvrages en béton armé.

II. MATERIAUX ET METHODE EXPERIMENTALE

A. Matériaux

Cette étude expérimentale repose sur deux formulations de béton : un béton ordinaire (BO), utilisé dans la zone comprimée ou sur l'ensemble de la section dans les poutres monolithiques, et un béton fibré (BF), appliqué exclusivement dans la zone tendue des poutres bicouches afin d'améliorer la résistance en flexion et de limiter l'ouverture des fissures.

Avec cette configuration hybride, les fibres métalliques participent également à la résistance ultime en flexion, en assurant un pontage efficace des fissures et en retardant la perte de portance après fissuration. Le choix du béton fibré plutôt que l'ajout d'une barre HA supplémentaire s'explique par la différence de mécanisme : une barre d'armature concentre localement la résistance, alors que les fibres offrent une répartition diffuse des contraintes de traction dans tout le volume de la zone tendue. Cette distribution homogène favorise un contrôle plus efficace de l'ouverture et de la propagation des fissures (CMOD), une meilleure robustesse post-fissuration, ainsi qu'une contribution à la résistance au cisaillement local le long des fissures. Ainsi, le recours aux fibres ne remplace pas les barres d'armatures, mais vient les compléter, en combinant leurs avantages respectifs dans une approche hybride.

Afin de faciliter la distinction visuelle entre les deux couches lors du coulage, un colorant a été ajouté au béton fibré à hauteur de 4 % du poids de ciment.

Les deux mélanges sont produits à partir des mêmes granulats naturels et du même ciment (CEM II/A-LL 42.5R CE PM), avec un rapport eau/ciment (E/C) de 0,55, et sont conçus pour atteindre une résistance caractéristique à 28 jours de 40 à 50 MPa.

Les tableaux 1 et 2 présentent les caractéristiques principales des matériaux utilisés pour la fabrication des deux types de béton employés dans cette étude : le béton ordinaire (BO) et le béton fibré (BF), respectivement utilisés dans les zones comprimées et tendues des poutres.

TABLEAU 1. Formulation du béton ordinaire (Kg/m^3)

Ciment	Eau	Sables	Graviers	Superplastifiant (SIKA)
351	195	858	1051	0,2 % du poids de ciment

Les caractéristiques mécaniques mesurées sur éprouvettes standard conservées à 20°C en ambiance humide sont les suivantes :

- Résistance moyenne à la compression à 28 jours : $46,2 \pm 0,9$ MPa
- Résistance en traction par fendage : $2,5 \pm 0,5$ MPa

TABLEAU 2. Formulation du béton fibré (BF) (Kg/m^3)

Ciment	Eau	Sables	Graviers	Superplastifiant (SIKA)	Fibres métalliques ¹
346	192	846	1036	0,4 % du poids de ciment	50

- Résistance moyenne à la compression : $51,3 \pm 3,4$ MPa
- Résistance en traction indirecte : $5,0 \pm 0,4$ MPa

Toutes les poutres sont armées longitudinalement avec des barres en HA500 nervurées de $\varnothing 12$ mm, pour un taux d'armature constant de 0,73 %, commun à toutes les configurations (monolithiques et bicouches). Des étriers $\varnothing 6$ mm sont espacés régulièrement sur la longueur pour maintenir le ferrailage en place pendant le coulage. Les barres longitudinales sont placées dans la zone tendue. Les 4 barres $\varnothing 12$ en partie supérieure au droit des appuis constituent des dispositions constructives (fermeture du cadre et armatures minimales en zone comprimée) sans rôle significatif dans la flexion étudiée.

Ce taux d'armature a été choisi afin de standardiser le comportement mécanique et d'isoler l'effet des matériaux et de la stratification dans l'analyse.

