

# Optimisation de l'impact gaz à effet de serre de poteaux en béton armé

Robine Calixte<sup>1,2</sup>, Jean Michel Torrenti<sup>1,3</sup>, Mélanie Chatenet<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ESITC Paris

<sup>2</sup> Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS

<sup>3</sup> Université Gustave Eiffel, Cerema, UMR MCD,

**RESUME** Le secteur de la construction est soumis à une pression croissante pour s'aligner sur les objectifs de durabilité, en particulier pour réduire les émissions de gaz à effet de serre associées à la construction en béton. Cette étude examine les impacts environnementaux de poteaux en béton armé en analysant l'interaction entre la résistance du béton, les pourcentages d'armature et les émissions de carbone incorporées. Les résultats révèlent qu'il est plus facile de réduire les émissions de carbone incorporées en utilisant du béton à haute résistance et en optimisant les pourcentages d'armature. Les résultats mettent en avant le rôle essentiel des ingénieurs structurels qui ont un rôle essentiel à jouer dans cette transformation en concevant aujourd'hui des structures durables.

**Mots-clefs** béton, armatures, CO<sub>2</sub>, poteaux

## I. INTRODUCTION

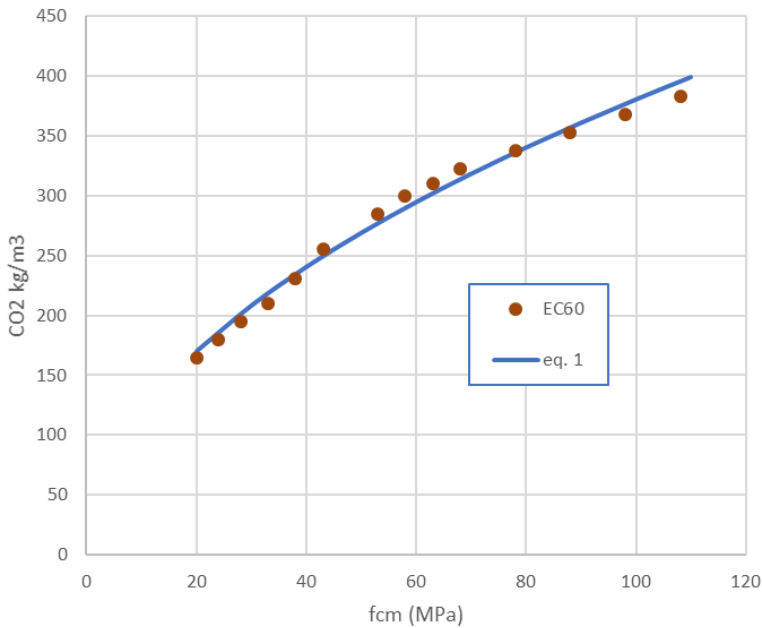
Le secteur de la construction est le plus grand consommateur de ressources naturelles. Par exemple, il utilise environ 65 % des minéraux non métalliques extraits (OCDE, 2018) et est responsable d'environ 34 % de la consommation mondiale d'énergie et de 37 % des émissions de gaz à effet de serre (PNUE, 2024). La croissance des populations urbaines s'accompagne d'une augmentation de leurs besoins en infrastructures et en logements (ONU, 2022). Le secteur de la construction doit donc redoubler d'efforts pour préserver notre planète.

La réduction des émissions des matériaux de construction, tels que le ciment, l'acier ou le verre, fait partie de la solution. Tous les secteurs industriels s'efforcent de réduire les émissions en vue d'atteindre l'objectif de zéro émission nette d'ici à 2050. L'industrie du ciment, par exemple, poursuit cet objectif (GCCA, 2020). L'utilisation d'additions cimentaires à la place du clinker fait certainement partie de la solution. Le développement de ciment contenant un mélange ternaire clinker, filler calcaire et argile calcinée en est un bon exemple (Scrivener et al., 2018). Toutefois, pour atteindre le niveau zéro, beaucoup de scénarii indiquent qu'il faudra investir massivement dans les technologies de captage et de stockage du carbone (CSC) ou d'utilisation du carbone (CCU). Le scénario de développement durable de l'Agence internationale de l'énergie (AIE, 2020) estime que 15 % des réductions d'émissions mondiales devront provenir du CSC ou du CCU, ce qui implique un investissement moyen de 510 milliards de dollars par an entre 2024 et 2030 (Salas, 2024). Mais le secteur des matériaux n'est pas le seul à devoir faire des efforts. Les ingénieurs concepteurs ont

également un rôle important à jouer et doivent contribuer à l'objectif commun de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES).

Pour les ingénieurs de bureaux d'études, la résistance à la compression du béton est un paramètre important. Pour évaluer l'impact environnemental d'un bâtiment ou d'une structure, les ingénieurs doivent comprendre la relation entre la résistance et le niveau de CO<sub>2</sub> d'un béton donné. Roussel et Habert (2009) ont démontré que, sur la base de considérations relatives à la composition des bétons, les émissions de CO<sub>2</sub> d'un mètre cube de béton varient en fonction de la racine carrée de sa résistance. Récemment, Arup (2023) a proposé un système de classification du carbone incorporé<sup>1</sup> pour le béton. Ce système fournit une relation entre la résistance à la compression et le carbone incorporé par m<sup>3</sup> et définit des classes de carbone incorporé (Munro et al., 2024). La figure 1 illustre cette relation pour une classe EC60, correspondant à un béton avec 60 % du carbone incorporé par rapport à une base de référence de 100 %. Cette classe est proche des valeurs médianes du béton utilisé au Royaume-Uni. La figure 1 montre que la relation entre la résistance à la compression et le carbone incorporé suit une loi de racine carrée. Dans ce document, nous supposons que le carbone incorporé ( $EC_c$ ) est proportionnel à la racine carrée de la résistance moyenne  $f_{cm}$ .

$$EC_c \text{ (kg CO}_2\text{/m}^3\text{)} = 38 f_{cm}^{0.5} \quad [1]$$



**FIGURE 1.** Relation carbone incorporé et résistance moyenne pour un béton EC60 (data de Kanavaris).

Pour les armatures, le carbone incorporé dépend de facteurs locaux tels que le pourcentage de matériaux recyclés ou l'impact CO<sub>2</sub> de l'électricité. Dans cette étude, basée sur les données de la base DIOGEN (<https://www.afgc.asso.fr/ressources/diogen/diogen/donnees-specifiques/>), deux cas sont considérés :  $EC_{s\_low} = 2.4 \text{ kg de CO}_2 \text{ eqvlt/kg}$  et  $EC_{s\_high} = 5 \text{ kg of CO}_2 \text{ eqvlt/kg}$ .

