

# Propriétés mécaniques et retrait de bétons à empreinte carbone réduite

Suzanne Le Thierry<sup>1</sup>, François Jacquemot<sup>1</sup>, Thomas Pernin<sup>1</sup>, Thomas Duval<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CERIB – Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du béton – Epernon, France

## RESUME

La réduction dans les bétons de la quantité de clinker par l'utilisation de ciments à faible teneur en clinker ou par la substitution d'une partie du ciment par des additions minérales constitue une piste pertinente à l'échelle du matériau pour réduire l'impact environnemental des solutions constructives en béton.

Cette étude présente les résultats d'un programme expérimental consacré à des bétons contenant de fortes teneurs en additions minérales de calcaire, de laitier de haut-fourneau et de métakaolin. Ils ont été caractérisés par des essais de compression, de traction par fendage et de retrait total de façon comparative avec un béton de référence.

**Mots-clefs** béton à empreinte carbone réduite, additions, compression, fendage, retrait

## I. INTRODUCTION

La réduction dans les bétons de la quantité de clinker associée à l'utilisation en substitution de ce dernier d'additions minérales constitue une des pistes les plus pertinentes à l'échelle du matériau pour réduire l'impact sur l'environnement des solutions constructives en béton. Ces liants à empreinte carbone réduite se distinguent par la réduction de la teneur en clinker des ciments ainsi que par le développement de liants binaires ou ternaires grâce à l'incorporation d'additions minérales telles que les laitiers de haut-fourneau, les métakaolins, les cendres volantes, les fumées de silice, les additions siliceuses et les additions calcaires. Ces matériaux offrent des opportunités intéressantes, non seulement en termes de réduction des émissions de carbone, mais aussi en matière de durabilité des ouvrages.

Différentes études ont montré que les bétons avec de fortes substitutions du clinker par des additions peuvent présenter des performances mécaniques et de durabilité comparables et même supérieures à celles de bétons sans additions (Megjigbodo et al., 2018) (Cardinaud, 2021). (Sharma et al., 2021) (Elkhadi et al., 2022) (Monadiri et al. 2022)

Les travaux présentés dans cet article ont été menés sur une vingtaine de béton contenant de fortes teneurs en additions calcaire, laitier de haut-fourneau et métakaolin. Ils ont été caractérisés par des essais mécaniques et des mesures de retrait total. Ces essais s'inscrivent dans le cadre d'une étude complète incluant également des essais de durabilité et de déformations instantanées

et différées présentés dans des publications antérieures (Pernin et al., 2024) (Le Thierry et al., 2025).

## II. PROGRAMME EXPERIMENTAL

Le programme expérimental a porté sur une vingtaine de formules de béton dont les liants sont répartis en trois catégories :

- Liants binaires clinker/calcaire,
- Liants ternaires clinker/calcaire/laitier,
- Liants ternaires clinker/calcaire/métakaolin.

Tous les bétons contiennent du ciment CEM II/A-LL 52,5 R contenant 9 % de calcaire. Le laitier est incorporé sous forme d'addition conforme à la norme NF EN 15167-1 et de classe A au sens de la NF EN 206/CN et le métakaolin sous forme d'addition de type A F<sub>M</sub> W<sub>M</sub> selon la norme NF P 18-513. Le calcaire est apporté en partie par le ciment mais également par une addition de type A-FM selon la norme NF P 18-508. Le dosage en liant total (ciment + addition) des bétons est compris entre 280 et 320 kg/m<sup>3</sup>. Le rapport eau efficace sur liant total est compris entre 0,38 et 0,58. Le dosage en superplastifiant a été ajusté afin d'obtenir un affaissement compris entre 160 et 210 mm. Les bétons ont été caractérisés par les essais détaillés dans le tableau 1. Le détail des compositions est fourni dans le tableau 2.