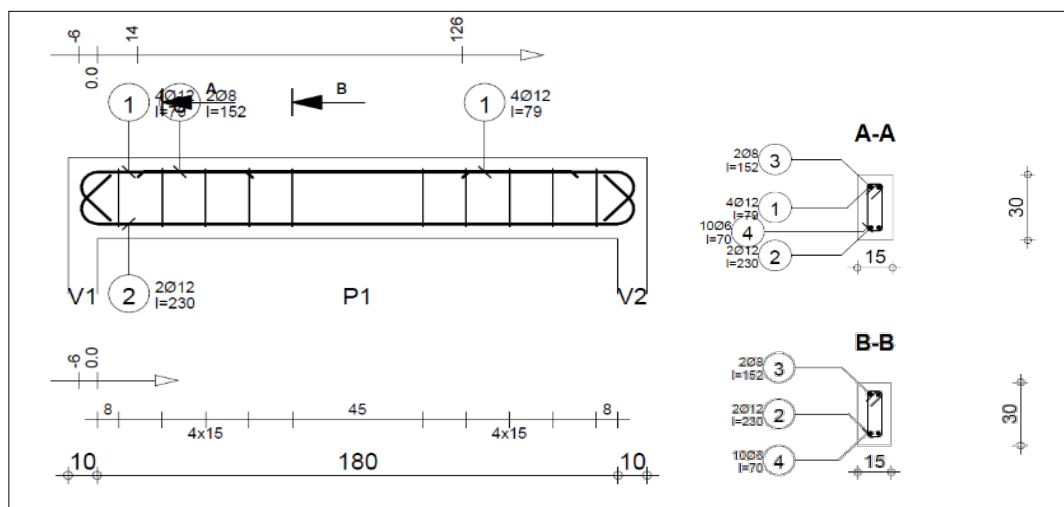


FIGURE 1. Détail de la disposition des armatures dans les poutres en béton armé.

¹ Fibres métalliques Dramix® 5D 65/60GG (Bekaert) (Bekaert, 2024)

B. Géométrie et configurations des poutres testées

L'étude expérimentale porte sur une série de poutres en béton armé de géométrie identique, conçues conformément aux prescriptions de l'Eurocode 2 (CEN (European Committee for Standardization), 2004), afin d'assurer une base de comparaison cohérente entre les différentes configurations testées. Chaque poutre présente une longueur totale de 2,0 m, une portée utile de 1,8 m, une largeur de 15 cm et une hauteur de 30 cm, avec un enrobage des armatures de 25 mm.

Deux types de configurations ont été étudiés :

- Des poutres monolithiques, coulées en une seule étape avec une formulation homogène de béton (béton ordinaire) ;
- Des poutres bicouches, coulées en deux temps successifs, combinant du béton ordinaire et du béton fibré.

Pour les poutres bicouches, le coulage a été réalisé selon un procédé frais sur frais, avec un temps de repos compris entre 20 et 30 minutes entre les deux couches. (Salma ES-SATTE, 2024)

Dans les poutres bicouches, le béton fibré a été positionné dans la zone tendue inférieure, tandis que le béton ordinaire a été réservé à la zone comprimée supérieure. Deux hauteurs de couche fibrée ont été testées, représentant $h/2$ (≈ 15 cm) et $h/3$ (≈ 10 cm) de la hauteur totale, respectivement désignées comme configuration B-1/2 et B-1/3.