Dans le cas de poteaux non armés, en supposant que la section de béton évolue avec l'inverse de la résistance, Habert et Roussel (2009) concluent que le carbone incorporé d'un poteau en béton

<sup>1</sup> Le carbone incorporé correspond aux émissions de gaz à effet de serre associées à toutes les étapes du cycle de vie (fabrication, transport, utilisation et élimination).

diminue avec la racine carrée de la résistance. En considérant également l'armature, (Olsson et al., 2023) ont montré que le meilleur choix pour limiter le carbone incorporé dans un poteau est d'avoir un pourcentage d'armature minimal et la résistance la plus élevée (qui, dans le cas de cette étude, était limitée à 40 MPa).

Cet article traite de la conception de poteaux circulaires en béton armé du point de vue de leurs émissions de gaz à effet de serre (GES). Après avoir présenté les hypothèses utilisées pour une conception simplifiée, l'influence du pourcentage d'armature et de la résistance du béton est analysée.

## II. DIMENSIONNEMENT SIMPLIFIÉ D'UN POTEAU CIRCULAIRE

Une approche de conception simplifiée, basée sur l'annexe française de l'Eurocode 2 (EC2) (norme FD P18-717), est utilisée ici. Cette approche étant simplifiée elle est légèrement conservatrice, ce qui conduit à une légère surestimation des impacts. Ceci ne change pas qualitativement les résultats présentés. Enfin, la méthode est ici étendue pour tenir compte de l'utilisation de bétons à hautes performances (Thonier, 2024). Elle permet de concevoir directement des poteaux, ce qui n'est pas possible avec l'EC2 seul, où seule une vérification est possible. Les principales hypothèses pour le cas d'un poteau circulaire sont les suivantes :

- La méthode peut être appliquée aux poteaux bi-articulés dans le cas d'une charge centrée,
- L'effort normal résistant est exprimé par :

$$N_{Rd} = k_h k_s \alpha \left[ \frac{\pi D^2}{4} f_{cd} + A_s f_{yd} \right] \quad [\text{eq.2}]$$

où  $k_h$ ,  $k_s$  et  $\alpha$  sont des paramètres dépendant de la géométrie (voir annexe A),  $D$  est le diamètre du poteau,  $f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c$  avec  $f_{ck}$  la résistance caractéristique du béton,  $\gamma_c$  le coefficient partiel du béton (égal à 1,5),  $A_s$  la surface de section transversale des armatures et  $f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s$  avec  $f_{yk}$  la limite d'élasticité caractéristique de l'acier et  $\gamma_s$  le coefficient partiel de l'armature,

- L'armature minimale  $A_{s,min} = \max(0.002 A_c; 0.1 N_{Ed}/f_{yd})$  où  $N_{Ed}$  est la charge appliquée à l'état limite de service. Ce pourcentage minimal est là pour éviter une rupture fragile du poteau et reprendre les flexions parasites qui existent toujours (Perchat, 2017). Il ne sera donc pas possible de le réduire.

A partir de l'équation 2, pour un diamètre  $D$  donné du poteau, la section d'acier peut être déduite :

$$A_s = ((N_{Rd}/(k_h k_s \alpha)) - A_c f_{cd})/f_{yd} \quad [\text{eq.3}]$$

Ceci implique une résolution indirecte de cette équation. Et, pour un pourcentage donné d'armature  $A_s/A_c$ , le diamètre du poteau est déterminé :

$$D = \sqrt{\left[ \frac{N_{Rd}}{(k_h k_s \alpha)} - A_s f_{yd} \right] / \frac{\pi f_{cd}}{4}} \quad [\text{eq.4}]$$

Notez que dans l'équation 3, le paramètre  $k_h$  dépend de  $A_s$  et que dans l'équation 4, le paramètre  $\alpha$  est une fonction de  $D$ . La solution est obtenue en résolvant l'équation  $N_{Rd} = N_{Ed}$ .

### III. INFLUENCE DU POURCENTAGE D'ARMATURES

Dans cette section, le pourcentage d'armature est donné et le diamètre du poteau ainsi que les émissions de gaz à effet de serre sont calculés. Plusieurs cas sont considérés :

Cas 1 : immeuble de 5 étages, armatures à faible impact ( $EC_{s\_low}$ )

Cas 2 : immeuble de 5 étages, armatures à fort impact ( $EC_{s\_high}$ )

Cas 3 : immeuble de 50 étages, faible impact des armatures ( $EC_{s\_low}$ )

Cas 4 : immeuble de 50 étages, fort impact des armatures ( $EC_{s\_high}$ )

La force normale appliquée au poteau  $N_{Ed}$  dans un immeuble de 5 étages est supposée être égale à 6,75 MN et, dans un immeuble de 50 étages, elle est égale à 27 MN (valeurs définies par retour d'expérience). Dans ces cas, l'armature minimale est de 15,5 cm<sup>2</sup> (immeuble de 5 étages) et de 62,1 cm<sup>2</sup> (immeuble de 50 étages). Lorsque le pourcentage d'armature donne une section d'armature  $A_s$  inférieure à la valeur minimale, cette dernière est prise en compte pour le calcul. Une vérification de la condition sur l'élanement  $\lambda \leq 60$  est effectuée pour chaque calcul (voir annexe A).

Les autres hypothèses sont les suivantes :  $L=4$  m d'où  $L_0 = 0.7 L = 2.80$  m, enrobage du béton = 30 mm et  $f_{yk} = 500$  MPa. Une variation de la résistance caractéristique du béton entre 20 et 90 MPa est considérée.