**TABLEAU 1.** Essais de caractérisation des bétons

Tests	Type d'éprouvettes	Echéances de mesures	Méthode d'essai
Résistance à la compression	Cylindres 11x22 cm, cure humide	1, 28 et 90 jours	NF EN 12390-3
Résistance à la traction par fendage	Cylindres 11x22 cm, cure humide	28 jours	NF EN 12390-6
Retrait total 20 °C – 50 % HR	Prismes 10x10x40 cm	Du démoulage à 24 heures jusqu'à 6 mois	NF EN 12390-16

## III. ESSAIS MECANIQUES

### A. Résistance à la compression

Les graphiques des figures 1 et 2 représentent la résistance à la compression à 28 jours en fonction du rapport eau efficace sur liant total et en fonction de la teneur en clinker dans le liant.

L'étendue des résistances mesurées s'explique par la diversité des compositions testées : différence de nature du liant, du dosage en liant et du rapport eau sur liant. Les résultats soulignent l'importance prédominante du rapport eau efficace sur liant sur la résistance. L'influence de la teneur en clinker du liant sur la résistance n'est pas mise en évidence ici en raison du fait que, dans ces travaux, le rapport eau efficace sur liant varie entre les compositions.

TABLEAU 2. Composition des bétons

Dosage en liant total (kg/m <sup>3</sup> )	Rapport eau efficace sur liant total	Teneur en clinker dans le liant	Teneur en laitier dans le liant	Teneur en métakaolin dans le liant	Teneur en calcaire dans le liant	Empreinte carbone du matériau (kg éq.CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )*	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)**
320	0,55	89%	-	-	11%	215	40,6
320	0,45	66%	-	-	34%	169	50,8
320	0,38	50%	-	-	50%	136	47,0
280	0,53	36%	60%	-	4%	97	51,7
280	0,53	45%	40%	-	15%	110	50,1
280	0,54	55%	34%	-	11%	128	33,1
320	0,50	35%	45%	-	20%	105	35,6
320	0,50	56%	34%	-	10%	151	55,4
320	0,50	45%	35%	-	20%	127	50,3
300	0,55	50%	-	30%	20%	139	35,5
320	0,50	50%	-	30%	20%	145	45,1
280	0,58	59%	-	20%	21%	134	38,4
280	0,58	59%	-	20%	21%	151	29,9
320	0,45	50%	-	20%	30%	143	60,3
320	0,50	60%	-	20%	20%	164	47,2
320	0,40	40%	-	20%	40%	124	48,5
320	0,50	50%	-	40%	10%	148	53,6

\* Calculée sur la base de l'empreinte carbone des constituants (hors transport) : 636 kg éq. CO<sub>2</sub>/t pour le CEM II/A-LL, 44 kg éq. CO<sub>2</sub>/t pour l'addition calcaire et 102 kg éq. CO<sub>2</sub>/t pour le laitier et 170 kg éq. CO<sub>2</sub>/t pour le métakaolin.

\*\*valeur moyenne mesurée sur 3 cylindres 11x22 cm.

