



Durabilité des bétons bas-carbone non structurels

LMDC - FNTF

Gilles ESCADEILLAS – Christophe JUSTINO

GIS DECADES – 13 Mai 2025



UNIVERSITÉ
TOULOUSE III
PAUL SABATIER





Sommaire

1

Introduction

Contexte
Objectifs

2

Matériaux et méthodes

Matériaux
Méthodes

3

Résultats aux états frais et durci

Résultats à l'état frais
Essais mécaniques
Essais de durabilité
Indicateurs généraux
Grandeurs associées

4

Synthèse et Conclusions

Synthèse
Conclusions et Perspectives



Sommaire

1

Introduction

Contexte
Objectifs

2

Matériaux et méthodes

Matériaux
Méthodes

3

Résultats aux états frais et durci

Résultats à l'état frais
Essais mécaniques
Essais de durabilité
Indicateurs généraux
Grandeurs associées

4

Synthèse et Conclusions

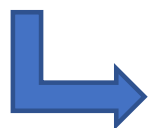
Synthèse
Conclusions et Perspectives

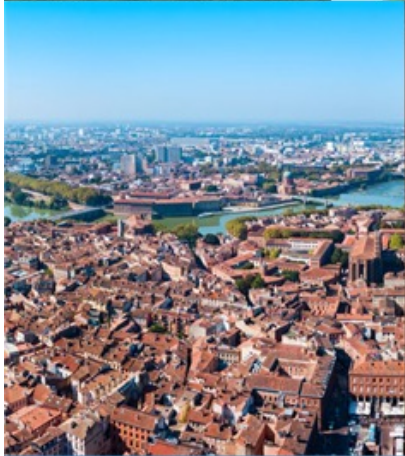
□ Contexte

- Travaux du groupe d'expert « Solutions Bas-Carbone » de la FNTF sur les performances à long terme et en environnement agressif des bétons « non structurels »
- Limitation du déploiement de solutions bas-carbone en milieu chimiquement agressif (au sens des classes d'exposition XA de la norme NF EN 206/CN+A2) par l'approche prescriptive (bétons non structurels) mais également par l'approche performantielle (bétons structurels)
 - Résistances mécaniques très supérieures aux besoins (ces résistances élevées pouvant induire des problématiques lors de l'exécution)
 - Risque d'augmentation des pathologies dues à la mise en œuvre de bétons à très faibles rapports E_{eff}/L_{eq} pour assurer une durée de service de 100 ans (caractéristiques rhéologiques peu compatibles avec les méthodes de coulage du béton)
 - Surdosage en liant équivalent et limitation des possibilités de substitutions du clinker par des additions minérales (impact négatif sur le bilan carbone de ces bétons)

❑ Objectifs

- Peut-on faire évoluer les textes normatifs pour ce type de béton en classes d'exposition XA tout en restant dans le domaine de la sécurité et de la durabilité ?
 - Revoir certaines limites de l'approche prescriptive pour les classes d'exposition XA appliquées à des bétons pour ouvrages non structuré (possibilité de relaxer le dosage mini en liant et le rapport E_{eff}/L_{eq} max, moduler le rapport E_{eff}/L_{eq} max en fonction de la nature chimique du liant utilisé)
 - Lever certains garde-fous de l'approche performantielle pour les classes d'exposition XA (dosage en liant de 300 kg/m³ mini en fonction du type de liant, valeur mini en porosité, non-prise en compte de l'addition calcaire pour les environnements riches en sulfates)
 - Comprendre les mécanismes pilotant les phénomènes observés, en mettant en relation les résultats expérimentaux avec ceux des modèles réalisés, pour mieux appréhender la tenue des bétons selon la durée d'utilisation des projets





Sommaire

1

Introduction

Contexte
Objectifs

2

Matériaux et méthodes

Matériaux
Méthodes

3

Résultats aux états frais et durci

Résultats à l'état frais
Essais mécaniques
Essais de durabilité
Indicateurs généraux
Grandeurs associées

