

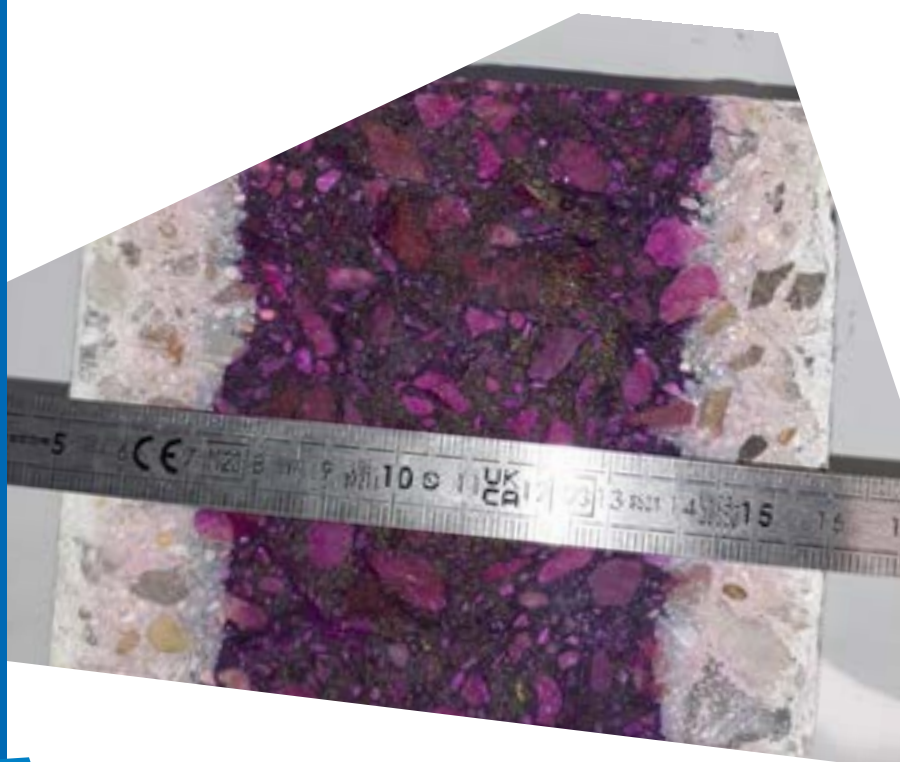
607.E - FÉVRIER 2026

ÉTUDES ET RECHERCHES

DURABILITÉ DES BÉTONS -
ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE
LA CONSERVATION SUR LES
BÉTONS À BASE DE LAITIER,
MÉTAKAOLIN ET CENDRES
VOLANTES

PAULO CLAUDE

CERIB
Expertise concrète



Durabilité des bétons - étude de l'influence de la conservation sur les bétons à base de laitier, métakaolin et cendres volantes

Avant-propos

Ce rapport est articulé en deux parties :

- la première partie est destinée au lecteur qui souhaite apprécier très rapidement si l'étude évoquée le concerne, et donc si les méthodes proposées ou si les résultats indiqués sont directement utilisables pour son entreprise ;
- la deuxième partie de ce document est plus technique ; il est donc possible d'y trouver tout ce qui intéresse directement les techniciens de notre industrie.

© 2025 CERIB – CS 10010 – 28233 Epervan Cedex

ISSN 0249-6224 – EAN 9782857553786

607.E – Décembre 2025

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction
par tous procédés réservés pour tous pays.

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de son article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (article L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon exposant son auteur à des poursuites en dommages et intérêts ainsi qu'aux sanctions pénales prévues à l'article L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle.

