

Influence de la cure et des conditions d'exposition sur la durabilité de bétons à empreinte carbone réduite



Vouzelaud Marion
Ingénieure doctorante CERIB/LMDC



Contexte et Objectifs

Contexte :

- Réduire l'empreinte carbone des bétons → Diminuer fortement la part de clinker
- Nécessité de prendre en compte les contraintes de chantier ou de préfabrication (délai de démoulage, résistance à la compression, humidité, etc)

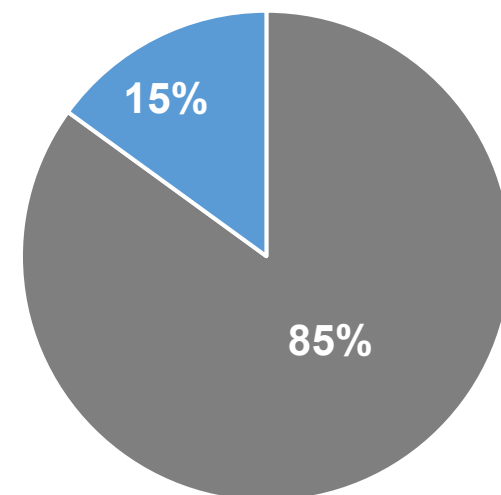
Comment garantir la durabilité des bétons d'enrobage à faible impact environnemental dans des conditions compatibles avec les pratiques industrielles et les exigences normatives ?

Objectifs de la thèse :

- Évaluer la durabilité de bétons bas carbone à forte réduction du clinker
- Quantifier et comprendre l'influence de la cure et de la conservation sur leurs performances (états hydriques, microstructure, carbonatation, etc)
- Alimenter une approche performantielle de la durabilité, en reliant essais expérimentaux, observations microstructurales et modélisation.

Emissions carbone des bétons étudiés

Référence



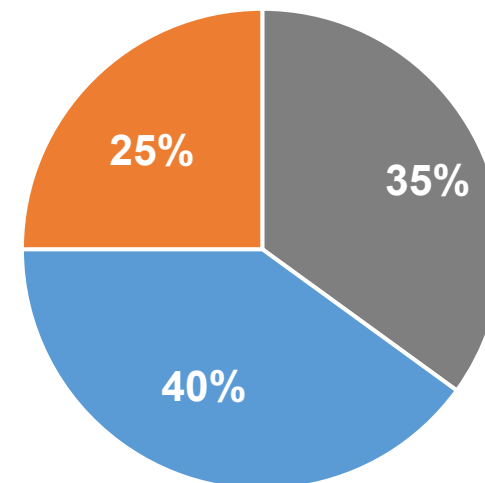
■ CEM II-A/LL ■ Addition calcaire

227 kgCO₂ éq/m³

76 % de clinker

GWR (0)

Ternaire métakaolin + addition calcaire



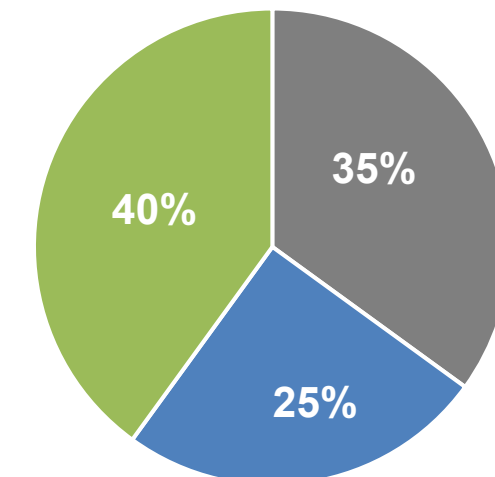
■ CEM II-A/LL ■ Addition calcaire ■ Métakaolin

119 kgCO₂ éq/m³

31 % de clinker

GWR (4)