Les tableaux 1 et 2 donnent des exemples de calcul pour deux pourcentages initiaux d'armatures :  $\frac{A_s}{A_c} = 0.2\%$  et  $\frac{A_s}{A_c} = 1.1\%$ . Pour le plus faible taux d'armatures, dans le cas 1, ce pourcentage initial d'armatures est inférieur au pourcentage minimal imposé par le terme  $0.1 \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$ . Comme indiqué précédemment, le diamètre D est obtenu en utilisant les armatures réelles (ici le pourcentage minimal). Lorsque  $\frac{A_s}{A_c} = 1.1\%$ , le pourcentage minimal s'applique uniquement pour  $f_{ck}=90$  MPa (tableau 2).

Les figures 2, 3, 4 et 5 montrent l'évolution du carbone incorporé total en fonction du pourcentage initial d'armature (avant application du pourcentage minimal lorsque cela est pertinent) pour  $f_{ck}$  variant de 20 à 90 MPa. Ces résultats montrent, pour tous les cas, que les émissions les plus faibles sont obtenues avec la résistance la plus élevée mais que, en raison de l'effet du pourcentage minimal d'armatures, l'effet de la résistance est limité. Mais les gains sont assez significatifs pour les plus faibles valeurs : lorsqu'on est au ratio minimal d'armatures, passer de 20 MPa à 40 MPa permet un gain de 13% sur le CO<sub>2</sub> (à partir des données du tableau 1). Au-delà il y a encore des gains mais ils sont moins importants (cf. figures 2 ou 3).

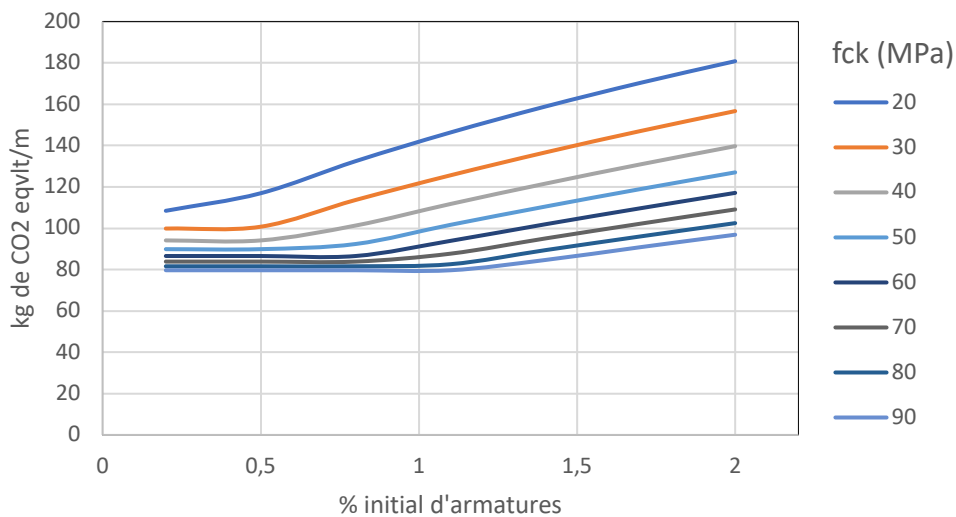
**TABLEAU 1. Exemple de résultats pour un rapport initial  $\frac{A_s}{A_c} = 0.2\%$  - cas 1**

$f_{ck}$ (MPa)	20	30	40	50	60	70	80	90
CO2 (kg/m <sup>3</sup> of concrete)	178.9	219.1	253.0	282.8	309.8	334.7	357.8	379.5
D(m)	0.75	0.64	0.57	0.52	0.49	0.46	0.43	0.41
$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	9	6	5	4	4	3	3	3
$A_{s\_real}$ (cm <sup>2</sup> )	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5
$A_{s\_real}/A_c$ (%)	0.35	0.48	0.60	0.72	0.84	0.95	1.06	1.16
CO2_steel(kg/m)	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1

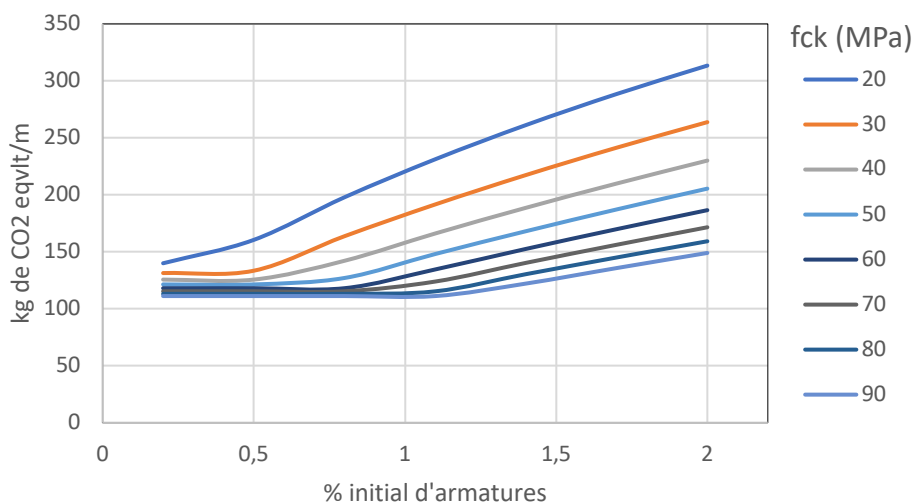
CO <sub>2</sub> _conc. (kg/m)	79.4	70.8	65.1	60.8	57.5	54.8	52.6	50.6
CO <sub>2</sub> _total (kg/m)	108.5	99.9	94.1	89.9	86.6	83.9	81.6	79.7