Sommaire

1. Synthèse générale de l'étude	7
1.1. Contexte	7
1.2. Contenu du présent rapport	7
2. Dossier de l'étude – Compositions des bétons étudiés, caractérisation des propriétés mécaniques, physico-chimiques et durabilité	9
2.1. Introduction – Contexte et objectifs	9
2.2. Matériaux et nomenclature	9
2.3. Objectifs expérimentaux	13
2.4. Conservation et préconditionnement	13
2.5. Calcul d'empreinte carbone	15
2.6. Méthodes et résultats	16
2.6.1. Résistance mécanique à la compression	16
2.6.2. Porosité accessible à l'eau	19
2.6.3. Perméabilité aux gaz	21
2.6.4. Suivi de perte de masse	22
2.6.5. Carbonatation accélérée	25
2.6.6. Carbonatation naturelle	28
2.6.7. Migration des ions chlorure sous champ électrique	30
2.6.8. Résistivité électrique	35
2.7. Discussions et analyses des résultats – additions pouzzolaniques et conditions de conservation	39
2.8. Approche prescriptive et approche performantielle décrite dans le fascicule FD P18-480 (2025)	44
2.9. Indicateur d'empreinte carbone	47
2.10. Conclusions	53
Bibliographie	55
Annexes	59
Annexe 1 – Fiches techniques des constituants	59
Annexe 2 – Valeurs numériques de suivi des conditions environnementales	67
Index des figures	69
Index des tableaux	70

1. Synthèse générale de l'étude

1.1. Contexte

La durabilité des ouvrages et le prolongement de la durée de vie des structures en béton constituent des défis majeurs pour les parties prenantes du secteur de la construction dans un contexte fort de transition écologique. Les enjeux se situent en particulier au niveau de la réduction de l'empreinte environnementale des ouvrages en béton et intègrent la nécessité de maîtriser leur durabilité. Pour les ouvrages existants, cela se traduit par le fait de maintenir la continuité de service en allongeant leur durée d'utilisation. Pour les ouvrages neufs, les leviers d'action concernent à la fois la conception et le dimensionnement optimisés des ouvrages, les process de mise en œuvre et les solutions matériaux à travers l'utilisation de bétons à empreinte carbone réduite, par exemple en utilisant des liants à moindre teneur en clinker. La durabilité de ces bétons constitue donc un enjeu majeur pour les acteurs de la construction et fait l'objet de nombreuses études portant, entre autres, sur les propriétés mécaniques et de durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures.

1.2. Contenu du présent rapport

C'est dans ce contexte que s'inscrivent les travaux de thèse de Paulo Claude « Monitoring and maintenance of concrete structure - Development of a corrosion predictive model and its methodology » (2023) [1], réalisés dans le cadre d'une collaboration entre Arcadis, le LMDC et le Cerib. Ces travaux visent à contribuer à l'étude et la prédiction de la phase d'initiation de la corrosion de l'acier dans les structures en béton armé, anciennes ou neuves, en intégrant les contraintes technico-économiques ainsi que les enjeux associés à la réduction de l'empreinte carbone de la construction et à l'entretien des infrastructures routières et maritimes. Pour répondre à ces objectifs, les travaux de thèse ont été basés sur des essais expérimentaux et un travail de modélisation prédictive. La campagne expérimentale a permis d'acquérir les indicateurs de durabilité de bétons à base de liants bas carbone. Six compositions de béton ont été étudiées et ont fait l'objet de caractérisations des propriétés mécaniques, de la microstructure, et des principales propriétés de durabilité (carbonatation accélérée et naturelle, pénétration des ions chlorure, transferts hydriques...). Les bétons testés sont composés de différents ciments (CEM III/B, CEM V/A (S-V) et CEM VI (S-V)), différentes additions (cendres volantes, laitier de haut fourneau, métakaolin) pour une même formule de béton visée (quantité de liant de 380 kg/m³, ratio E/L de 0,5 et squelette granulaire identiques). Cette formule unique est basée sur des formules de béton utilisés pour des viaducs existants.

Les résultats obtenus lors de l'étude de la pénétration des ions chlorure ont confirmé que l'ajout d'addition pouzzolanique et de laitier entraîne une amélioration des propriétés à travers une diminution du coefficient de diffusion des ions chlorure et une augmentation de la résistivité électrique. L'influence sur la vitesse de carbonatation est plus négative, avec une augmentation de la vitesse de carbonatation lorsque la quantité de clinker dans le liant diminue pour les paramètres de composition étudiés.