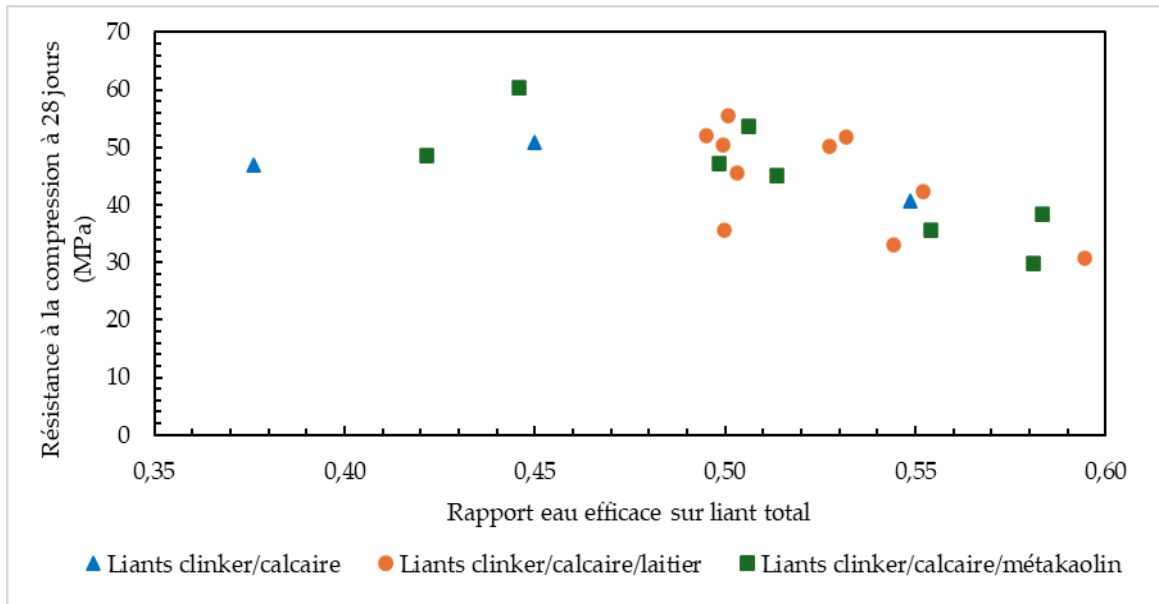


FIGURE 1. Résistance à la compression à 28 jours en fonction de du rapport eau efficace sur liant total

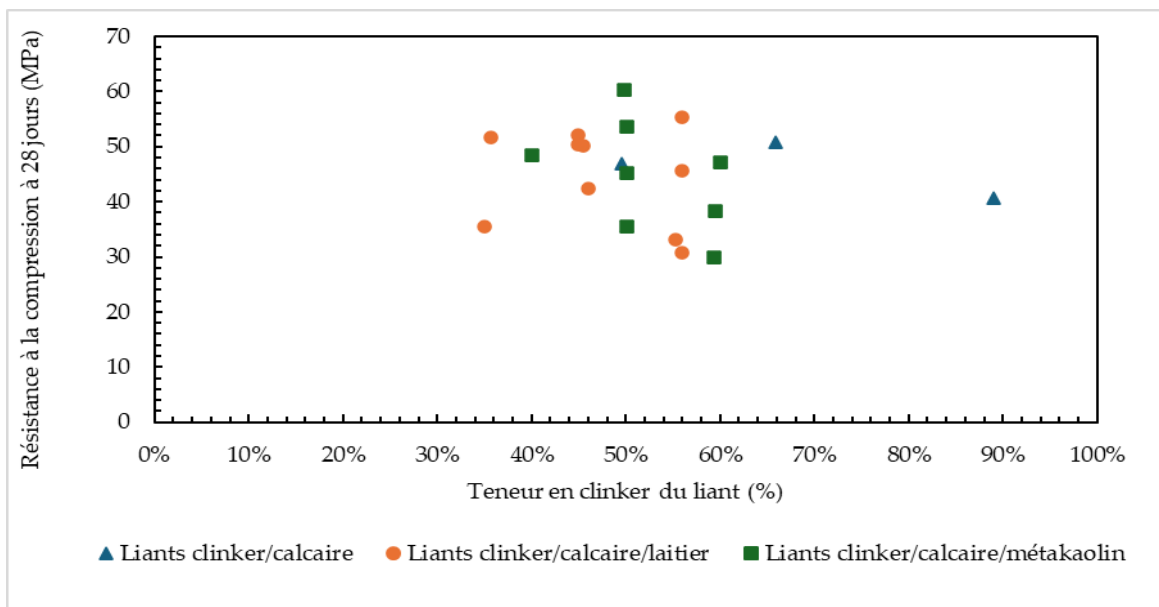


FIGURE 2. Résistance à la compression à 28 jours en fonction de la teneur en clinker dans le liant

Les graphiques des figures 3 à 8 représentent les rapports entre la résistance en compression à 1 jour et celle à 28 jours et entre la résistance en compression à 28 jours et celle à 6 mois en fonction de la composition des liants (teneur en clinker, teneur en laitier et teneur en métakaolin).