Ternaire laitier de haut fourneau +
addition calcaire



■ CEM II-A/LL ■ Addition calcaire
■ Laitier de haut fourneau

116 kgCO₂ éq/m³

31 % de clinker

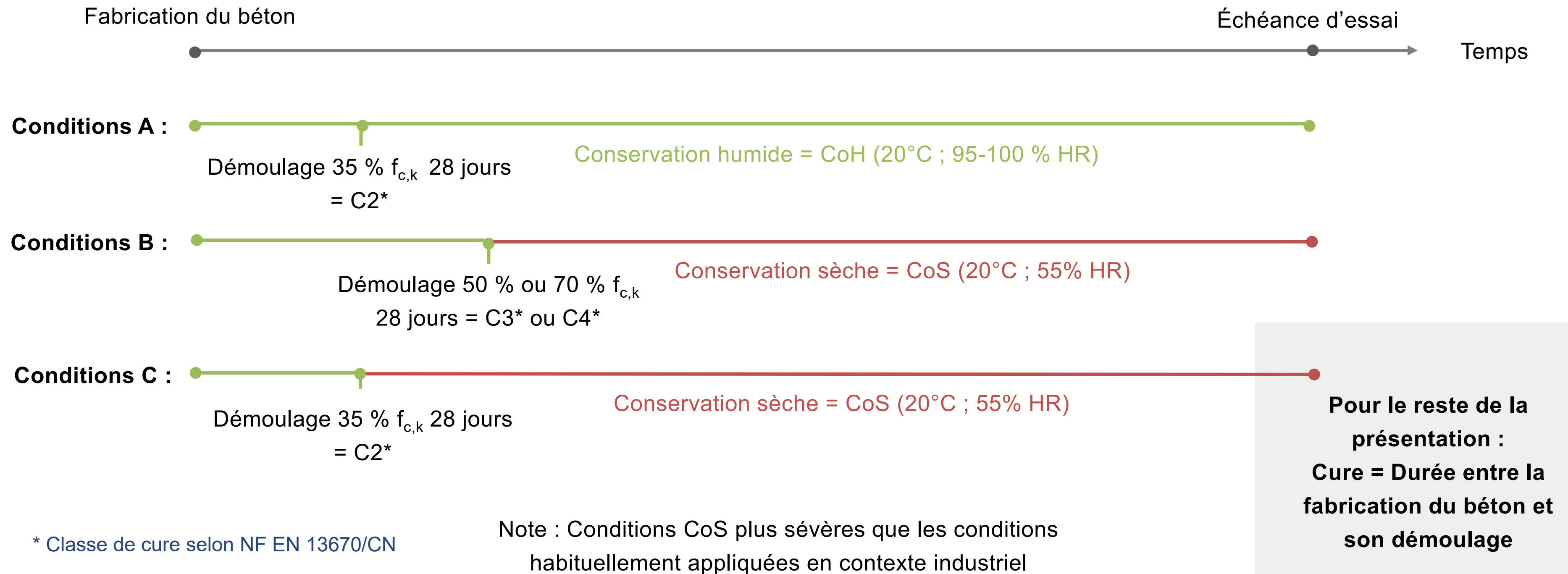
GWR (4)