L'influence de la conservation est étudiée sur l'ensemble des formulations et sur les différentes propriétés mesurées. Les résultats ont montré qu'une conservation à 22 ± 2 °C et 40 ± 5 % d'humidité relative, moins favorable à l'hydratation et à l'amélioration des propriétés par rapport à une conservation dans l'eau, impacte différemment les bétons à haute teneur en clinker par rapport à ceux à plus fortes teneurs en additions minérales réactives. Cet impact, lié à la différence de conservation (calculée par différence entre la conservation humide et sèche), diffère aussi selon les propriétés. Les conclusions de l'étude soulignent l'importance d'un temps de cure plus long pour les bétons à plus forte teneur en additions

pouzzolaniques et en laitier, notamment pour des applications liées à des classes de carbonatation (XC). Cette nécessité d'augmenter le temps de cure des bétons est démontrée pour les formules de bétons considérés, avec un rapport E/L de l'ordre de 0.5. Cependant, d'autres solutions, tels que la réduction du rapport E_{eff}/L ou l'augmentation de la compacité du béton pourrait permettre de réduire l'influence négative d'une conservation défavorable, en réduisant la perte et l'évaporation d'eau par réduction de la perméabilité liquide des bétons.

Le présent rapport reprend une traduction d'un extrait du chapitre « travaux expérimentaux » du manuscrit de thèse de Paulo Claude (2023) [1]. Il reprend les compositions des bétons étudiés dans le programme expérimental de la thèse et les caractérisations des principales propriétés mécaniques, physico-chimiques et durabilité. Une analyse de l'influence des conditions de conservation sur les propriétés de durabilité est également détaillée.

L'extrait du chapitre « travaux expérimentaux » du manuscrit de thèse est ensuite complété par une analyse des bétons vis-à-vis du contexte normatif (NF EN 206/CN, FD P18-480). L'impact carbone des différentes formules de béton est évalué via le calcul de leur indicateur "Global Warming Potential" (GWP).

2. Dossier de l'étude – Compositions des bétons étudiés, caractérisation des propriétés mécaniques, physico-chimiques et durabilité

2.1. Introduction – Contexte et objectifs

Une campagne expérimentale a été réalisée dans le cadre de la thèse de Paulo Claude [1].

Les objectifs de cette campagne portaient sur la compréhension des comportements de différents bétons à faible empreinte carbone vis-à-vis de la durabilité. Les phénomènes de carbonatation et de pénétration des ions chlorure ont notamment été considérés.

Six formulations de béton sont donc proposées (Tableau 1). Les objectifs spécifiques couverts par cette campagne sont :

- l'étude du processus d'hydratation des cendres volantes et du métakaolin (avec les formulations F3_CEMI_0.52_V15%_52 et F4_CEMI_0.49_M15%_53 respectivement). L'objectif est de mesurer l'influence de ces additions pouzzolaniques et de celle du laitier sur les quantités d'hydrates, sur la vitesse de carbonatation et sur la résistance à la pénétration des ions chlorure ;
- l'étude de la durabilité des bétons armés vis-à-vis de la corrosion induite par carbonatation et par les chlorures. L'étude de liants bas carbone CEM III/B, CEM V/A (S-V) et d'un CEM VI (S-V) recomposé avec deux ciments, utilisés pour les formulations F2, F5 et F6, donne notamment un aspect novateur aux résultats obtenus pour leur considération dans les modèles prédictifs.

Les formulations des bétons sont basées sur des moyennes de compositions observées dans différentes structures maritimes et d'ouvrage d'art. Du sable et des gravillons du Boulonnais ont été choisis pour leurs propriétés représentatives de l'industrie. Il s'agit de granulats calcaire compacts avec un code A selon la norme NF P18-545 (2011). Les spécifications techniques des constituants sont disponibles en Annexe 1. Les compositions réelles sont données dans le Tableau 1.