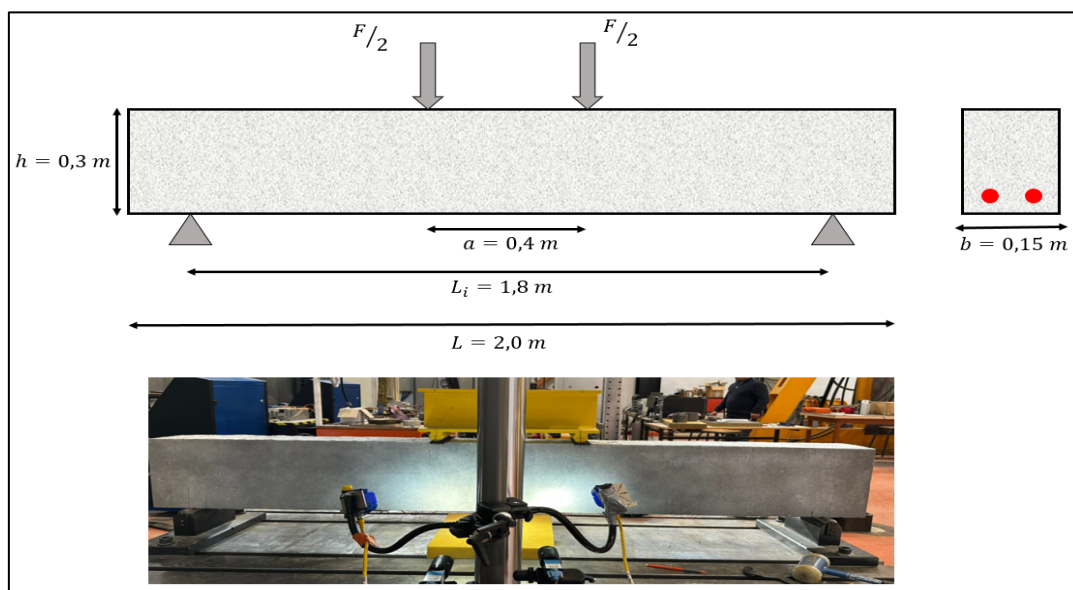


FIGURE 2. Schéma de l'essai en flexion 4 points et vue expérimentale

Les poutres bicouches ont été réalisées selon un protocole précis visant à garantir une interface de qualité entre les deux couches de béton. La première couche, composée de béton fibré, est coulée puis vibrée. Des plaques rigides en PVC, usinées avec une géométrie rectangulaire, sont ensuite insérées dans le béton frais et enfoncées sur 3 cm de profondeur afin de créer un profil rugueux à l'interface. Après un temps de repos de 20 à 30 minutes, ces plaques sont retirées, et la deuxième couche (béton ordinaire) est coulée puis vibrée à son tour.

Le choix d'un profil rectangulaire s'appuie sur sa facilité d'usinage, sa reproductibilité, et sa capacité à générer une adhérence mécanique efficace, conforme aux critères de surface "très rugueuse" définis par l'Eurocode 2 (EN 1992-1-1, §6.2.5) (CEN (European Committee for Standardization), 2004).

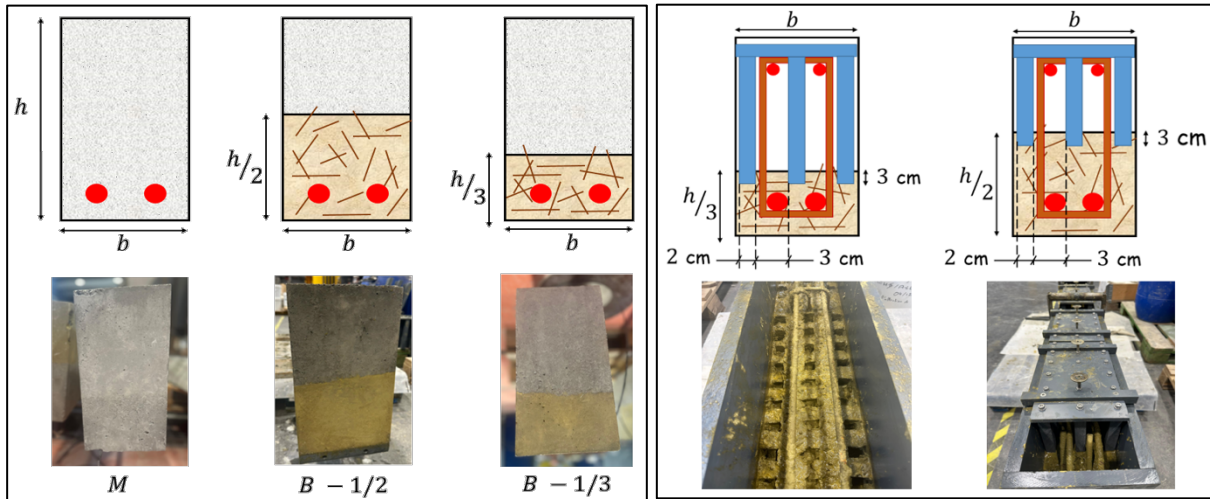


FIGURE 4. Configurations des poutres testées : M : poutre monolithique en béton ordinaire ; B-1/2 : béton fibré sur la moitié inférieure ($h/2$) ; B-1/3 : béton fibré sur le tiers inférieur ($h/3$).

FIGURE 3. Dispositif de création d'interface rugueuse dans les poutres bicouches.