Dosage de liant constant : 400 kg/m³

Deux E/L : 0,35 et 0,45

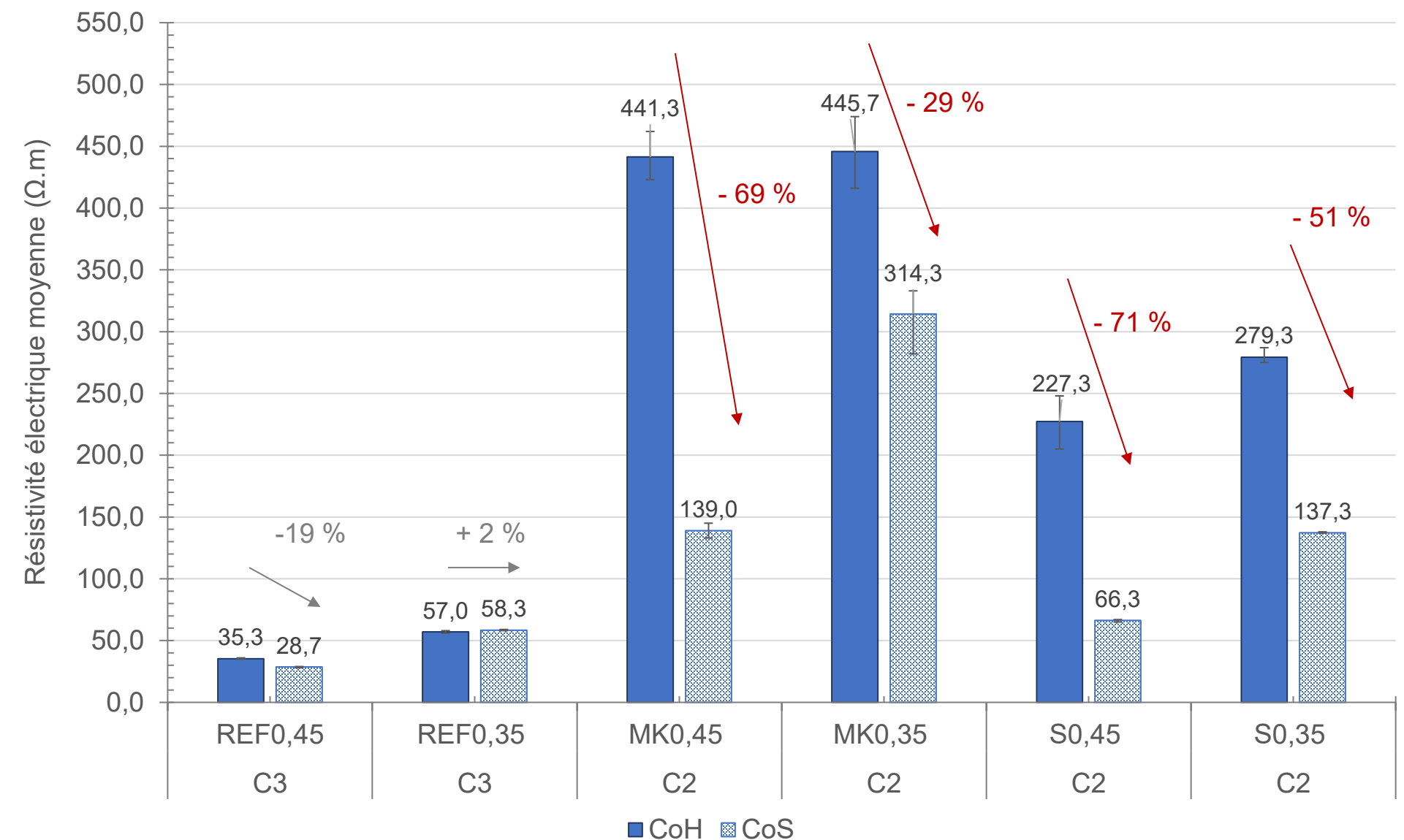
→ 6 formules

Différentes cures et conditions de conservation étudiées



Résultats d'essais présentés

- Résistance à la compression
- Porosité accessible à l'eau
- Résistivité électrique
- Coefficient de diffusion des ions chlorure
- Carbonatation accélérée



Influence significative au regard de l'incertitude d'essai : ↗, ↘ ou = ?

Influence de la conservation

Essais	REF0,45		REF0,35		MK0,45		MK0,35		S0,45		S0,35	
	C3		C3		C2		C2		C2		C2	
	CoH	CoS	CoH	CoS	CoH	CoS	CoH	CoS	CoH	CoS	CoH	CoS
Résistance à la compression - 90 jours	=		↘		↘		=		↘		↘	
Porosité accessible à l'eau - 90 jours	↗		↗		=		↗		=		=	
Résistivité électrique – 90 jours	=		=		↘		↘		↘		↘	
D _{rcm} – 90 jours	=		=		↘		↘		↘		↘	
Carbonatation accélérée – 90 jours	↘		↘		↘		↘		↘		↘	

Indicateurs liés aux
problématiques de corrosion

Influence de la cure

Essais	REF0,45		MK0,45		MK0,35		S0,45		S0,35	
	CoS		CoS		CoS		CoS		CoS	
	C3	C4	C2	C3	C2	C3	C2	C3	C2	C3
Résistance à la compression - 90 jours	=		=		=		=		=	
Porosité accessible à l'eau - 90 jours	=		=		=		=		=	
Résistivité électrique - 90 jours	=		=		=		=		↗	
D _{rcm} - 90 jours	=		=		↗		↗		↗	
Carbonatation accélérée - 90 jours	=		=		=		=		=	