4

Synthèse et Conclusions

Synthèse
Conclusions et Perspectives



❑ Matériaux

- Etude exploratoire de formules de béton à base de liant recomposé pour pieux sécants
 - CEM II/A-S 52,5 N CE PM-CP2 NF de Port-La-Nouvelle (LafargeHolcim)
 - laitier granulé de haut fourneau de Fos-sur-Mer (Ecocem)
 - Granulats siliceux : 0/0,315 ; 0,315/1 ; 1/4 ; 4/8 ; 8/12 ; 12/20 (Palvadeau)
 - Superplastifiant CHRYSO® Fluid Optima 100 (Chryso)

Formule	Caractéristiques de base	Liant recomposé	Type
Ref (300)	300 kg/m ³ – E/L 0.55	Equivalent CEM III/A SR (65% laitier)	Conforme FD P18-480 et FD P 18-011
250	250 kg/m ³ – E/L 0,60 + filler siliceux	Equivalent CEM III/A SR (65% laitier)	Formule Chantier + annexe D X0
200	200 kg/m ³ – E/L 0,60 + filler siliceux	Equivalent CEM III/A SR (65% laitier)	Formule Chantier + Annexe D X0

☐ Méthodes

- Fabrication béton (70 l par gâchée)
- Essais à l'état frais
 - Affaissement au cône d'Abrams
 - Teneur en air occlus
- Essais à l'état durci
 - Rc à 7, 28 et 91 jours (EN 12390-3)
 - Porosité à 28 et 91 jours (NF P 18-459, août 2022)
 - Résistivité à 28 et 91 jours (XP P 18-481, décembre 2022)
 - Migration des ions chlorure à 91 jours (XP P 18-462, décembre 2022)
 - Lixiviation à pH constant (XP P 18-482, juillet 2022)
 - Réaction sulfatique externe (essais par saturation et par immersion-séchage, selon protocoles PerfduB)





Sommaire

1

Introduction

Contexte
Objectifs

2

Matériaux et méthodes

Matériaux
Méthodes

3

Résultats aux états frais et durcis

Résultats à l'état frais

Essais mécaniques

Essais de durabilité

Indicateurs généraux

Grandeurs associées

4

Synthèse et Conclusions

Synthèse
Conclusions et Perspectives

Résultats aux états frais et durcis

❑ Propriétés des bétons à l'état frais et formulations

10

Essai	Ref (300)	250	200
Affaissement initial (cm)	7	/	1
Ajout d'eau (kg/m ³)	-	-	+ 20
Ajout d'adjuvant (kg/m ³)	+ 0,67	+ 3,27	+ 4,01
Affaissement final (cm)	16	18	17
Air (%)	1,2	1,6	1,3
Masse volumique (kg/m ³)	2365,2 ± 10,5	2381,1 ± 5,9	2391,5 ± 7,5

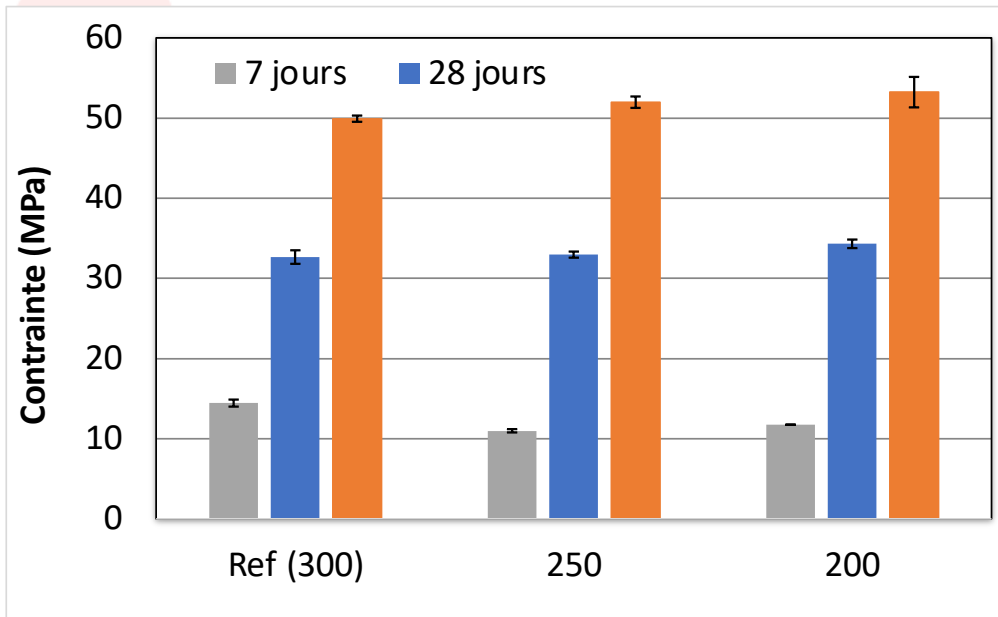
Constituants (kg/m ³)	Ref (300)	250	200
CEM II/A S 52,5 PLN	123,2	102,4	80,2
Laitier	176	146,1	114,2
Eau efficace	165,6	149,1	136,1
Superplastifiant	1,42	3,87	4,39
Liant	299,2	248,5	194,4
Eau efficace/Liant	0,55	0,60	0,70
FvP	0,284	0,271	0,258