C. Dispositif expérimental et instrumentation

Les essais sont menés sur une machine MTS en pilotage par déplacement du vérin, à vitesse constante (1 mm/min), jusqu'à rupture. La charge est transmise à la poutre via un palonnier rigide, garantissant une répartition équilibrée sur les deux points de chargement.

La fissuration est suivie par corrélation d'images numériques (DIC) appliquée sur une seule face de la poutre. Un motif aléatoire noir et blanc est préalablement appliqué sur la surface à observer. Deux caméras haute résolution capturent une image toutes les 1 seconde durant l'essai. Afin de couvrir toute la zone de fissuration, la caméra est légèrement inclinée ($\approx 10^\circ$) dans le plan horizontal, de manière à améliorer la visibilité de la face observée. Une correction géométrique est ensuite appliquée dans le traitement des images pour compenser cette inclinaison. Le traitement est effectué avec U.Freckles, un code open source en MATLAB, permettant d'extraire les champs de déplacement et d'analyser l'évolution de la fissuration (RETHORE, 2018).

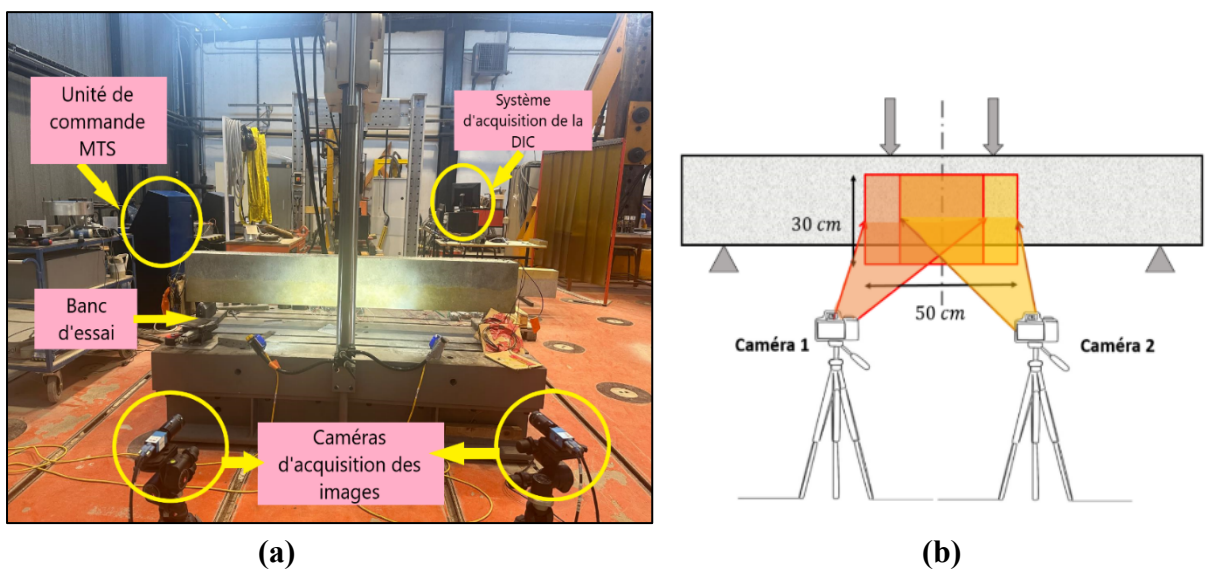


FIGURE 5. (a) Vue d'ensemble du dispositif expérimental. (b) Schéma de principe illustrant la zone observée (50 × 30 cm) par deux caméras VIC-2D)

III. RESULTATS EXPERIMENTAUX

A. Comportement global en flexion

La Figure 6 illustre les courbes Charge – Déplacement du vérin obtenues lors des essais en flexion quatre points réalisés sur les trois configurations de poutres testées : monolithique (M), bicouche avec béton fibré sur la moitié inférieure (B-h/2) et bicouche avec béton fibré sur le tiers inférieur (B-h/3). Deux essais ont été effectués pour chaque configuration.

Les résultats expérimentaux issus des essais en flexion mettent en évidence l'influence significative de la configuration des poutres sur leur comportement mécanique global.