**TABLEAU 2.** Exemple de résultats pour un rapport initial  $\frac{A_s}{A_c} = 1.1\%$  - cas 1

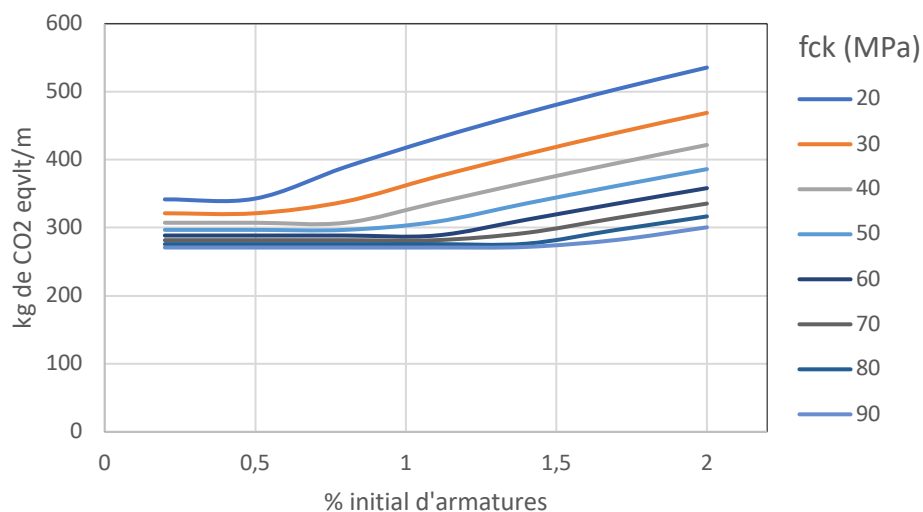
$f_{ck}$ (MPa)	20	30	40	50	60	70	80	90
CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> of concrete)	178.9	219.1	253.0	282.8	309.8	334.7	357.8	379.5
D(m)	0.70	0.61	0.56	0.51	0.48	0.45	0.43	0.41
$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	42	33	27	23	20	18	16	15
$A_{s\ real}$ (cm <sup>2</sup> )	42	33	27	23	20	18	16	15.5
$A_{s\ real}/A_c$ (%)	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.16
CO <sub>2</sub> _steel(kg/m)	78.3	60.8	50.1	42.8	37.5	33.4	30.1	29.0
CO <sub>2</sub> _conc. (kg/m)	68.0	64.8	61.6	58.8	56.4	54.3	52.4	50.6
CO <sub>2</sub> _total (kg/m)	146.3	125.6	111.7	101.7	93.9	87.7	82.6	79.6



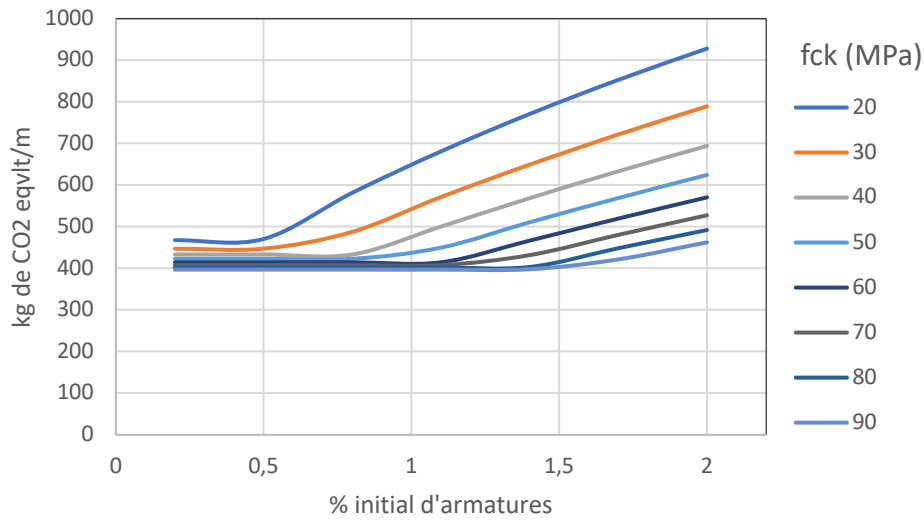
**FIGURE 2.** Variation du carbone incorporé dans 1ml de poteau en fonction de la résistance caractéristique du béton – cas 1. Le % initial d'armatures peut être plus petit que le % minimum qui est, dans ce cas, le % réel.



**FIGURE 3.** Variation du carbone incorporé dans 1ml de poteau en fonction de la résistance caractéristique du béton – cas 2. Le % initial d'armatures peut être plus petit que le % minimum qui est, dans ce cas, le % réel.



**FIGURE 4.** Variation du carbone incorporé dans 1m de poteau en fonction de la résistance caractéristique du béton – cas 3. Le % initial d'armatures peut être plus petit que le % minimum qui est, dans ce cas, le % réel.



**FIGURE 5.** Variation du carbone incorporé dans 1m de poteau en fonction de la résistance caractéristique du béton – cas 4. Le % initial d'armatures peut être plus petit que le % minimum qui est, dans ce cas, le % réel.

#### IV. INFLUENCE DE LA RESISTANCE EN COMPRESSION DU BETON

Les tableaux 3, 4, 5 et 6 présentent le carbone incorporé total pour les cas 1, 2, 3 et 4, respectivement. Les figures 6, 7, 8 et 9 montrent l'évolution du carbone incorporé en fonction de la résistance du béton pour différents pourcentages initiaux d'armatures. Ces résultats confirment la conclusion précédente : dans tous les cas, le carbone incorporé le plus faible correspond au pourcentage d'armature le plus faible combiné avec la résistance du béton la plus élevée. On constate aussi l'effet du pourcentage minimal qui est plus important lorsque la résistance du béton augmente.