Problèmes de plasticité pour les bétons conduisant à des ajustements des formules théoriques

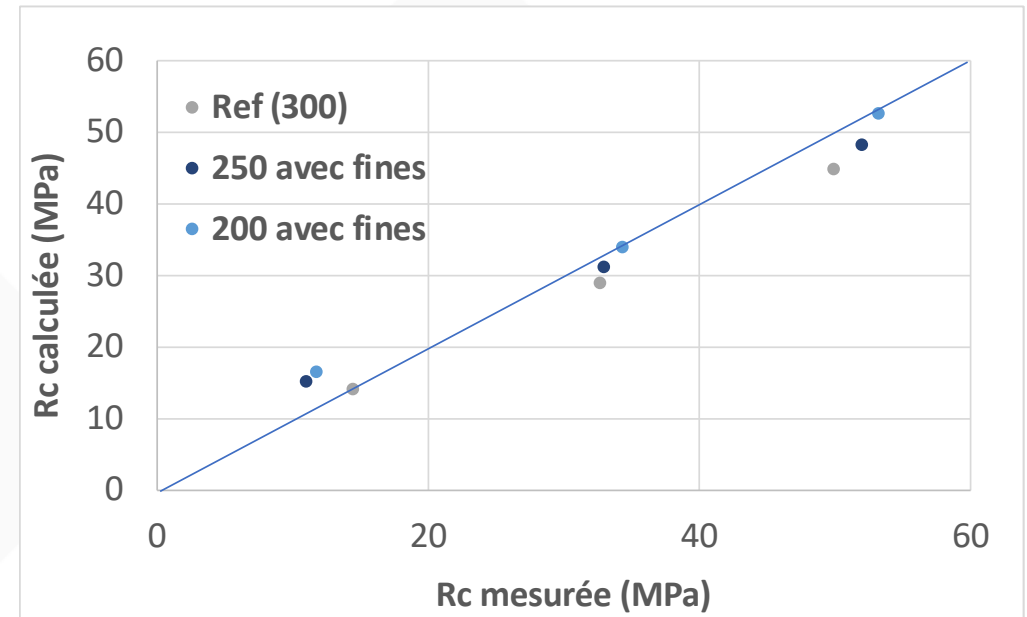
FvP : fraction volumique de pâte

Résultats aux états frais et durcis

❑ Essais mécaniques en compression



Pas d'influence significative du dosage en liant (et en eau)



$$\text{Bolomey : } R_{cb,j} = R_{cm,j} \cdot G \left(\frac{L}{E + V} \right) - 0,5$$