Méthode d'évaluation : La ductilité est caractérisée par $\mu = \delta u / \delta y$, où δy est le déplacement correspondant à 75 % de la charge maximale, déterminé par l'intersection avec la pente initiale K_0 (régression sur 0–40 % de F_{max}), et δu est le déplacement au premier passage post-pic à 85 % de la charge maximale. L'énergie dissipée U est calculée comme l'aire sous la courbe Force–Déplacement jusqu'à δu , par intégration trapézoïdale. Avant ces calculs, les déplacements sont corrigés du jeu initial (décalage $\delta_0 = -b/a$). Les courbes présentées sont ensuite rebasées par translation pour améliorer la lisibilité, sans effet sur les indicateurs.

Résultats quantifiés : Les poutres monolithiques présentent une résistance maximale moyenne de $111,2 \pm 0,8 \text{ kN}$, une ductilité $\mu = 2,36 \pm 0,27$ et une énergie dissipée $U = 2393 \pm 136 \text{ J}$. Les poutres bicouches atteignent des résistances supérieures : $128,5 \pm 0,5 \text{ kN}$ pour B-h/2 (+15,6 %) et $130,1 \pm 1,0 \text{ kN}$ pour B-h/3 (+17,0 %). La ductilité est également améliorée, avec $\mu = 3,95 \pm 1,54$ pour B-h/2 (+67 %) et $\mu = 3,46 \pm 1,28$ pour B-h/3 (+47 %). L'énergie dissipée reste du même ordre, légèrement plus faible pour les configurations bicouches (–3 à –8 %).

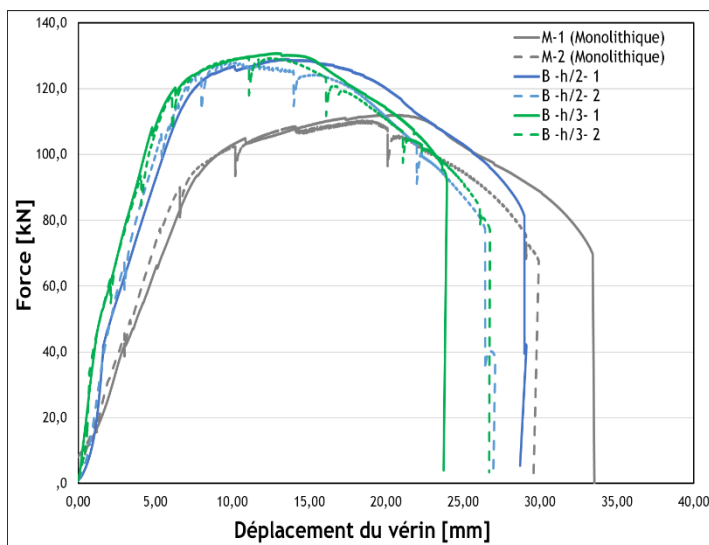


FIGURE 6. Courbes Charge – Déplacement pour les différentes configurations des poutres

TABLEAU 3. Charges maximales expérimentales et gains relatifs selon la configuration des poutres

Poutre	Charge maximale	Gain par rapport à la moyenne
M-1	112 kN	--
M-2	110 kN	--
B -1/2- 1	129 kN	+ 16%
B -1/2- 2	128 kN	+ 15%
B -1/3- 1	130,8 kN	+ 18 %
B -1/3- 2	128,4 kN	+ 17 %

Ces observations confirment l'intérêt du coulage multicouche, en adaptant localement la composition du béton aux sollicitations internes. La configuration B-h/3 se distingue comme une solution efficace parmi les variantes étudiées, combinant :

- Une rigidité suffisante avant fissuration,
- Un gain significatif en résistance maximale,
- Une amélioration de la ductilité,
- Une réduction du volume de béton fibré utilisé.

Ce compromis entre performance structurelle et sobriété matérielle met en lumière le potentiel du béton armé multicouche comme stratégie de conception durable, en particulier lorsque l'interface est soignée (surface rugueuse, coulage frais sur frais).