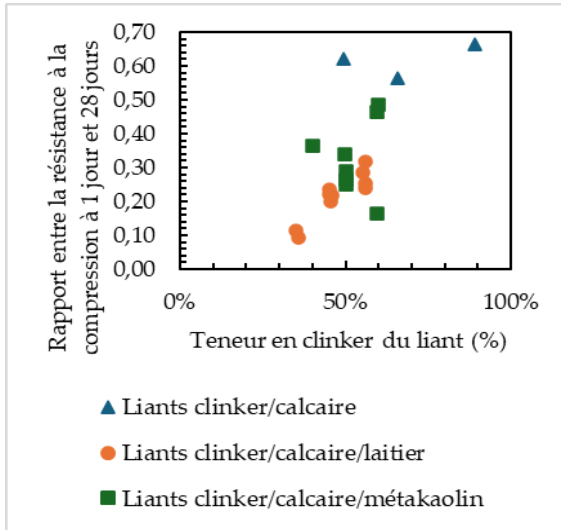


FIGURE 3. Rapport entre la résistance à la compression à 1 jour et celle à 28 jours en fonction de la teneur en clinker du liant

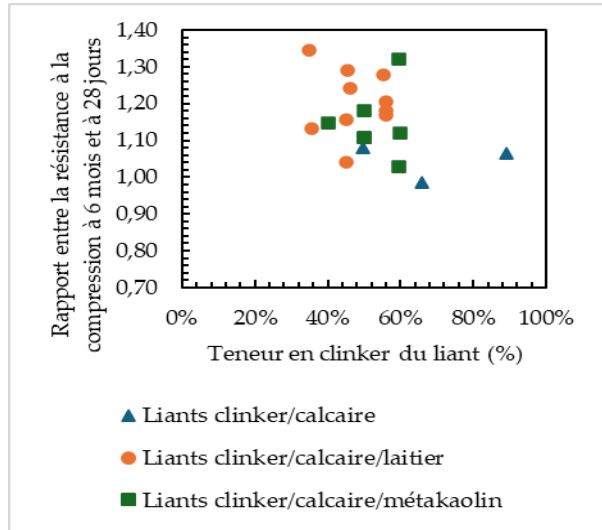


FIGURE 4. Rapport entre la résistance à la compression à 6 mois et celle à 28 jours en fonction de la teneur en clinker du liant

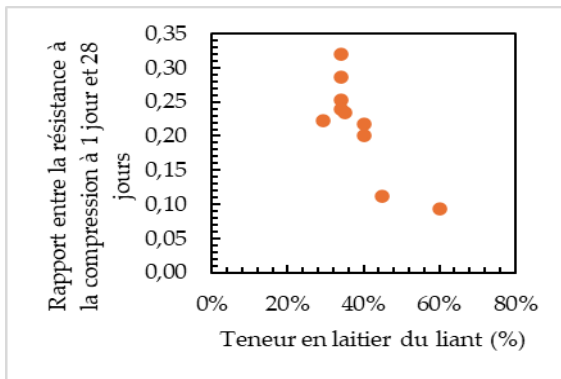


FIGURE 5. Rapport entre la résistance à la compression à 1 jour et celle à 28 jours en fonction de la teneur en laitier du liant

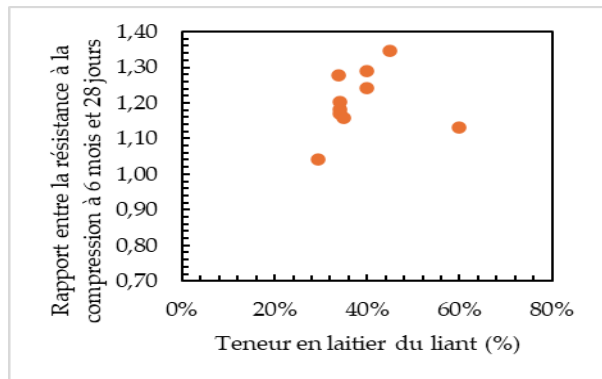


FIGURE 6. Rapport entre la résistance à la compression à 6 mois et celle à 28 jours en fonction de la teneur en laitier du liant