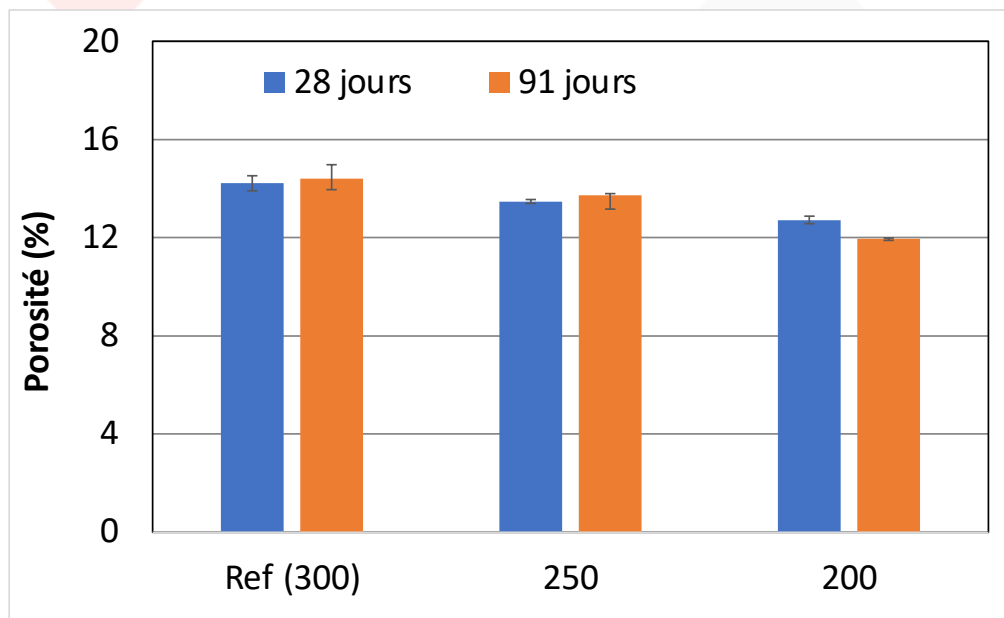
Différence significative pour les bétons 250 et 200

Fines considérées comme liant : équivalence pour tous les bétons

Résultats aux états frais et durcis

❑ Essais de durabilité – Indicateurs généraux

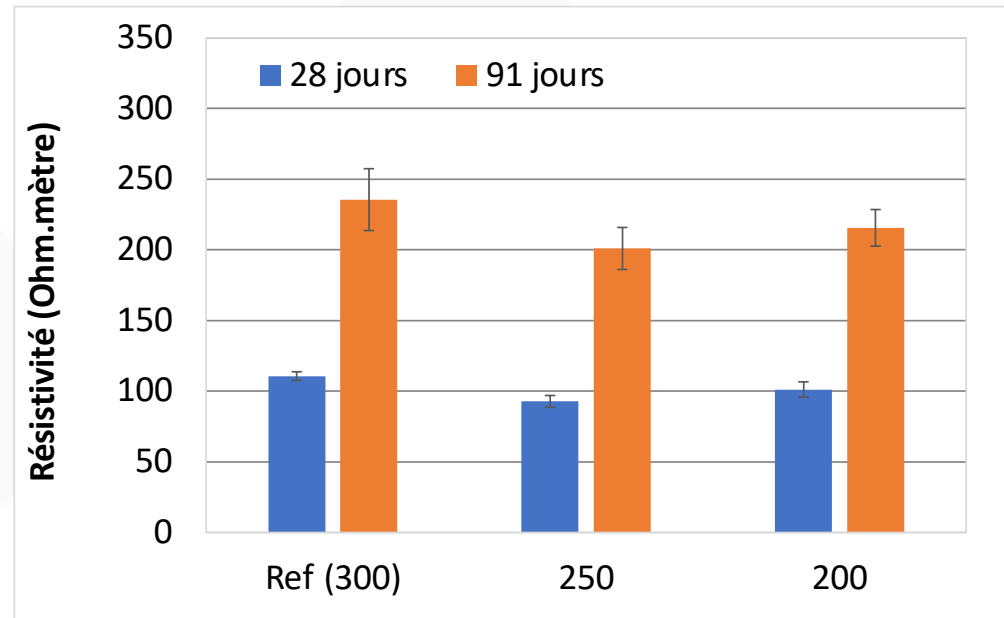
• Porosité



Peu de variation de porosité entre 28 et 91 jours

Porosité des bétons 250 et 200 plus faible (influence des fines siliceuses et du superplastifiant ?)