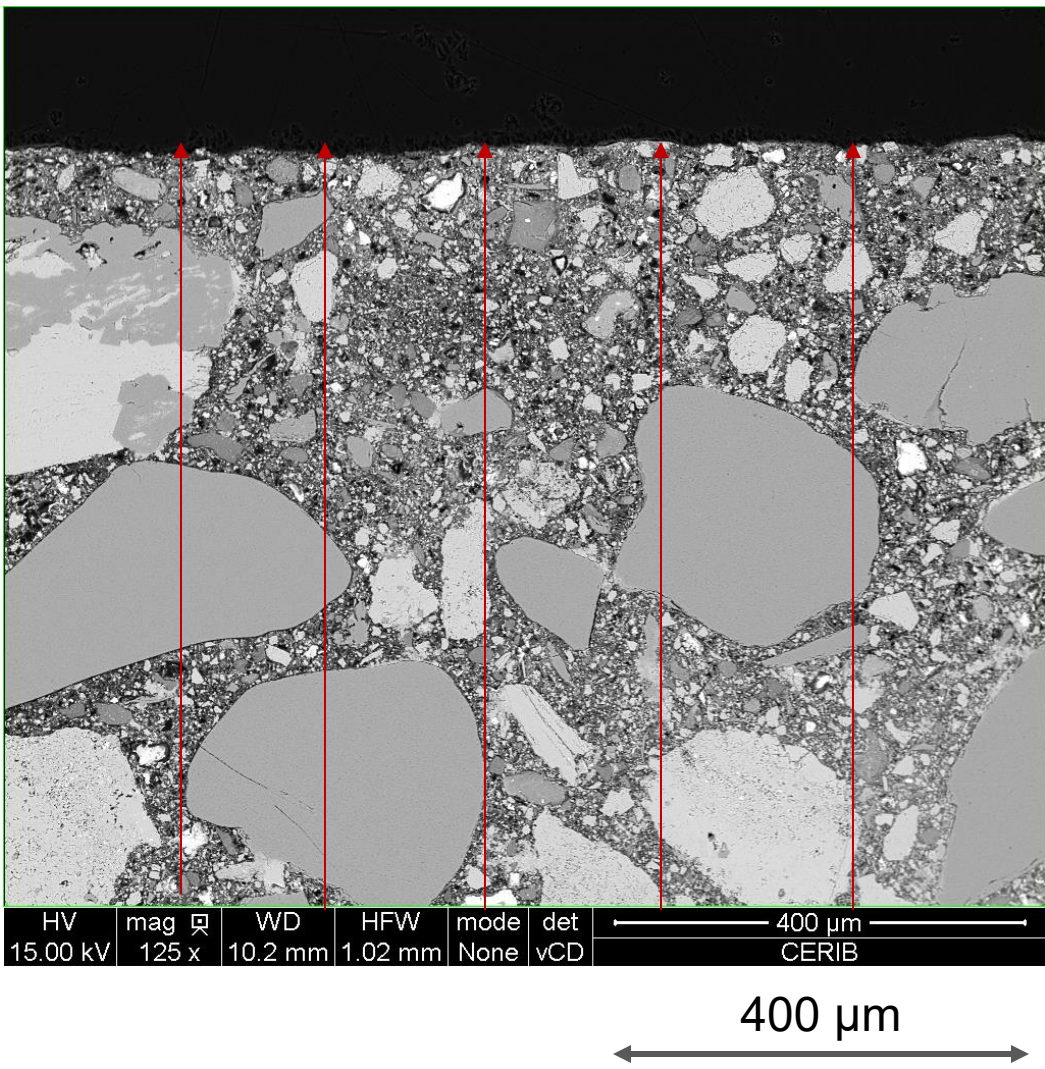


Indicateurs liés aux
problématiques de corrosion

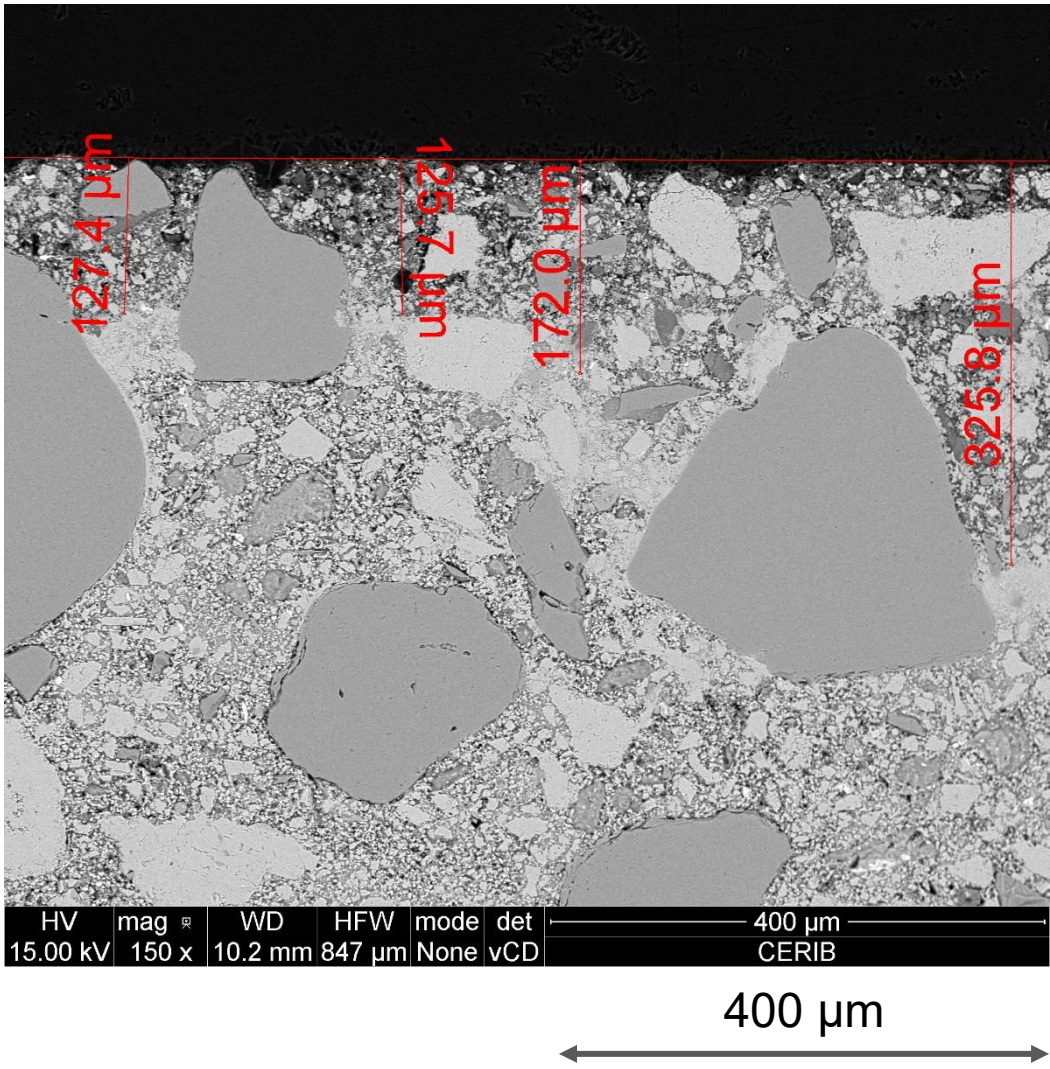
Etude de compréhension des phénomènes

Résultats MEB

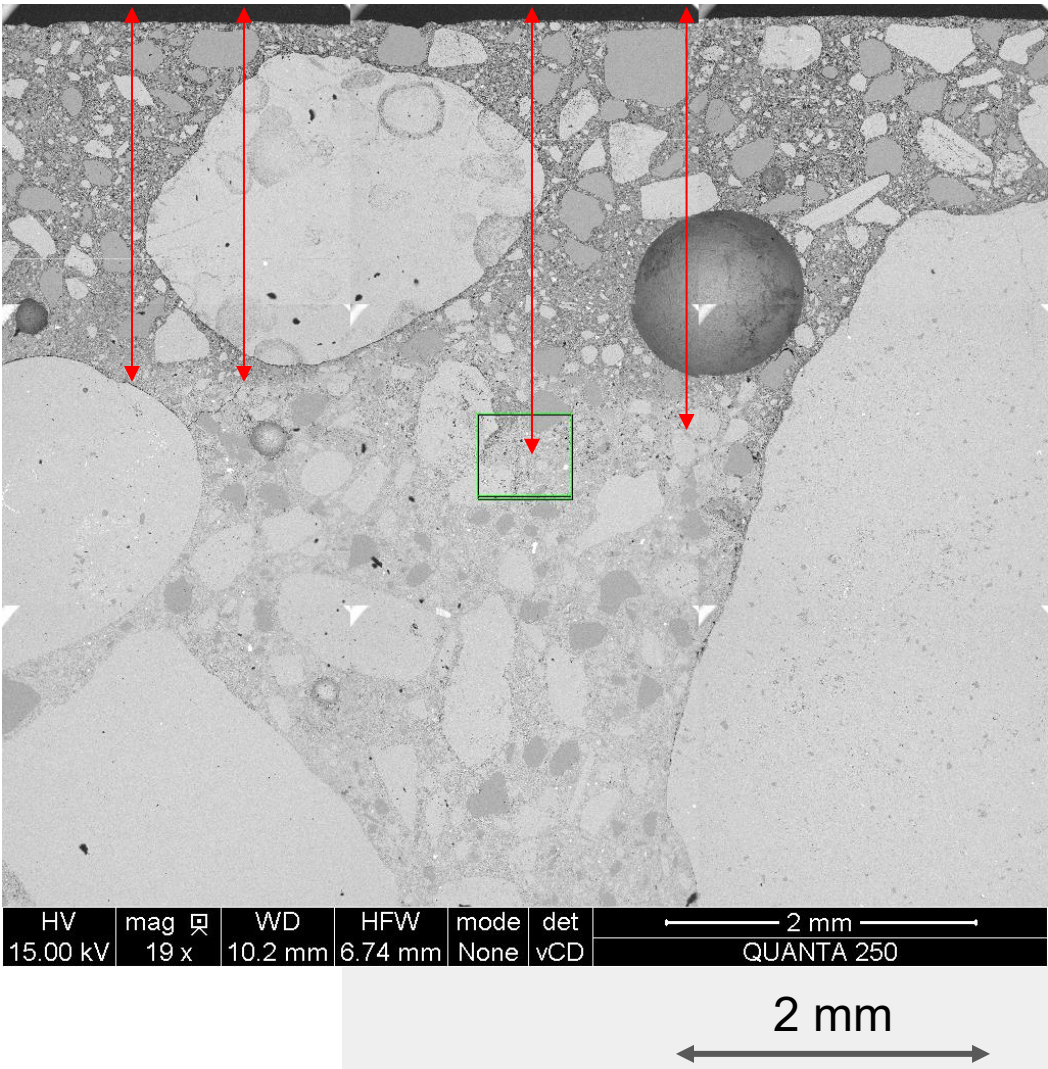
MK0,45 Démoulage C2



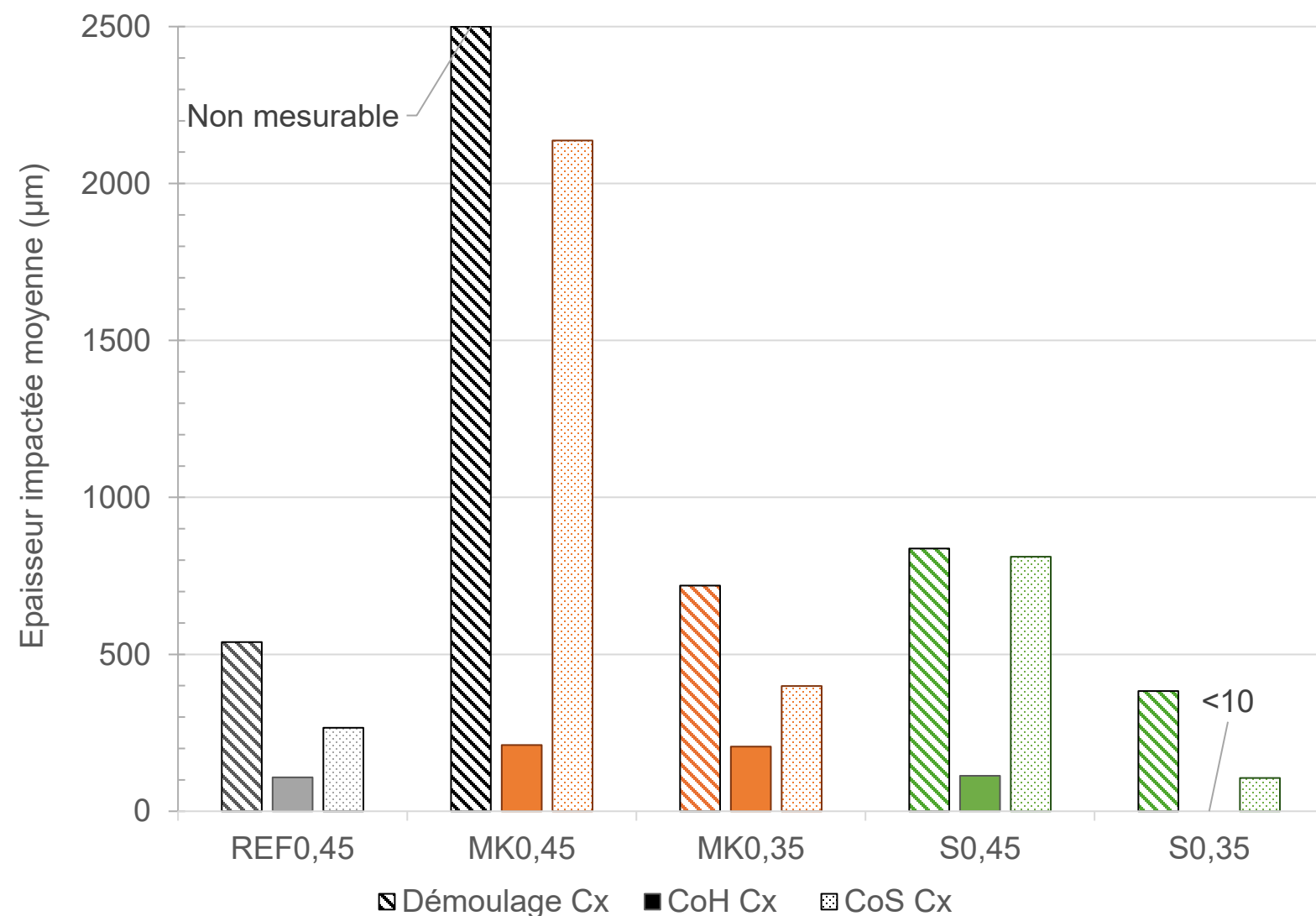
MK0,45 100 jours CoHC2



MK0,45 100 jours CoSC2



Résultats MEB



Diminution de E/L de 0,45 à 0,35 → épaisseur impactée ↘