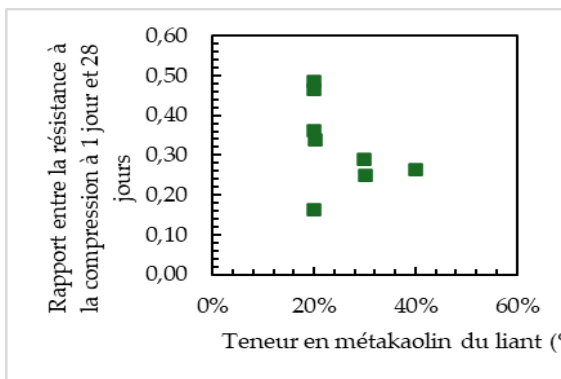


FIGURE 7. Rapport entre la résistance à la compression à 1 jour et celle à 28 jours en fonction de la teneur en métakaolin du liant

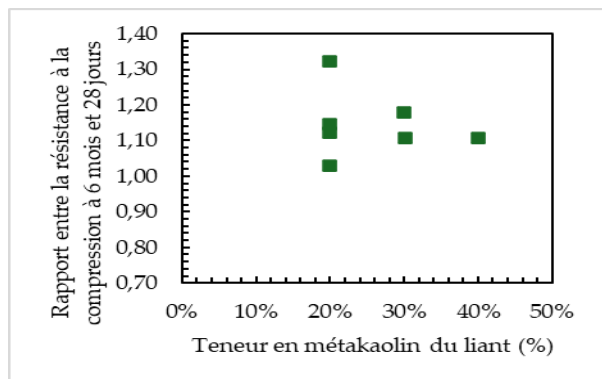
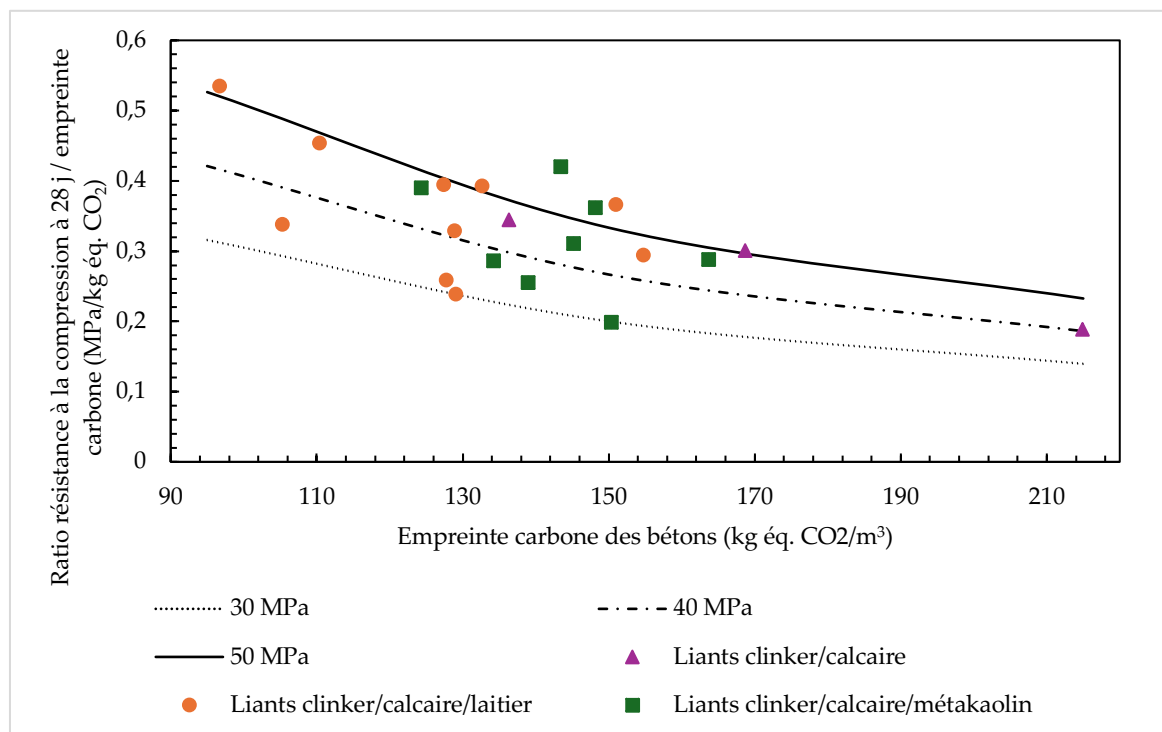