**TABLEAU 3.** Carbone incorporé (kg de CO2 équivalent par m de poteau) en fonction du % (initial) d'armatures et de la résistance du béton – cas 1.

		fck (MPa)							
		20	30	40	50	60	70	80	90
As/Ac (%)	0.2	108.5	99.9	94.1	89.9	86.6	83.9	81.6	79.7
	0.5	117.0	100.7	94.1	89.9	86.6	83.9	81.6	79.7
	0.8	132.5	113.7	101.3	92.4	86.6	83.9	81.6	79.7
	1.1	146.4	125.6	111.8	101.7	93.9	87.7	82.6	79.7
	1.4	158.9	136.7	121.6	110.5	101.9	95.1	89.4	84.7
	1.7	170.3	147.0	130.9	119.0	109.7	102.2	96.0	90.8
	2	180.9	156.7	139.7	127.0	117.1	109.1	102.5	96.9

**TABLEAU 4. Carbone incorporé (kg de CO<sub>2</sub> équivalent par m de poteau) en fonction du % (initial) d'armatures et de la résistance du béton – cas 2.**

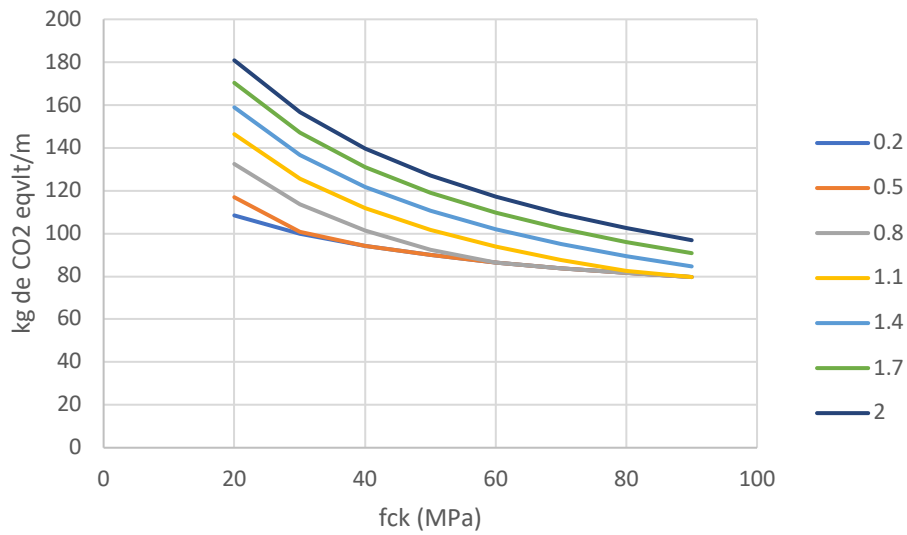
		fck (MPa)							
		20	30	40	50	60	70	80	90
As/Ac (%)	0.2	139.9	131.3	125.6	121.4	118.1	115.4	113.1	111.2
	0.5	160.5	133.4	125.6	121.4	118.1	115.4	113.1	111.2
	0.8	197.9	163.7	142.1	127.0	118.1	115.4	113.1	111.2
	1.1	231.2	191.6	166.1	148.1	134.5	123.9	115.3	111.2
	1.4	261.2	217.4	188.6	168.1	152.5	140.3	130.4	122.1
	1.7	288.5	241.4	209.9	187.2	169.9	156.2	145.0	135.7
	2	313.4	263.8	230.1	205.4	186.6	171.5	159.3	149.0

**TABLEAU 5. Carbone incorporé (kg de CO<sub>2</sub> équivalent par m de poteau) en fonction du % (initial) d'armatures et de la résistance du béton – cas 3.**

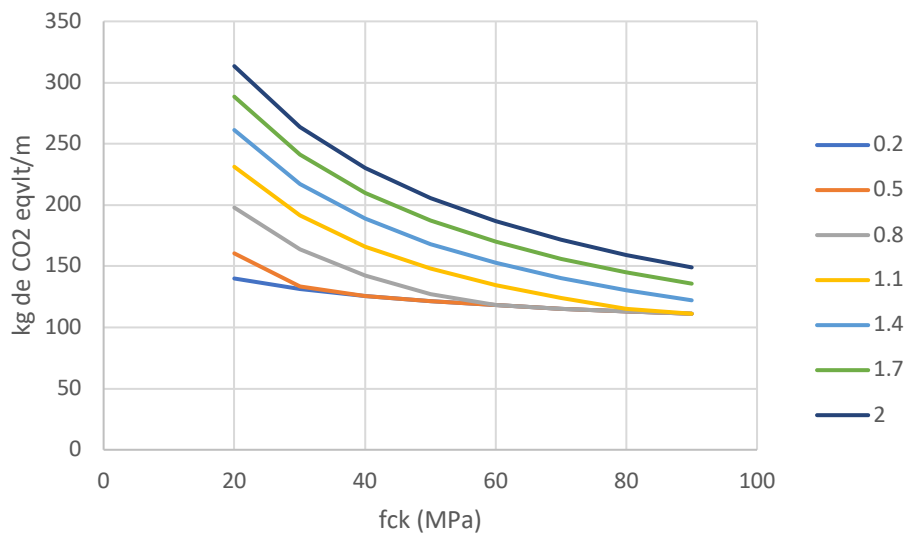
		fck (MPa)							
		20	30	40	50	60	70	80	90
As/Ac (%)	0.2	341.7	321.3	307.4	296.9	288.6	281.7	276.0	270.9
	0.5	342.9	321.3	307.4	296.9	288.6	281.7	276.0	270.9
	0.8	389.4	338.7	307.4	296.9	288.6	281.7	276.0	270.9
	1.1	431.2	374.8	336.7	308.8	288.6	281.7	276.0	270.9
	1.4	469.1	408.3	366.6	335.8	311.8	292.5	276.6	271.8
	1.7	503.7	439.6	394.9	361.6	335.5	314.4	296.9	282.1
	2	535.6	469.0	421.8	386.2	358.3	335.6	316.7	300.7

**TABLEAU 6. Carbone incorporé (kg de CO<sub>2</sub> équivalent par m de poteau) en fonction du % (initial) d'armatures et de la résistance du béton – cas 4.**