Zones superficielles moins denses observées au MEB : **couplage entre effet de peau, état hydrique et composition du liant**

- ❖ **Au démoulage** : zone impactée → effet de peau : ressuage local, porosité superficielle plus élevée
- ❖ **Après 100 jours, conservation humide** : zone impactée ↘ car l'humidité dans les pores saturés [1] :
 - poursuite de l'hydratation et réactions pouzzolanique ou hydraulique latente,
 - freinage de la diffusion du CO_2
- ❖ **Après 100 jours, conservation sèche** : zone impactée ↗ à conservation humide :
 - dessiccation freine la poursuite de l'hydratation [1],
 - séchage facilite la diffusion du CO_2

Formule MK0,45 : + fortes épaisseurs impactées [2] :

- faible teneur en clinker
- consommation de la portlandite
- réseau poreux + connecté

Formule S0,45 : sensible aussi car peu de clinker mais laitier = source de calcium qui → Formation de C-(A)-S-H, Afm [3] → raffinement de la microstructure

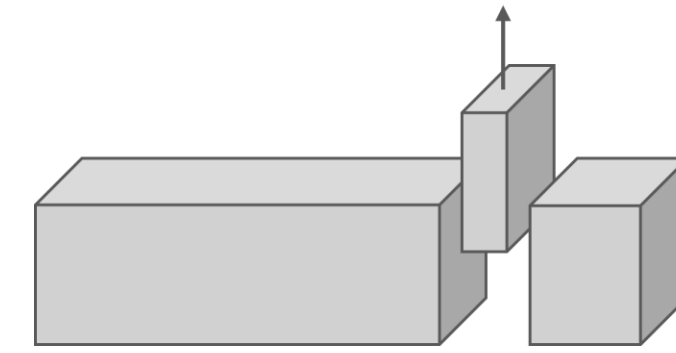
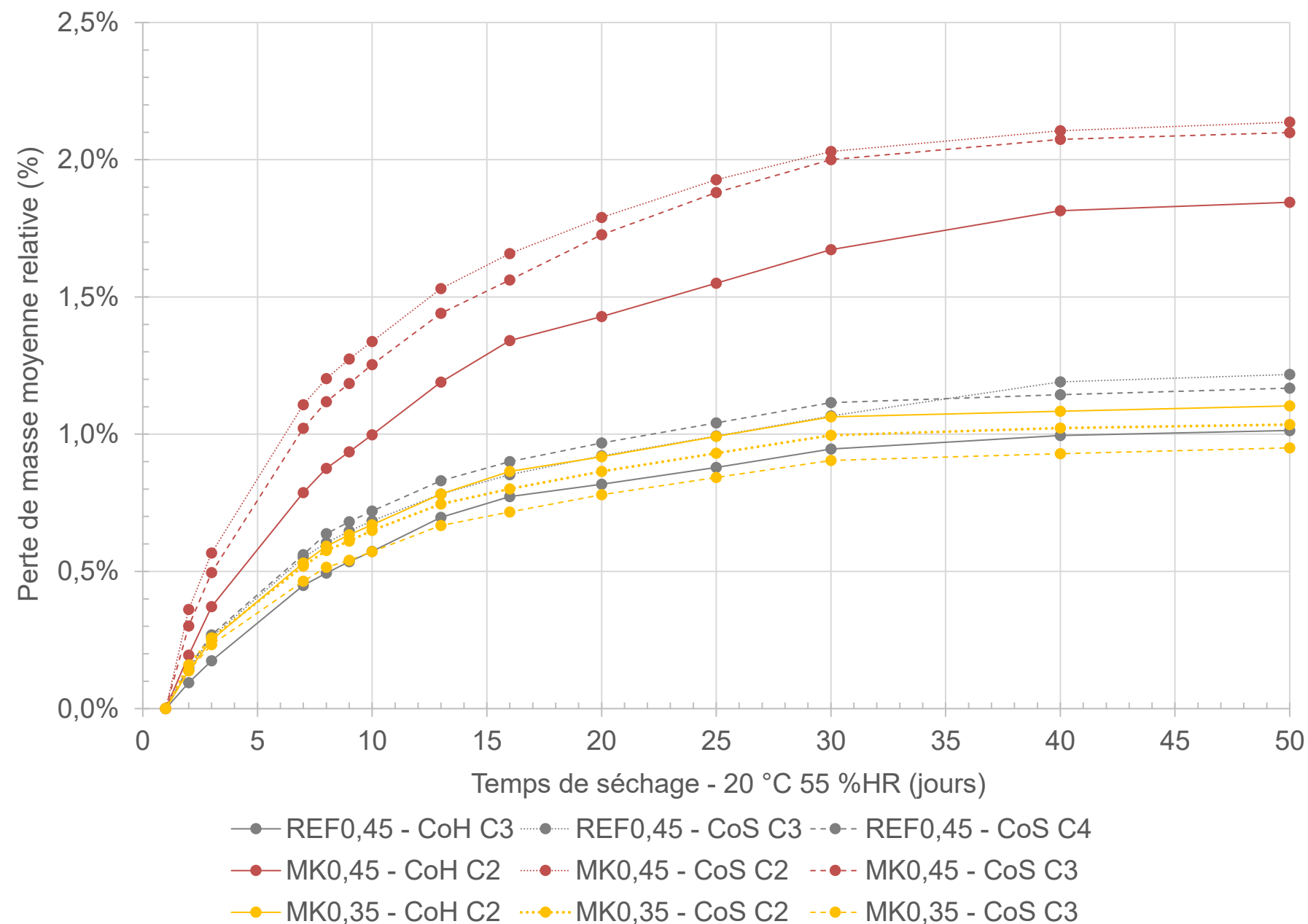
[1] von Greve-Dierfeld, S., Lothenbach, B., Vollpracht, A. et al. (24 more authors), "Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review", RILEM TC 281-CCC. Materials and Structures, 53 (6). 136. ISSN 1359-5997 2020