• Résistivité



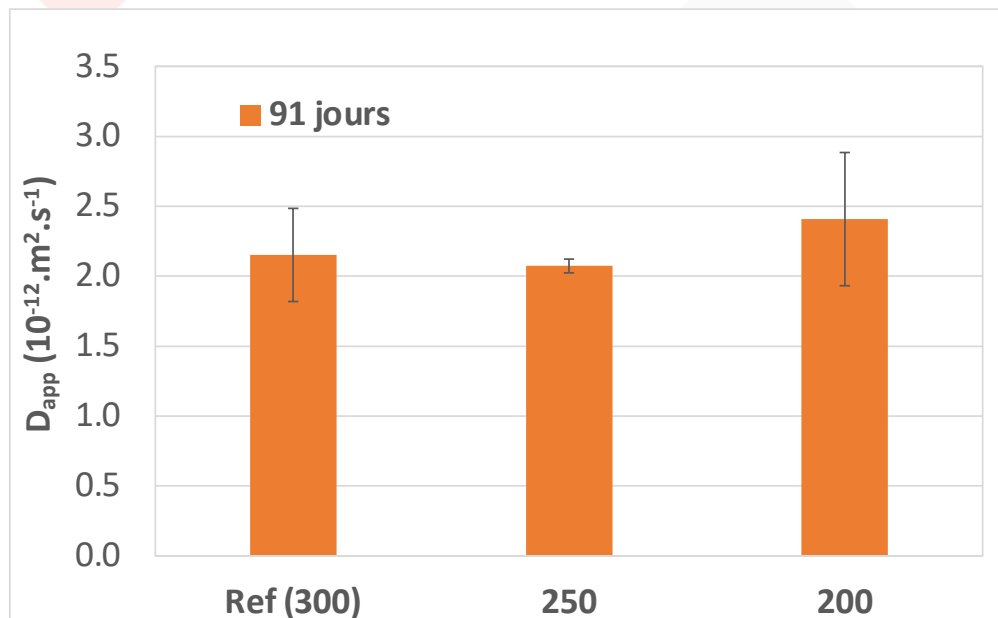
Augmentation significative de la résistivité entre 28 et 91 jours (> 175 Ω .m à 91 jours)

Peu de différence entre les bétons

Résultats aux états frais et durcis

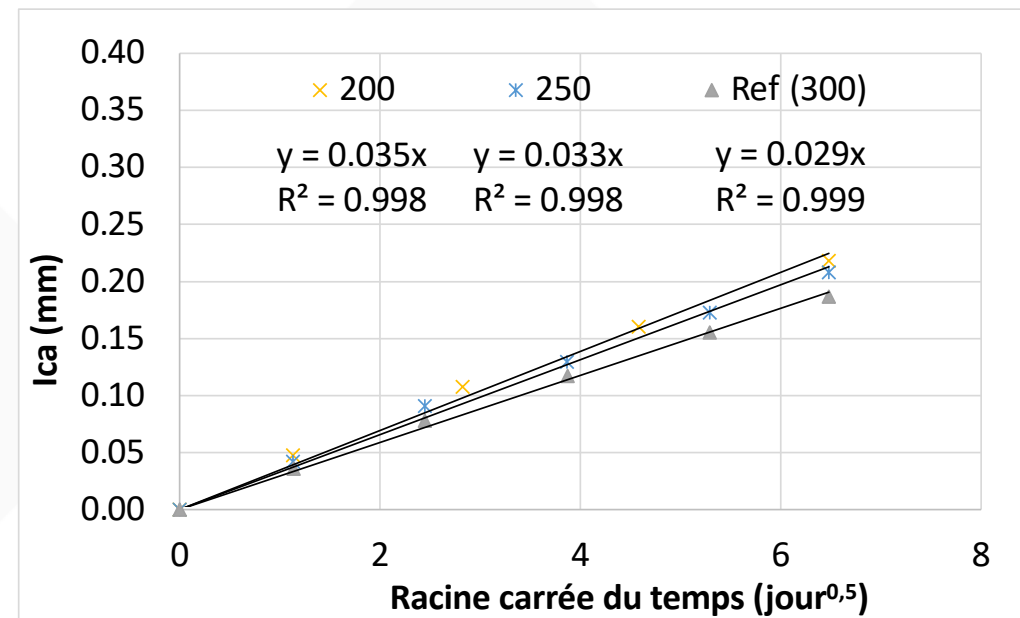
❑ Essais de durabilité – Grandeurs associées à la durabilité