La section 2.6 se concentre principalement sur les méthodologies utilisées et les résultats correspondants obtenus. Les discussions et conclusions, ainsi que le positionnement des performances des six bétons étudiés au regard de l'approche prescriptive (NF EN 206+A2/CN (2025)) et de l'approche performantielle (FD P18-480 (2025)) sont présentés dans la section 2.7.

2.2. Matériaux et nomenclature

Six formulations de béton ont été étudiées (Tableau 1). Les fiches techniques des différents constituants sont présentées en Annexe 1.

Les bétons ont été préparés à l'aide d'un malaxeur Skako d'une capacité maximale de 80 L. Outre la mesure de l'affaissement, l'air occlus et la masse volumique apparente ont également été mesurés sur le béton frais immédiatement après sa sortie du malaxeur. Ces mesures ont facilité une comparaison initiale entre différentes fabrications de la même formulation de béton. Les valeurs moyennes obtenues à partir de ces mesures sont présentées dans le Tableau 1.

Les formulations utilisées dans cette étude emploient toutes les mêmes types de sable et de gravillon ($D_{\max} = 12$ mm). Par conséquent, l'influence des granulats sur les différents bétons devrait être uniforme et donc négligeable lors de la comparaison des bétons pour chaque

propriété. De même, le rapport E_{eff}/L_{tot} a été choisi pour approcher une valeur de 0,5, et la quantité de liant total est d'environ 380 kg/m³ de béton. Ces valeurs ont été choisies en fonction de celles utilisées dans des structures contemporaines, facilitant ainsi une comparaison entre les résultats de laboratoire et ceux obtenus à partir de structures maritimes et de génie civil.

Pour renforcer la comparaison entre les mesures sur le terrain et expérimentales :

- la deuxième classe de cure définie par la norme NF EN 13670/CN (2013) est appliquée, imposant un gain de 35 % de la résistance à la compression à 28 jours avant le démoulage du matériau ;
- l'affaissement (slump) ciblé correspond à la catégorie S4 (NF EN 206+A2/CN (2025)). L'affaissement spécifié pour cette catégorie varie de 160 à 210 mm.

Il convient de clarifier la distinction entre le temps de cure, se référant à la durée avant le démoulage de l'échantillon, et les conditions de conservation des bétons au jeune âge, désignant la durée et les conditions de stockage avant la réalisation du test. Le temps de conservation inclut des périodes de stockage dans des environnements sec et humide, contrôlés (en température et humidité) et extérieur (définis ultérieurement).

La nomenclature appliquée est proche de celle utilisée dans le projet national PerfDuB. Elle améliore la compréhension de la composition et des propriétés du béton dès l'observation initiale. Cette notation fonctionne comme suit :

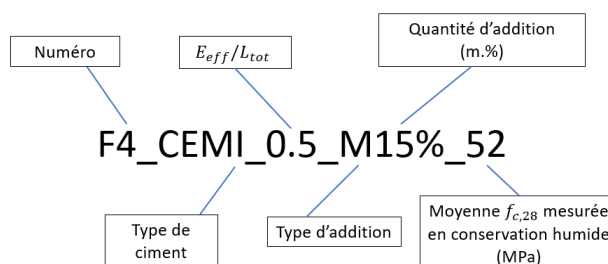


Figure 1 – Nomenclature utilisée dans le présent rapport (composition F4).