TABLEAU 4. Indicateurs de ductilité et d'énergie

Configuration	$F_{max}(kN)$	μ	$U(J)$
M (monolithique)	$111,2 \pm 0,8$	$2,36 \pm 0,27$	$2393,6 \pm 136,2$
B-h/2	$128,5 \pm 0,5$	$3,95 \pm 1,54$	$2314,5 \pm 163,2$
B-h/3	$130,1 \pm 1,0$	$3,46 \pm 1,28$	$2204,5 \pm 66,9$

Au-delà de la capacité ultime, l'augmentation de μ induite par les fibres traduit un pontage efficace des fissures et un transfert d'efforts plus progressif ; la proximité des valeurs de U avec M indique que ce bénéfice de ductilité s'obtient sans accroître l'énergie globale dissipée jusqu'à $0,85 \cdot F_{max}$.

B. Analyse de la fissuration

L'analyse de la fissuration a été menée à partir des courbes Charge – Ouverture de fissure extraites par

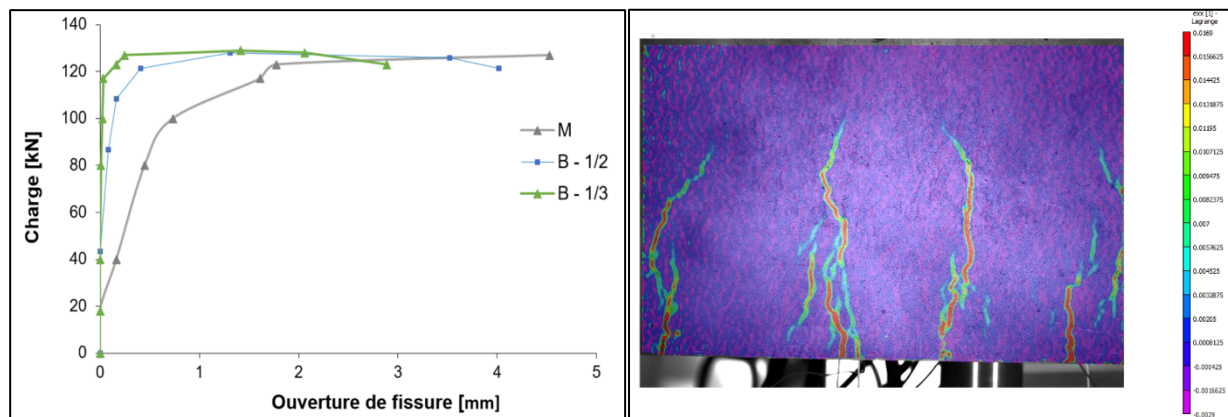


FIGURE 7. Évolution de la charge en fonction de l'ouverture de fissure (CMOD) obtenue par corrélation d'images numériques (DIC) pour les configurations M, B-1/2 et B-1/3.

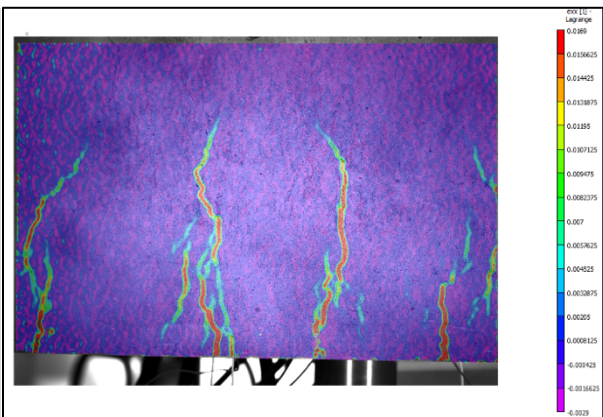


FIGURE 8. Cartographie des déformations longitudinales (exx) – DIC (Poutre B-h/3-2)

corrélation d'images numériques (DIC) sur les poutres monolithiques et bicouches. La Figure 7 présente l'évolution de la charge en fonction de l'ouverture de fissure (CMOD) pour les trois configurations testées : monolithique (M), bicouche avec béton fibré sur la moitié inférieure (B-1/2) et bicouche avec béton fibré sur le tiers inférieur (B-1/3).