- Diffusion des ions chlorure

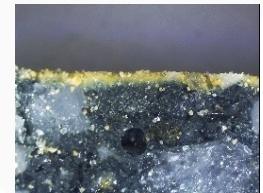


Pas de différence significative entre les différents bétons

- Lixiviation pH 4



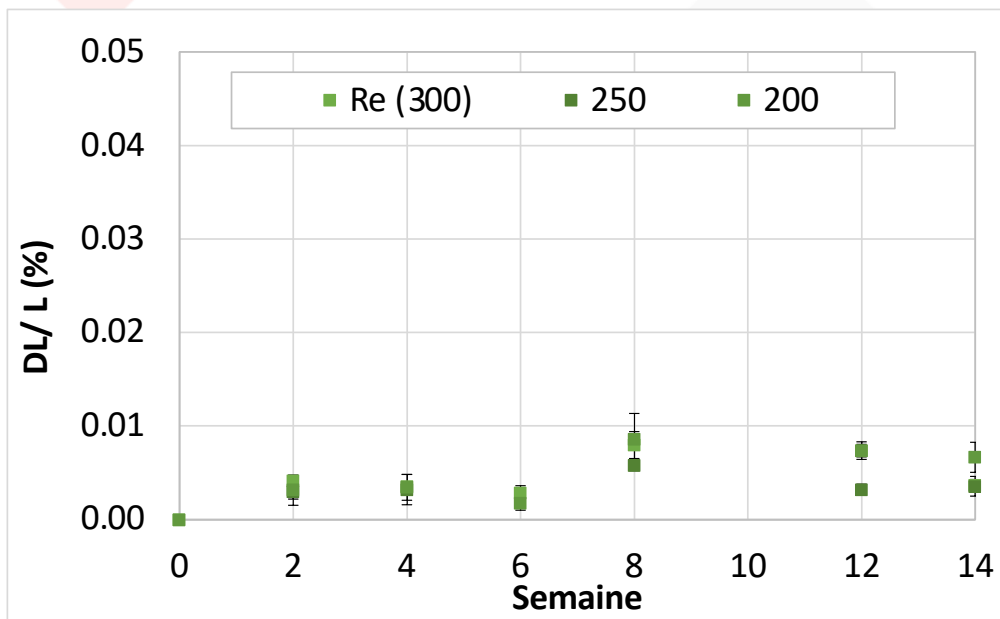
Très faible épaisseur I_{ca} en fin d'essai
Peu de différence entre les bétons



Résultats aux états frais et durcis

❑ Essais de durabilité – Grandeurs associées à la durabilité

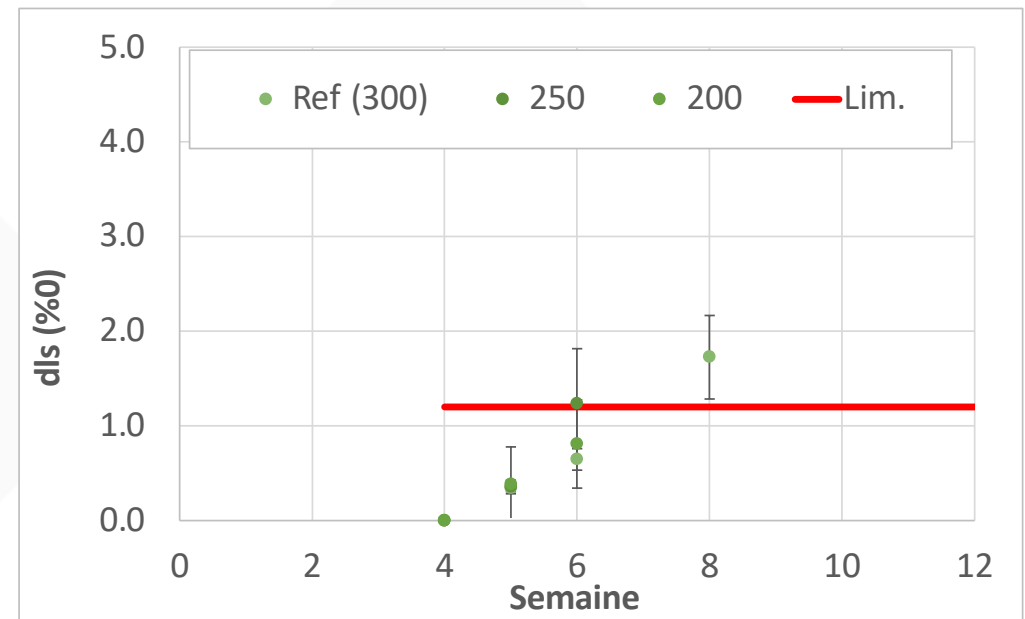
• Essai saturation (Messad)