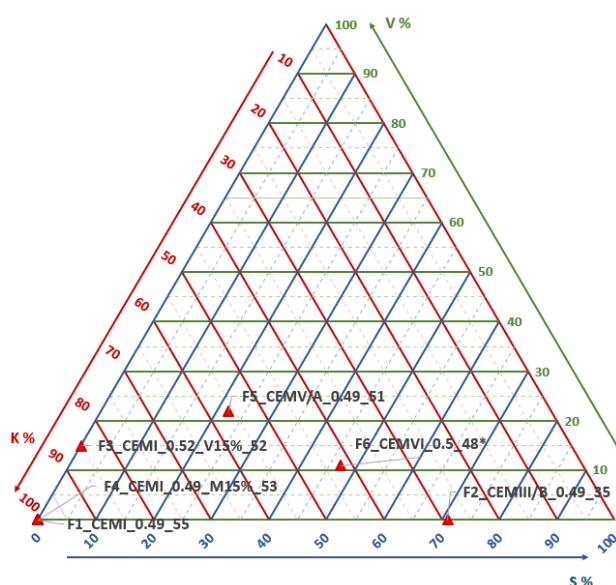


Figure 2 - Positionnement des formules de bétons sur le diagramme ternaire Clinker-Laitier-Cendres volantes (K-S-V).

Tableau 1 - Compositions des six bétons définis pour la campagne expérimentale.

N°	1	2	3	4	5	6
Nom	F1_CEMI_0.49_55	F2_CEMIII/B_0.49_35	F3_CEMI_0.52_V15%_52	F4_CEMI_0.49_M15%_53	F5_CEMV/A_0.49_51	F6_CEMVI_0.5_48*
Type de ciment (et dosage kg/m ³)	CEM I 52,5 N - SR 5 CE PM-CP2 Lafarge (383)	CEM III/B 32,5 N-LH/SR CE PM-CP1 NF "SPM" Calcia Rombas (377)	CEM I 52,5 N - SR 5 CE PM-CP2 Lafarge (319)	CEM I 52,5 N - SR 5 CE PM-CP2 Lafarge (320)	CEM V/A (S-V) 42,5 N CE PM-ES-CP1 NF « PMF3 » Calcia Rombas (377)	CEM V/A (187) + CEM III/B (187)
Type d'addition (et dosage kg/m ³)	-	-	Cendres volantes Gardanne Surschiste (k = 0,60) (56)	Metakaolin Argicem Argeco (k = 1) (56)	-	-
Boulonnais 0/4 (kg/m ³)	943	929	923	927	930	924
Boulonnais 4/12 (kg/m ³)	870	857	853	855	859	853
Glenium sky (kg/m ³)	1,6**	2,9***	1,3***	3,4**	2,5**	2,0**
E_{eff}/L_{tot}	0,49	0,49	0,52	0,49	0,49	0,50
Slump (cm)	18,7	19,6	20,3	17,8	17,0	18,0
Volume de pâte (L/m ³)	323	324	320	329	328	329
Clinker (m.% liant)	99	29	84	84	56	42
Laitier (m.% liant)	0	71	0	0	22	47
Cendres volantes (m.% liant)	0	0	15	0	22	11
Métakaolin (m.% liant)	0	0	0	15	0	0

* Cette formulation a été recomposée en utilisant deux ciments pour obtenir un liant équivalent au CEM VI (S-V) en termes de proportions.

** Glenium sky 537.

*** Glenium sky 841.

Tableau 1 - Compositions des six bétons définis pour la campagne expérimentale (suite).

N°	1	2	3	4	5	6
Nom	F1_CEMI_0.49_55	F2_CEMIII/B_0.49_35	F3_CEMI_0.52_V15%_52	F4_CEMI_0.49_M15%_53	F5_CEMV/A_0.49_51	F6_CEMVI_0.5_48*
Air occlus (%)	1.6	1.1	1.3	1.4	1.0	1.4
Masse volumique à l'état frais (kg/m ³)	2384	2365	2364	2360	2378	2351
Empreinte carbone ($kg_{CO_2}eq/m^3$)**	296	128	255	260	189	159
Âge au démoulage (jours)	1	2	1	1	2	3

* Cette formulation a été recomposée en utilisant deux ciments pour obtenir un liant équivalent au CEM VI (S-V) en termes de proportions.