Dans la configuration monolithique, la fissuration se développe progressivement avec une montée en charge relativement lente jusqu'à environ 1 mm de CMOD. L'ouverture des fissures continue ensuite de croître de manière soutenue, atteignant plus de 4 mm, traduisant une propagation non maîtrisée et une faible capacité à contrôler l'ouverture une fois amorcée. Ce comportement met en évidence une dissipation d'énergie limitée dans la zone tendue, et donc un risque plus élevé de dégradation à long terme.

À l'inverse, les poutres bicouches, grâce à l'apport de fibres métalliques dans la zone tendue, présentent un comportement nettement différent. La charge maximale est atteinte très rapidement, pour des ouvertures de fissure très faibles (CMOD < 0,1 mm), ce qui témoigne d'un contrôle précoce de la fissuration dès son apparition. Par la suite, l'ouverture est stabilisée ou évolue très lentement, avec un plateau de charge maintenu jusqu'à 2 à 3 mm de CMOD. Ce comportement illustre l'efficacité du

pontage des fissures par les fibres et la capacité du matériau à redistribuer les efforts autour des fissures sans perte de capacité portante significative.

Entre les deux configurations bicouches, la configuration B-1/3 se distingue par une fissuration encore mieux contenue malgré un volume réduit de béton fibré. Cette performance s'explique par une gradation fonctionnelle plus ciblée dans la zone tendue, permettant un contrôle optimal de l'ouverture tout en limitant la quantité de fibres utilisées.

Ces résultats confirment l'intérêt du coulage multicouche avec béton fibré localisé, non seulement pour améliorer la résistance maximale, mais aussi pour assurer un comportement post-fissuration plus stable et durable, en ligne avec les exigences des ouvrages soumis à des sollicitations de service répétées.

III. ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

Dans une démarche d'optimisation globale, cette section propose une analyse environnementale comparative des différentes configurations de poutres étudiées, en croisant les résultats mécaniques précédemment présentés avec les émissions de gaz à effet de serre associées aux matériaux utilisés. L'approche adoptée est de type "cradle-to-gate", prenant en compte les modules A1 à A4 de l'ACV, soit l'extraction des matières premières, leur transformation, le transport et la fabrication.

L'unité fonctionnelle considérée est le mètre linéaire de poutre de section 15 × 30 cm (soit un volume de 0,045 m³ de béton), ce qui permet de comparer les différentes variantes à performance structurelle équivalente.

Les facteurs d'émission utilisés sont les suivants :

- Béton ordinaire C40/50 (CEM II) : 271,1 kg CO₂/m³ (INIES, 2024))
- Fibres métalliques Dramix® 5D : 0,88 kg CO₂/kg (EPD Bekaert)
- Acier d'armature HA500 : 2,5 kg CO₂/kg (DIOGEN, 2024))

La quantité d'acier d'armature est maintenue constante pour toutes les poutres : 12 kg/mètre linéaire, soit environ 30 kg CO₂/m. Le volume de béton est également identique, seul le type de béton (ordinaire ou fibré) varie selon la configuration. Le béton fibré, utilisé uniquement dans la zone tendue, contient 50 kg/m³ de fibres métalliques.

TABLEAU 5. Émissions de CO₂ par mètre linéaire de poutre

Configuration	Béton (kg CO ₂)	Fibres (kg CO ₂)	Acier (kg CO ₂)	Total (kg CO ₂ /m)
Monolithique (M)	12,20	0,00	30,00	42,20
Bicouche h/2	12,20	0,99	30,00	43,19
Bicouche h/3	12,20	0,66	30,00	42,86

L'analyse environnementale montre que, pour une même géométrie et une quantité constante d'acier de base, l'ajout de fibres dans la zone tendue entraîne une augmentation limitée des émissions : +0,66 à +0,99 kg CO₂/m selon la hauteur fibrée, soit moins de 2,5 % par rapport à la poutre monolithique. Ce surcoût carbone reste modeste au regard des gains expérimentaux mesurés, en particulier pour B-h/3, qui enregistre une hausse de capacité portante de 18,8 % et un comportement post-fissuration plus favorable, avec une meilleure répartition des fissures.