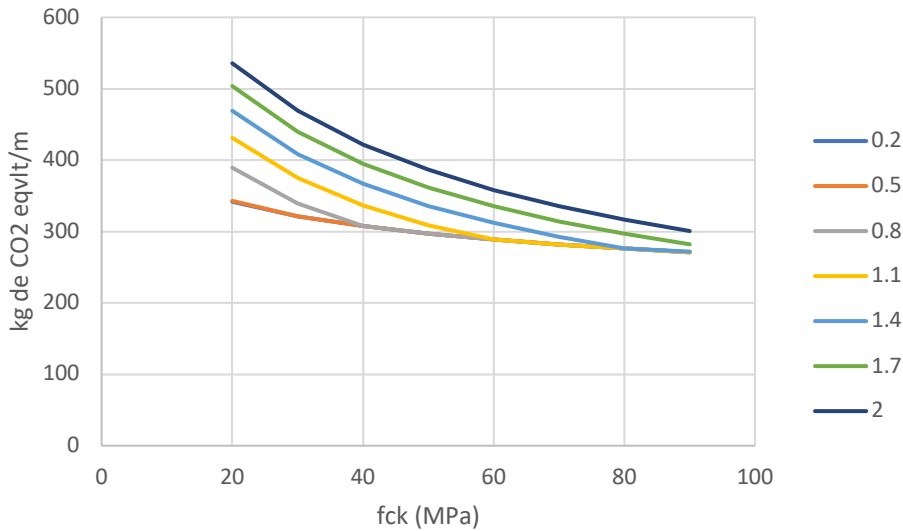
		fck (MPa)							
		20	30	40	50	60	70	80	90
As/Ac (%)	0.2	467.7	447.3	433.3	422.9	414.5	407.7	401.9	396.9
	0.5	470.5	447.3	433.3	422.9	414.5	407.7	401.9	396.9
	0.8	581.6	487.7	433.3	422.9	414.5	407.7	401.9	396.9
	1.1	681.1	571.5	500.4	449.7	414.5	407.7	401.9	396.9
	1.4	771.1	649.2	568.7	510.7	466.6	431.7	403.2	397.8
	1.7	853.0	721.7	633.3	568.9	519.6	480.4	448.3	421.5
	2	928.3	789.5	694.5	624.6	570.6	527.5	492.1	462.5



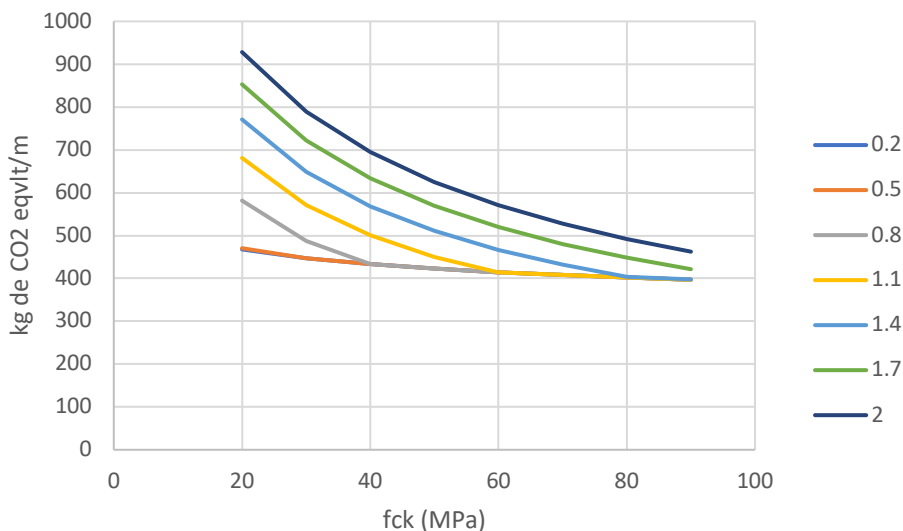
**FIGURE 6.** Variation du carbone incorporé (kg de CO2 équivalent par m de poteau) en fonction de la résistance caractéristique du béton et pour différents % (initiaux) d'armatures - cas 1



**FIGURE 7.** Variation du carbone incorporé (kg de CO2 équivalent par m de poteau) en fonction de la résistance caractéristique du béton et pour différents % (initiaux) d'armatures - cas 2



**FIGURE 8.** Variation du carbone incorporé (kg de CO2 équivalent par m de poteau) en fonction de la résistance caractéristique du béton et pour différents % (initiaux) d'armatures - cas 3



**FIGURE 9.** Variation du carbone incorporé (kg de CO2 équivalent par m de poteau) en fonction de la résistance caractéristique du béton et pour différents % (initiaux) d'armatures - cas 4

## V. DISCUSSION DES RESULTATS

Comme indiqué dans des études précédentes (Olsson et al., 2023), le carbone incorporé le plus faible dans une colonne en béton armé est toujours obtenu avec le pourcentage d'armature le plus faible et la résistance du béton la plus élevée. Notre étude complète la leur pour des résistances supérieures à 40 MPa. Nos résultats montrent que, en raison de l'exigence d'un pourcentage minimum d'armature, l'effet de l'augmentation de la résistance est limité. Cet effet est plus marqué pour l'immeuble de 50 étages car la quantité d'armatures minimale est proportionnelle à l'effort

appliqué aux poteaux. Malgré cette limitation, il existe tout de même un bénéfice significatif. Par exemple, le tableau 3 montre que pour  $\frac{A_s}{A_c} = 0.2\%$  dans le cas d'un immeuble de 5 étages et un faible niveau de carbone incorporé de l'acier (cas 1), une augmentation de la résistance de 20 à 40 MPa réduit le carbone incorporé de 13 %, et de 20 à 80 MPa de 25 %. Dans le cas de l'immeuble de 50 étages (cas 3), les résultats sont similaires : la réduction du carbone incorporé est de 10 % lorsqu'un béton de 40 MPa est utilisé au lieu de 20 MPa, et de 19 % dans le cas d'un béton de 80 MPa. Bien entendu, on peut aussi utiliser un béton haute performance lui-même bas-carbone ce qui permet de cumuler les gains.

Avec l'utilisation de béton à hautes performances, la durabilité est également améliorée. Dans ce cas, il est également possible de réduire l'enrobage du béton. Les déformations différées sont également plus faibles, ce qui pourrait être important pour un immeuble de 50 étages. En revanche, le comportement au feu peut poser problème, nécessitant potentiellement l'utilisation de fibres de polypropylène, qui ont un carbone incorporé de 3,4 kg de CO<sub>2</sub>/kg (Korol et al., 2020). Si 2 kg de fibres par mètre cube sont ajoutés au béton, cela augmenterait le carbone incorporé du béton de 7 kg/m<sup>3</sup>.