** Valeurs obtenues en considérant uniquement la somme de l'empreinte carbone de chaque constituant, pour 1 m³ de béton (détails du calcul au paragraphe 2.5). Ces données sont exploitées et discutées au paragraphe 2.9.

2.3. Objectifs expérimentaux

Les essais réalisés sur les différentes formulations sont présentés dans le Tableau 2. La plupart des essais sont réalisés à la suite de différentes conditions de conservation. Les conditions spécifiques relatives à chacun des trois types de conservation sont détaillées dans la section suivante.

Tableau 2 - Plan expérimental réalisé pour les six formulations de béton.

Essai	Norme	But/ Paramètre	Conservation (Section 2.4)	Temps de conservation (jours)	Échéances de mesure (jours)
Perméabilité aux gaz	XP P18-463 (2011)	K_{gaz} (m ²)	Conditions humide (CH), sèche (CS) et extérieur (CE)	90	7, 28, sec
Porosité accessible à l'eau et masse volumique	NF P18-459 (2022)	ϕ_{eau} (%), $\rho_{béton}$ (kg/m ³)	CH, CS, CE	90	-
Migration des ions Cl ⁻ en régime non- stationnaire	XP P18-462 (2022)	Coefficient de migration D_{rcm} (m ² /s)	CH, CS, CE	28, 90	-
Résistivité électrique	XP P18-481 (2022)	Résistance ohmique (R_e , Ohm)	CH, CS, CE	7, 28, 90	-
Résistance en compression	NF EN 12390-3 (2019)	f_c (MPa)	CH, CS, CE	1*, 7, 28, 90	-
Carbonatation accélérée	XP P18-458 (2022)	V_{acc}	CH, CS	90	0, 28, 42, 70
Carbonatation naturelle	NF EN 12390-10 (2018)	V_{nat}	CS, CE	0	365
Suivi de perte de masse	[2]	Perméabilité liquide (K_{liq} , m ²)	CH, CS, CE	90	Suivi sur 90 jours

* Réalisé directement après démoulage (35 % de la résistance en compression moyenne à 28j atteinte).

Notons que la conservation sèche (CS) correspond à $22 \pm 2^\circ\text{C}$ et $40 \pm 5\%$ HR come décrit ci-après.

2.4. Conservation et préconditionnement

Trois méthodes de conservation différentes en termes d'humidité relative et de température ont été appliquées. Les conditions de CE reproduisent les conditions environnementales d'une structure abritée de la pluie, facilitant ainsi la comparaison entre les mesures de laboratoire et les mesures sur le terrain. Les valeurs statistiques de ces conditions environnementales mesurées au cours de cette étude sont résumées dans le Tableau 3. L'application de différentes conditions de conservation a deux objectifs dans cette recherche :

- le premier objectif est de mesurer l'impact des conditions de conservation sur l'hydratation et les différentes propriétés mesurées dans cette étude. Des résultats différents sont attendus en fonction du type de liant utilisé ;
- le deuxième objectif est de recueillir des données pour calibrer les modèles prédictifs (notamment SDReaM-Crete [1], [3], [4]), permettant ainsi de mieux prendre en compte la qualité du béton en relation avec le type de liant et sa conservation. Cet aspect est souvent négligé dans la modélisation, malgré son influence significative sur la durabilité.

Cela est particulièrement vrai pour les bétons à haute teneur en constituants autres que le clinker (additions minérales). L'utilisation des données pour la modélisation n'est pas incluse dans ce rapport mais peut être trouvée dans la thèse de Paulo Claude (2023) [1].

Tableau 3 - Valeurs statistiques définissant les conditions environnementales des 3 types de conservation.