[2] Deveshan L. Pillay, Oladimeji B. Olalusi, Moses W. Kiliswa, Paul O. Awoyera, John Temitope Kolawole, Adewumi John Babafemi, « Engineering performance of metakaolin based concrete », Cleaner Engineering and Technology, Volume 6, 2022

[3] Chao Li, Henghu Sun, Longtu Li, "A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements", Cement and Concrete Research, Volume 40, Issue 9, 2010

Etude de compréhension des phénomènes

Suivi de masse unidirectionnel



Prisme (7 x 7 x 28) cm

❖ MK0,45 présente la perte de masse la plus élevée

- E/L ↗ : réseau capillaire plus connecté en peau
- liant avec peu de clinker + métakaolin : moins de Ca(OH)_2 disponible

Conséquence en conservation sèche [1]:

- CO_2 ne carbonate pas uniquement la Ca(OH)_2
- Carbonatation des C-S-H/C-A-S-H : décalcification et réorganisation des hydrates
- Ouverture ou connexion de la porosité capillaire, voire microfissuration superficielle
- Peau devient plus favorable aux transferts hydriques → Pertes de masse ↗

❖ Diminution du E/L limite fortement le séchage

❖ L'historique de conservation reste visible après resaturation

- CoH favorise l'hydratation et le raffinement de la peau

Conclusion et perspectives

- ❖ Les bétons à faible impact environnemental étudiés présentent de bonnes performances de durabilité pour lesquelles le rapport E/L et les conditions de conservation jouent des rôles prépondérants.
- ❖ Une conservation sèche favorise les gradients microstructuraux de surface et les transferts hydriques plus importants.
- ❖ Les observations MEB et le suivi de masse unidirectionnel sont cohérents : **plus la zone superficielle est impactée, plus les transferts hydriques sont facilités.**
- ❖ La diminution du rapport E/L permet de limiter les effets d'une conservation pénalisante pour les bétons.

$$x_c(t) = V t^{\alpha+\beta}$$

Perspectives :

- Confrontation des résultats expérimentaux de la thèse à la base de données PerfDuB et aux travaux complémentaires (thèses de Paulo Claude et Lucas Mosser)
- Travaux de modélisation et discussion sur les cinétiques de carbonatation des bétons à faible impact environnemental et en particulier effet de la cure/conservation
- Soutenance de thèse prévue le **25 septembre 2026**



Merci



Vouzelaud Marion
Ingénieure doctorante CERIB/LMDC