Pas de différence significative entre les différents bétons

Valeurs très inférieures aux limites (0,05%)

• Essai Immersion-Séchage (SIA)



Gonflements supérieurs à la limite pour tous les bétons (avec rupture des carottes)



Sommaire

1

Introduction

Contexte
Objectifs

2

Matériaux et méthodes

Matériaux
Méthodes

3

Résultats aux états frais et durci

Résultats à l'état frais
Essais mécaniques
Essais de durabilité
Indicateurs généraux
Grandeurs associées

4

Synthèse et Conclusions

Synthèse
Conclusions et Perspectives

Synthèse et Conclusions

❑ Conformité / P18-480

• Formulation

Critère	Ref (300)	250	200
Liant total (kg/m ³)	300	250	200
Conformité XC et XF1 (liant ≥ 260 kg/m ³)	Oui	Non	Non
Conformité autres classes (liant ≥ 300 kg/m ³)	Oui	Non	Non
Teneur en clinker du liant (%)	35	35	35
Conformité (clinker ≥ 15% du liant)	Oui	Oui	Oui
Conformité liant (P 18-011)	Oui	Oui	Oui

• Classes d'exposition XC

	Ref (300)	250	200
$P_{eau,k,91j}$ (%)	15,14	14,35	12,50
FvP	0,284	0,271	0,258
$P_{eau,k,91j} / FvP$ (%)	53,3	52,9	48,4
Résistivité 91j (Ω.m)	235,5 ± 21,9	201,0 ± 14,9	215,6 ± 13,0
Conformité classes XC DUP 50 ans	XC1, XC2, XC3*, XC4*	XC1, XC2, XC3*, XC4*	XC1, XC2, XC3*, XC4*
Conformité classes XC DUP 100 ans	XC1, XC2, XC4*	XC1, XC2, XC4*	XC1, XC2, XC3*, XC4*

**A confirmer avec des essais accélérés de carbonatation*

Synthèse et Conclusions

☐ Conformité / P18-480

• Classes d'exposition XS et XD

	Ref (300)	250	200
$D_{rcm,k,91i}$ (10^{-12} m ² /s)	2,80	2,69	3,13
Facteur de vieillissement	0,43	0,43	0,43
Conformité classes XS DUP 50 ans	XS1, XS2, XS3e, XS3m	XS1, XS2, XS3e, XS3m	XS1, XS2, XS3e
Conformité classes XS DUP 100 ans	XS1, XS2, XS3e, XS3m	XS1, XS2, XS3e, XS3m	XS1, XS2, XS3e
Conformité classes XD DUP 50 ans	XD1, XD2, XD3f, XD3tf	XD1, XD2, XD3f, XD3tf	XD1, XD2, XD3f, XD3tf
Conformité classes XD DUP 100 ans	XD1, XD2, XD3f, XD3tf	XD1, XD2, XD3f, XD3tf	XD1, XD2, XD3f, XD3tf

• Classes d'exposition XA

XA Acide	Ref (300)	250	200
I_{Ca} (mm)	0,186	0,208	0,218
Conformité classe XA3 acide	Pas de conclusion	Pas de conclusion	Pas de conclusion
XA Sulfates	Béton 3	Béton 5	Béton 4
RSE saturation (%)	0,0037	0,0036	0,0067
Conformité classe XA3 sulfates	Oui	Oui	Oui
RSE immersion-séchage (%)	> 0,12	> 0,12	> 0,12
Conformité classe XA3 sulfates	Non	Non	Non

Conclusions et Perspectives

❑ Conclusions étude exploratoire

- **Bétons "non conformes" équivalents au béton conforme**
 - Caractéristiques classiques (état frais et Rc à l'état durci)
 - Indicateurs généraux et Grandeurs de durabilité
- **Limites actuelles de l'EN 206 ou de la FD P 18-480**
 - Dosage minimum en ciment et rôle des additions
 - Choix du ciment pour le béton de référence
 - Comportement des bétons en environnement très riche en sulfates

❑ Perspectives

- **Thèse FNTF / LMDC**
 - Recherche de candidat pour démarrage octobre 2025



Durabilité des bétons bas-carbone non structurels

Merci pour votre
attention

GIS DECADES – 13 Mai 2025



UNIVERSITÉ
TOULOUSE III
PAUL SABATIER