FIGURE 8. Rapport entre la résistance à la compression à 6 mois et celle à 28 jours en fonction de la teneur en métakaolin du liant

Les principales observations sont les suivantes :

- La résistance des bétons à base de liants binaires clinker/calcaire évolue peu après 28 jours (augmentation inférieure à 10 %).
- Les bétons à base de laitier de haut fourneau (liants ternaires clinker/calcaire/laitier) présentent la montée en résistance la plus lente, avec une augmentation de la résistance à la compression le plus souvent comprise en 15 et 30 % entre 28 jours et 6 mois ;
- Le comportement des bétons à base de métakaolin est intermédiaire entre les deux précédents.

Le graphique de la figure 9 présente le rapport entre la résistance à la compression à 28 jours et l’empreinte carbone du béton en fonction de l’empreinte carbone du béton. Cette représentation permet de mettre en évidence le rendement d’un kg de CO<sub>2</sub> émis vis-à-vis des propriétés mécaniques obtenus. On note que l’empreinte carbone est calculée ici uniquement sur la base de l’empreinte carbone des constituants (hors transport). Il confirme le potentiel des liants à faible teneur en clinker pour la réduction de l’empreinte carbone des bétons.



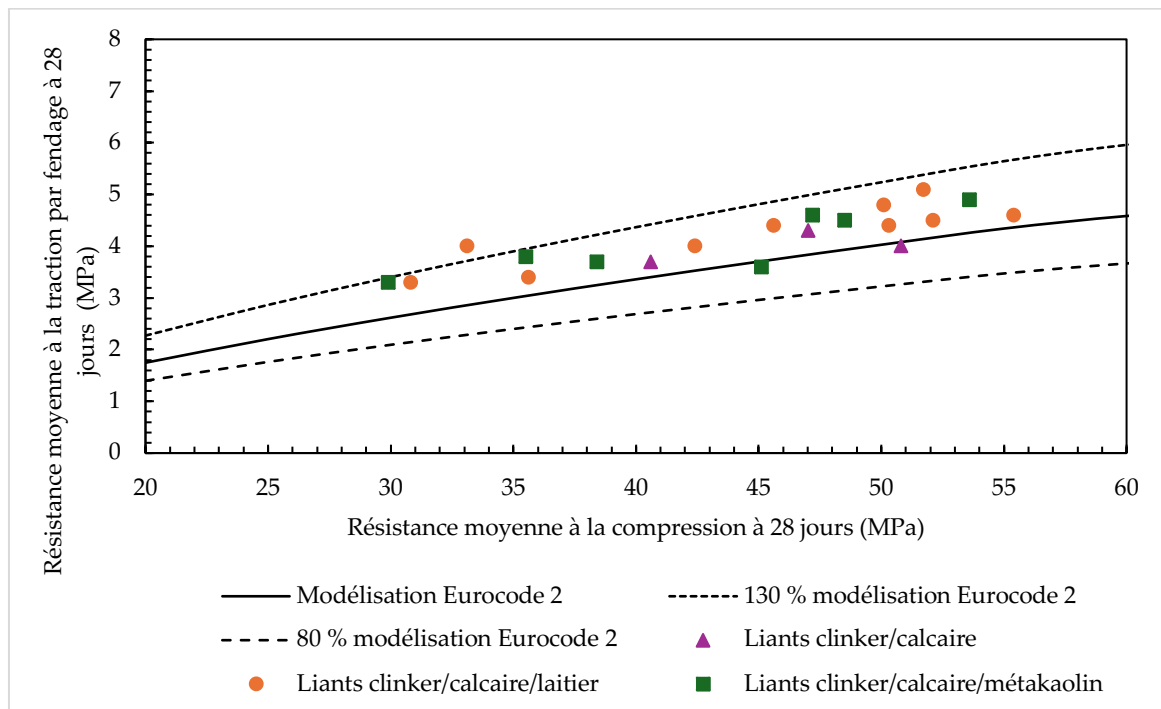
**FIGURE 9.** Rapport entre la résistance à la compression des bétons sur leur empreinte carbone en fonction de leur empreinte carbone