Pour juger de l'intérêt environnemental, il est toutefois plus pertinent de comparer les configurations à performance équivalente. Atteindre la même résistance que B-h/3 avec une poutre monolithique nécessiterait d'augmenter l'armature longitudinale d'environ +2,16 kg/m (≈ 2 à 3 barres Ø12), ce qui

correspond à $+5,40 \text{ kg CO}_2/m$. À titre de comparaison, le recours au béton fibré n'entraîne qu'un surplus de $0,66 \text{ kg CO}_2/m$.

Cette confrontation met en évidence que l'option bicouche fibrée permet d'atteindre la même capacité portante qu'une poutre monolithique renforcée, mais avec une empreinte carbone bien plus faible. Sur le plan structurel, ce raisonnement à performance visée est le plus pertinent, car il reflète la logique de dimensionnement réel. Dans ce cadre, B-h/3 apparaît comme une solution efficace, conciliant amélioration mécanique et sobriété carbone.

En définitive, cette analyse croisée souligne le potentiel du coulage multicouche comme stratégie d'éco-conception, en combinant performance structurelle et réduction de l'impact environnemental.

IV. CONCLUSIONS

Cette étude a mis en évidence le potentiel du béton armé multicouche comme solution innovante pour concilier performance mécanique et sobriété environnementale. À travers une campagne expérimentale rigoureuse, couplant essais en flexion, suivi de la fissuration par corrélation d'images numériques (DIC) et évaluation carbone, plusieurs configurations de poutres ont été comparées.

Les résultats montrent que les poutres bicouches, intégrant du béton fibré dans la zone tendue, présentent des performances supérieures à celles des poutres monolithiques, aussi bien en termes de résistance maximale que de comportement post-fissuration. La configuration B-1/3, avec une épaisseur réduite de béton fibré, s'est révélée particulièrement efficace : elle permet de contenir l'ouverture de fissure dès les premiers instants, de maintenir un plateau de charge prolongé après fissuration, et d'obtenir un gain mécanique allant jusqu'à 18 %.

Sur le plan environnemental, le surcoût carbone lié aux fibres ($< 2,5 \%$) reste limité. Surtout, lorsqu'on raisonne à performance équivalente, une poutre monolithique renforcée (M^+) nécessiterait environ $+2,16 \text{ kg/m}$ d'acier supplémentaire, soit $+5,40 \text{ kg CO}_2/m$, contre seulement $+0,66 \text{ kg CO}_2/m$ pour B-h/3. La solution bicouche fibrée apparaît ainsi comme une alternative plus sobre, permettant d'atteindre la même capacité portante avec un impact carbone nettement inférieur.

Ces résultats confirment l'intérêt d'une approche par gradation fonctionnelle ciblée, avec un coulage frais sur frais et une interface rugueuse soignée. Ce travail ouvre la voie à de nouvelles stratégies de conception durable en béton armé, combinant dimensionnement rationnel et efficacité matière. Des perspectives d'approfondissement pourraient inclure l'étude du comportement différé (fluage, retrait) de ces structures multicouches, ainsi qu'une modélisation numérique avancée pour valider leur comportement à plus grande échelle.

REFERENCES

Andrew, R. M., 2018. Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 1(10), p. 195–217.

CEN (European Committee for Standardization), 2004. Eurocode 2 – Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. Bruxelles: CEN.

DIOGEN, 2022. Base de données environnementales pour les matériaux de construction. Paris: CSTB.

INIES, 2024. Base de données environnementales pour les produits de construction et équipements. s.l.:s.n.

International Energy Agency, 2023. Global Status Report for Buildings and Construction 2023, Paris: United Nations Environment Programme (UNEP).

Munro, M., Firth, K., Orr, J. & Figueiredo, J., 2024. A critical review of embodied carbon classification schemes for concrete. *Case Studies in Construction Materials*, Volume 21, p. e04021.

Olsson, J. A., Miller, S. A. & Alexander, M. G., 2023. Near-term pathways for decarbonizing global concrete production. *Nature Communications*, 14(1), p. 4574.

RETHORE, J., 2018. U.FRECKLES: Open-source 2D Digital Image Correlation code for Matlab. [En ligne]

Available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1433776>

Salma ES-SATTE, S.-Y. A. J.-M. T. A. L., 2024. Functionally Graded Beams: A Parametric Study and Eco-design Methodology. Budapest, s.n., pp. 825-832.