Paramètre	Valeur statistique	Conservation humide (CH)	Conservation sèche (CS)	Conservation extérieure abritée de la pluie (CE)
HR (%)	Moyenne	99	37	80
	CoV (%)	2	19	23
	Percentile 1	97	22	32
	Percentile 99	100	61	100
	Imposée ou mesurée	Imposée	Mesurée	Mesurée
T (°C)	Moyenne	20,1	20,3	10,8
	CoV (%)	3,7	2,6	62,1
	Percentile 1	17,4	17,3	-3,1
	Percentile 99	21,8	26,0	27,6
	Imposée ou mesurée	Imposée	Imposée	Mesurée
Appareil de mesure		Rotronic (HC2-S)	Rotronic (HL-1D-SET)	Station météo (NEW WMS-25-NEMA)

Comme prévu, les conditions environnementales présentées dans le Tableau 3 suggèrent un taux de saturation plus élevé pour les échantillons stockés en salle humide (CH) par rapport aux deux autres conditions, ce qui entraînera (à température équivalente) un degré d'hydratation plus élevé des matrices cimentaires. Une humidité relative plus faible dans les conditions CS et CE devrait avoir un impact sur le processus d'hydratation, tout comme la température moyenne plus basse en CE.

Pour les principaux essais, deux séries d'échantillons de béton ont été produites en deux lots pour chaque formulation de béton. La première série a été utilisée pour déterminer la porosité accessible à l'eau, la perméabilité aux gaz, la résistivité électrique et le coefficient de migration des chlorures. La deuxième série a été utilisée pour déterminer la perméabilité à l'eau et les vitesses de carbonatation accélérée et naturelle.

Les deux lots ont été fabriqués dans la même semaine, dans le but de minimiser les variations des conditions de conservation entre la conservation sèche (CS) et la conservation extérieure (CE). Il peut donc être raisonnablement supposé que les échantillons des deux lots ont subi des traitements de conservation similaires.

Le Tableau A1 (cf. Annexe 2) présente les valeurs moyennes de l'humidité relative (RH_{env}) et de la température (T_{env}) mesurées pendant la période de conservation de 90 jours pour chaque béton.

Une analyse préliminaire des données présentées dans le Tableau 3 et le Tableau A1, révèle que la variabilité des conditions en CS est inférieure à celle en CE. Par conséquent, le document se concentrera principalement sur la comparaison des valeurs obtenues à partir des bétons conservés en CH avec celles obtenues en CS.

2.5. Calcul d'empreinte carbone

Le développement de nouveaux liants incorporant des additions minérales s'inscrit dans une démarche de limitation du réchauffement climatique et de préservation des espaces naturels et de la biodiversité. L'un des objectifs principaux est la réduction de la teneur en clinker dans le liant permettant de réduire l'empreinte carbone liée à la production de béton.

Évaluer l'impact environnemental d'un mélange spécifique, notamment les émissions de carbone résultant de son processus de fabrication, est devenu crucial dans le domaine de l'ingénierie structurelle.

Dans ce contexte, l'évolution de la justification de la durabilité des ouvrages en béton armé, tel que décrit dans le récent fascicule de documentation FD P18-480 (2025), permet une plus grande flexibilité en termes de composition des bétons pour les concepteurs de structures et les entreprises de construction. Cette approche offre des opportunités de réduction des émissions de carbone, à condition que certaines propriétés de durabilité respectent les valeurs seuils spécifiées dans le fascicule (voir la section 2.8).

Dans cette étude, l'empreinte carbone des différents bétons a été estimée avec diverses hypothèses. Premièrement, des valeurs pour l'empreinte carbone liée aux matières premières ont été utilisées (Tableau 4). Deuxièmement, le transport des constituants jusqu'à la centrale n'a pas été considéré dans la présente approche.

Tableau 4 - Empreinte carbone ($kg_{CO_2}eq/m^3$) des différents constituants et références utilisées.