Le coût du béton pourrait également constituer un facteur limitant. En effet, à mesure que la résistance augmente, principalement en raison d'une teneur plus élevée en ciment, le coût par mètre cube, tout comme le carbone incorporé, augmente également. Obtenir des informations précises sur les prix du béton est difficile car, d'une part, il s'agit d'informations commercialement sensibles, et d'autre part, les prix varient localement. Quelques exemples sont disponibles dans la littérature, comme les données provenant d'Égypte (Rady et al., 2024) et du Brésil (Trentini et al., 2019). Les figures 10 et 11 montrent une variation presque linéaire dans les deux cas. Cela est cohérent avec les conclusions du projet BHP 2000 (PN BHP 2000, 2001).

L'utilisation de béton à hautes performances augmente le coût des poteaux. Cependant, comme indiqué dans la documentation du projet BHP 2000, avec le béton à hautes performances, le diamètre des poteaux est plus petit, ce qui génère une surface commercialisable supplémentaire. Par exemple, dans le bâtiment Cœur-Défense, qui compte 39 étages, l'utilisation de BHP pour les poteaux a permis une augmentation de 2 % de la surface commercialisable (PN BHP 2000, 2001). De plus, les poteaux plus légers réduisent les charges permanentes, ce qui a un impact positif sur la conception des fondations et le coût global du bâtiment.

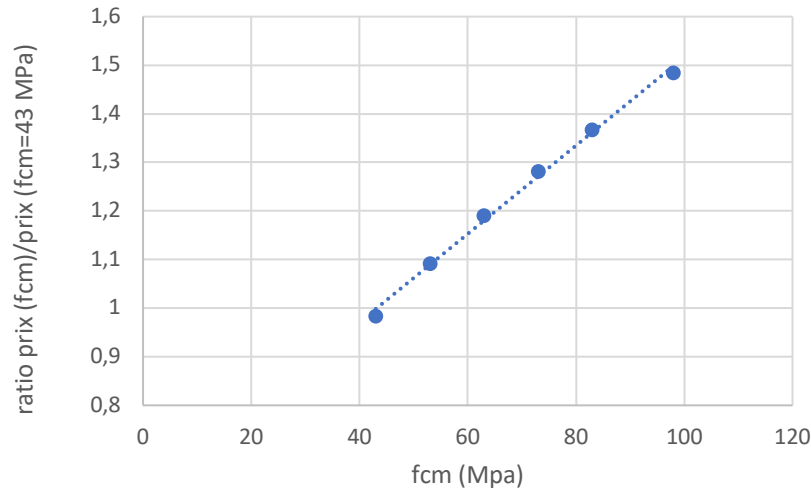


FIGURE 10. Evolution du prix normalise en fonction de la résistance (Rady et al., 2024)

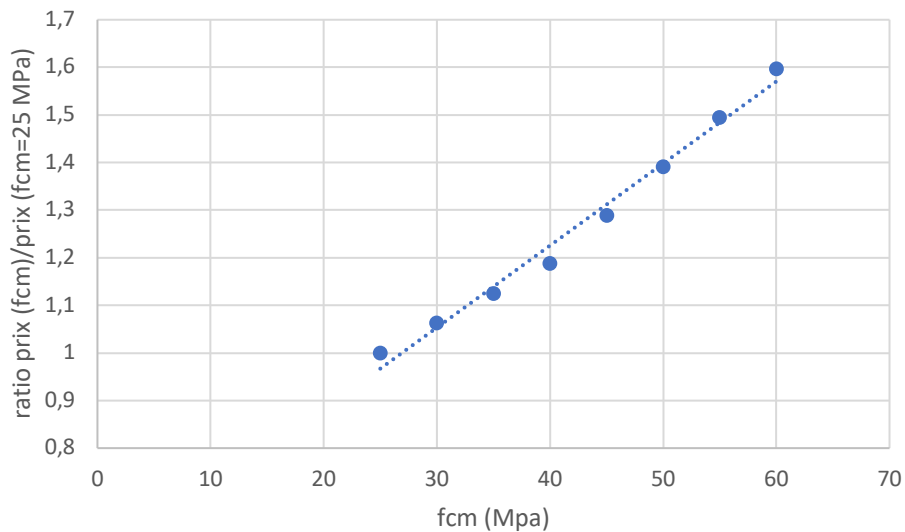


FIGURE 11. Evolution du prix normalise en fonction de la résistance (Trentini et al., 2019)

## VI. CONCLUSIONS

Le secteur de la construction fait face à un défi crucial consistant à équilibrer les besoins en infrastructures et en logements avec la nécessité de minimiser les impacts environnementaux. Cette étude met en évidence l'importance d'optimiser la conception structurelle, ici dans le cas des poteaux en béton armé, pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES). En analysant la relation entre la résistance du béton, les pourcentages d'armatures et le carbone incorporé, les résultats démontrent que pour atteindre le carbone incorporé le plus bas dans les poteaux en béton armé, une combinaison de résistance élevée du béton et d'une quantité d'armatures la plus faible possible est favorable.

Les contraintes pratiques telles que le pourcentage minimal d'armatures, les codes de conception et les considérations économiques peuvent limiter l'efficacité de ces optimisations. Les résultats soulignent la nécessité pour les ingénieurs de bureaux d'études d'adopter des pratiques de conception durable et d'intégrer l'éco-conception dans leurs projets. Les recherches futures devraient explorer des matériaux innovants, des méthodes adaptées et des conceptions optimisées pour réduire davantage l'empreinte carbone des structures en béton tout en maintenant la sécurité et la fonctionnalité. Les efforts collaboratifs à travers la chaîne de valeur de la construction sont essentiels pour atteindre les objectifs de neutralité carbone de l'industrie. Les ingénieurs de bureaux d'études jouent un rôle central dans cette transformation en concevant aujourd'hui pour la durabilité et en préparant les défis de demain.

### Remerciements

Les auteurs remercient Fragkoulis Kanavaris pour la fourniture des data concernant les classes environnementales des bétons (EC).