### B. Résistance à la traction par fendage

L'Eurocode 2 propose les relations de l'équation (1) entre la résistance moyenne à la traction par fendage  $f_{ctm,sp}$  et la résistance moyenne à la compression  $f_{cm}$  en fonction de la résistance caractéristique à la compression du béton.

$$\begin{cases} f_{ctm,sp} = \left(\frac{1}{0,9}\right) 0,3 (f_{cm} - 8)^{2/3} \text{ si } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ f_{ctm,sp} = \left(\frac{1}{0,9}\right) 2,12 \ln(1 + f_{cm}/10) \text{ si } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \end{cases} \quad (1)$$

Le graphique de la figure 10 représente la résistance au fendage des bétons testés en fonction de leur résistance à la compression à 28 jours en comparaison avec la courbe issue de la modélisation proposée par l'Eurocode. Le projet de fascicule FD P18-484 « Guide d'élaboration d'un dossier technique pour évaluer un nouveau liant ou une nouvelle addition » valide les bétons dont la valeur expérimentale est comprise entre 80 et 130 % de la valeur déduite. Le graphique de la figure 10 met en évidence qu'à l'exception d'un seul, dont le fluage est légèrement supérieur, tous les bétons satisfont cette condition.



**FIGURE 10.** Résistance moyenne à la traction par fendage à 28 jours en fonction de la résistance à la compression à 28 jours

La relation entre la résistance à la traction par fendage et la résistance à la compression des bétons testés est proche de celle proposée par l'Eurocode 2. On constate que, pour les bétons testés, la résistance à la traction par fendage mesurée est quasi-systématiquement supérieure à celle

calculée. Il est possible que ce résultat s'explique par la nature des granulats qui présentent de bonnes propriétés mécaniques ainsi que par la qualité de l'interface granulats-pâte de ciment.

#### IV. RETRAIT TOTAL

Le graphique de la figure 11 illustre l'influence du rapport eau sur liant sur le retrait total du béton après 6 mois d'essais. Le retrait mesuré à 6 mois s'étend sur une grande plage de valeurs du fait de la variété de composition des bétons et notamment du rapport eau efficace sur liant. Le retrait le plus fort (environ 740  $\mu\text{m}/\text{m}$ ) est mesuré sur le béton qui présente le rapport eau efficace sur ciment le plus élevé et dont le liant contient du laitier. Le retrait le plus faible (environ 320  $\mu\text{m}/\text{m}$ ) est mesuré sur le béton qui présente le rapport eau efficace sur ciment le plus faible et dont le liant est composé à 50 % de clinker et 50 % de calcaire. Globalement, pour un rapport eau efficace sur liant donné, les bétons contenant du métakaolin présentent un retrait total à 6 mois plus faible que celui des autres bétons et les bétons ne contenant ni laitier ni métakaolin, un retrait total à 6 mois plus fort.