### REFERENCES

Arup, "Embodied Carbon Classification Scheme for Concrete," Arup Publications, London, UK, 2023, 25 pp. (<https://tinyurl.com/bdhrb6ba>)

Belizario-Silva, F., Galimshina, A., Reis, D. C., Quattrone, M., Gomes, B., Marin, M. C., ... & Habert, G. (2021). Stakeholder influence on global warming potential of reinforced concrete structure. *Journal of Building Engineering*, 44, 102979.

Favier, A., De Wolf, C., Scrivener, K., & Habert, G. (2018). A sustainable future for the European Cement and Concrete Industry: Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050. ETH Zurich.

FD P18-717, Eurocode 2 – Guidance on the application of Eurocode 2, AFNOR, 2021 (in French)

Feiri, T., Kuhn, S., Wiens, U., & Ricker, M. (2024). Designing for climate neutrality: Evaluation of reinforced-concrete slab systems in regard to emission reduction targets. *Journal of Building Engineering*, 95, 110220.

GCCA, Concrete Future – GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete, 2020, <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2022/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW-2022.pdf>

Habert, G., & Roussel, N. (2009). Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. *Cement and Concrete Composites*, 31(6), 397-402.

IEA, Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage CCUS in clean energy transitions, 2020, [https://iea.blob.core.windows.net/assets/181b48b4-323f-454d-96fb-0bb1889d96a9/CCUS\\_in\\_clean\\_energy\\_transitions.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/181b48b4-323f-454d-96fb-0bb1889d96a9/CCUS_in_clean_energy_transitions.pdf)

Kanavaris, F., Di Benedetto, G., Campbell, A., Gedge, G., & Kaethner, S. (2024, September). Reducing the embodied carbon of concrete-framed buildings through improved design and specification: Influence of building typologies, construction types and concrete mix. In *Structures* (Vol. 67, p. 107005). Elsevier.

Korol, J., Hejna, A., Burchart-Korol, D., & Wachowicz, J. (2020). Comparative analysis of carbon, ecological, and water footprints of polypropylene-based composites filled with cotton, jute and kenaf fibers. *Materials*, 13(16), 3541.

Matthews, S. L. (2023). fib Model Code 2020: Enabling advances for new and existing concrete structures. *Structural Concrete*, 24(4), 4341-4351.

Munro, M., Kanavaris, F., & Orr, J. (2024). A critical review of embodied carbon classification schemes for concrete. *Case Studies in Construction Materials*, e04021.

OECD, 2018. Global Material Resources Outlook to 2060: Economic drivers and environmental consequences. OECD publishing, Paris, [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2019/02/global-material-resources-outlook-to-2060\\_g1g98d7d/9789264307452-en.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2019/02/global-material-resources-outlook-to-2060_g1g98d7d/9789264307452-en.pdf)

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

Perchat J., *Traité de béton armé selon l’Eurocode 2, 3<sup>ème</sup> édition*, éditions Eyrolles, 2017.

PN BHP 2000 (2001), *Les bétons hautes performances – Guide pratique à l’attention des architectes et des maitres d’œuvres*, IREX.

Rady, M., Tawfik, A. B., & Alasow, A. A. (2024). Impact of unit prices on the optimal costs of reinforced concrete beams: A comparative study. *Journal of Engineering Research*, <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.01.002>

RE2020 (2024), [https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/guide\\_re2020\\_version\\_janvier\\_2024.pdf&ved=2ahUKEwih3LyP4PmJAxVOTKQEHf52DjwQFnoECBsQAQ&usg=AOvVaw3CXFDsQVCin tcFJ7F-9fti](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/guide_re2020_version_janvier_2024.pdf&ved=2ahUKEwih3LyP4PmJAxVOTKQEHf52DjwQFnoECBsQAQ&usg=AOvVaw3CXFDsQVCin tcFJ7F-9fti)

Salas E., *Global carbon capture and storage investment needs 2021-2030*, Statista, 2024, <https://www.statista.com/statistics/1490014/global-ccs-investment-requirements-net-zero/>

Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., & Maity, S. (2018). Calcined clay limestone cements (LC3). *Cement and concrete research*, 114, 49-56.

Thonier H., private communication, 2024.

Trentini, E. V. W., & Martins, C. H. (2019). Geometric optimization associated with the use of high-strength concrete in viaducts. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 12, 23-30.

UN, *Envisaging the Future of Cities, World Cities Report 2022*, [https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr\\_2022.pdf](https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr_2022.pdf)

UN environment program, Global Status Report for Buildings and Construction, 2024, [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/45095/global\\_status\\_report\\_buildings\\_construction\\_2023.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/45095/global_status_report_buildings_construction_2023.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

## ANNEX A

Dans la norme française FD P18-717 (Eurocode 2 – Calcul des structures en béton – Guide d’application des normes NF EN 1992), la force normale que peut supporter un poteau s’exprime par :  $N_{Rd} = k_h k_s \alpha \left[ \frac{\pi D^2}{4} f_{cd} + A_s f_{yd} \right]$ . Les paramètres  $k_h$ ,  $k_s$  et  $\alpha$  sont définis par les relations suivantes dans le cas d’un poteau :

$k_h = (0,5 + 0,7D) \cdot (1 - 8\rho \cdot \delta)$  où  $D$  est le diamètre du poteau,  $\rho = A_s \frac{\pi D^2}{4}$  est le pourcentage d’armatures longitudinales et  $\delta$  est le rapport entre l’enrobage (supposé égal à 30 mm) et le rayon du poteau. Comme ces paramètres ne sont pas connus avant le dimensionnement de la section, la norme FD P18-717 propose d’adopter  $k_h = 0.93$ . Mais dans notre cas, le solveur d’excel est utilisé afin de résoudre le problème sans imposer une valeur à  $k_h$ .

$k_s = 1$  pour  $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$  où  $f_{yk}$  est la valeur caractéristique de la limite élastique des armatures

$\alpha = \frac{0.84}{1 + \left(\frac{\lambda}{52}\right)^2}$  si  $\lambda \leq 60$  où  $\lambda = 4L_0/D$  est l’élancement avec  $L_0$  la longueur effective. Ici, on suppose que  $L_0 = 0.7 L$ .