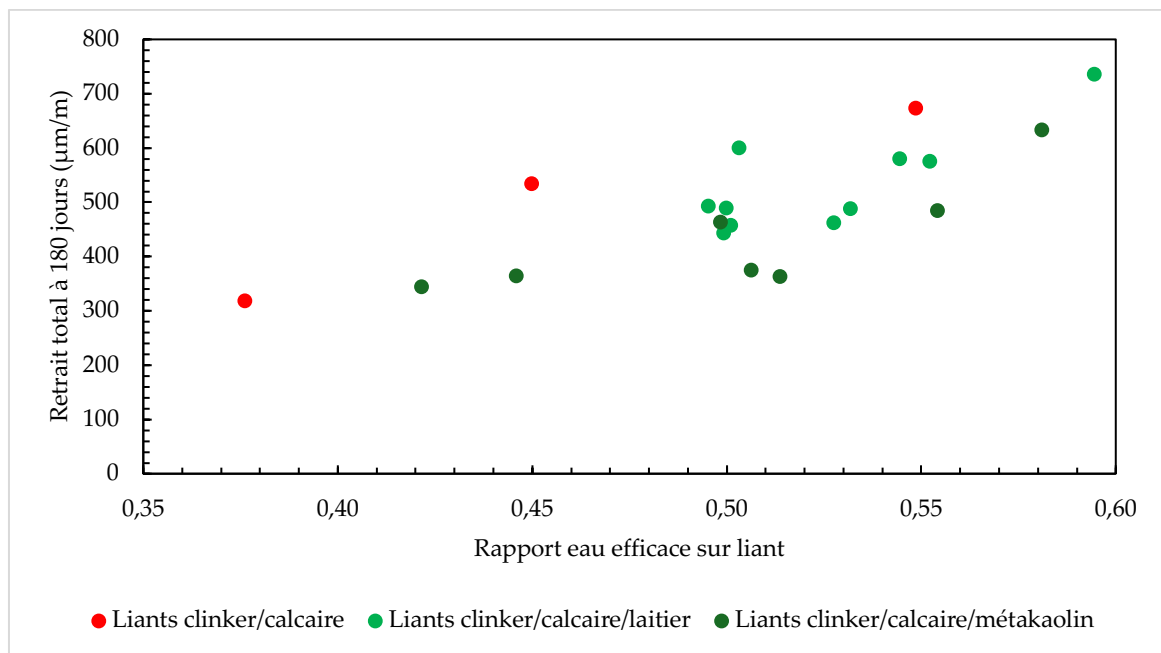


FIGURE 11. Retrait total des bétons à 6 mois en fonction du rapport eau efficace sur liant

#### V. CONCLUSION

Par la caractérisation d'un nombre important de compositions de bétons à impact carbone réduit, l'étude permet de souligner l'intérêt de ces compositions pour l'Industrie du Béton.

Les résultats du programme expérimental ont permis de vérifier que le modèle de l'Eurocode 2 pour la résistance à la traction par fendage reste valide pour les bétons à impact carbone réduit testés. Des travaux complémentaires réalisés dans le cadre de cette étude ont montré par ailleurs

la validité des modèles de l'Eurocode 2 pour le module d'élasticité, le retrait et le fluage de ce type de bétons (Le Thierry et al., 2025).

Les essais ont mis en évidence l'influence du rapport eau efficace sur liant total sur le retrait total. Sur les mesures réalisées, les bétons contenant du métakaolin présentent un retrait plus faible que ceux qui n'en contiennent pas.

Ces résultats soulignent l'intérêt d'accélérer le développement de l'utilisation de ce type liants dans les pratiques de construction.

## REFERENCES

Cardinaud.G (2021). Liants ternaires à base d'argile calcinée - étude des mécanismes de structuration, optimisation mécanique et durabilité. *Génie civil. École centrale de Nantes*. <https://theses.hal.science/tel-03934654v1>

Elkhaldi I, Rozière E, Turcry P, Loukili A. (2022). Towards global indicator of durability performance and carbon footprint of clinker-slag-limestone cement-based concrete exposed to carbonation. *Journal of Cleaner Production*, 2022, Vol. 380, 1.

Le Thierry S., Duval T., & Jacquemot F.. (2025). Mechanical behaviour and deformations of low-carbon concretes with limestone addition, blast-furnace slag or metakaolin. *Proceedings of the 2025 fib International Symposium, June 16-18, Antibes, 2025*.

Meenakshi Sharma, Shashank Bishnoi, Fernando Martirena, Karen Scrivener. (2021). Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Research*, 2021, Vol. Volume 149.

Megjigbodo G, Rozière E, Charrier K, Izoret L, Loukili A. (2018). Hydration, shrinkage, and durability of ternary binders containing Portland cement, limestone filler and metakaolin. *Construction and Building Materials*, 2018, Vol. 183.

Monadiri A, Ouali A, Hauza P, Bucher R, Mrabet S. (2022). Evaluation of the durability of concretes associated with flash metakaolin or silica fume. *Materials Today: Proceedings*, 2022, Vol. 58, 4.

Pernin T., Le Thierry S., Mai-Nhu J., Jacquemot F., Mosser L., & Rougeau P.. (2024). Durability of Concretes with Low Environmental Emissions Based on Ternary Binders: Corrosion Resistance and Positioning with Respect to the Performance Approach. *ACI Symposium Publication*, Volume 362, 774-782, DOI : 10.14359/51742008.