Constituant	Empreinte carbone ($kg_{CO_2}eq/m^3$, Décembre 2022)	Référence
CEM I	765	[6]
CEM III/B	325	
CEM V/A – (S-V)	484	
Cendres volantes	27	[7]
Métakaolin flash	139	[8]
Superplastifiant	1530	[9]
Sable	2,74	[10]
Granulat		
Eau	0,132	[11]

Dans cette étude, la sélection des compositions de liants a également été guidée par la considération de l'empreinte carbone. L'objectif principal de cette recherche est d'améliorer la prise en compte de béton avec des liants à faibles taux de clinker dans la modélisation. Dans ce contexte de réduction de la teneur en clinker par ajout d'additions minérales, une comparaison de l'empreinte carbone équivalente est réalisée pour classer chaque béton formulé.

En utilisant les valeurs présentées dans le Tableau 4, il est possible de calculer l'empreinte carbone associée à chaque composition dans ce plan expérimental. Ces valeurs calculées peuvent être trouvées dans le Tableau 5.

L'empreinte carbone pour le béton F6_CEMVI_0.5_48, composé en réalité d'un mélange de CEM III/B (50%) et de CEM V/A (50%), a été calculée à partir de la moyenne des empreintes carbone de ces deux ciments.

Tableau 5 - Empreinte carbone ($kg_{CO_2}eq/m^3$) calculée pour chaque formulation.

Nom	Empreinte carbone ($kg_{CO_2}eq/m^3$)
F1_CEMI_0.49_55	296
F2_CEMIII/B_0.49_35	128
F3_CEMI_V15%_0.52_52	255
F4_CEMI_M15%_0.49_53	260
F5_CEMVA_0.49_51	189
F6_CEMVI_0.5_48*	159

* Cette formulation a été recomposée à partir de deux ciments pour obtenir une composition équivalente à un CEM VI (S-V).

En plus de considérer l'impact environnemental du matériau, Il est aussi crucial d'appliquer une démarche d'optimisation à l'échelle des ouvrages en béton. Dans ce cadre, les travaux réalisés par le deuxième groupe de travail (TF2) de la commission de normalisation AFNOR P18B/GE SBC (Solutions Bas Carbone) ont permis l'élaboration du fascicule de documentation FD P18-483-2 (2025) « Ecoconception des structures en béton – Partie 2 : Spécification des bétons pour des ouvrages à impact carbone réduit ». Il permet la prise en compte des propriétés mécaniques et de la conception structurelle (enrobage) en plus de l'empreinte carbone d'une formule de béton au m^3 . Cette démarche permet une analyse plus complète et plus réaliste pour l'optimisation des ouvrages. Cette approche est explorée plus en détail dans la section 2.9 après la présentation des résultats de durabilité, qui sont essentiels pour déterminer la conception optimale d'un composant exposé à un environnement spécifique (classe d'exposition au sens de la norme NF EN 206+A2/CN).

2.6. Méthodes et résultats

Cette section présente les différentes procédures expérimentales et les résultats obtenus sur bétons.

Les figures illustrent les valeurs moyennes obtenues à partir de trois échantillons. Les barres d'erreur affichées correspondent aux valeurs minimales et maximales obtenues.

2.6.1. Résistance mécanique à la compression

Les résistances à la compression (f_c) ont été mesurées pour chaque béton sous différentes conditions de conservation, conformément aux directives fournies par la norme NF EN 12390-3 (2019) [12]. Les essais de résistance à la compression ont été réalisés sur des échantillons cubiques de 100 mm à 1 ou 2 jours, selon la date de démoulage. Ensuite, des évaluations de la résistance à la compression ont été effectuées sur des cylindres de 110/220 mm à 7, 28 et 90 jours de conservation.

Les valeurs sont ajustées pour tenir compte de l'influence de la géométrie sur la résistance à la compression (f_c) conformément aux recommandations de la norme NF EN 206+A2/CN (2025).

La Figure 3 illustre les valeurs moyennes de f_c obtenues à partir de ces échantillons après une période de conservation de 28 jours. Ces valeurs sont calculées à partir de différents lots d'échantillons fabriqués pour l'étude. Il est important de noter que certaines formulations peuvent présenter une plus grande variation de la résistance à la compression sous des conditions de conservation extérieure et sèche.

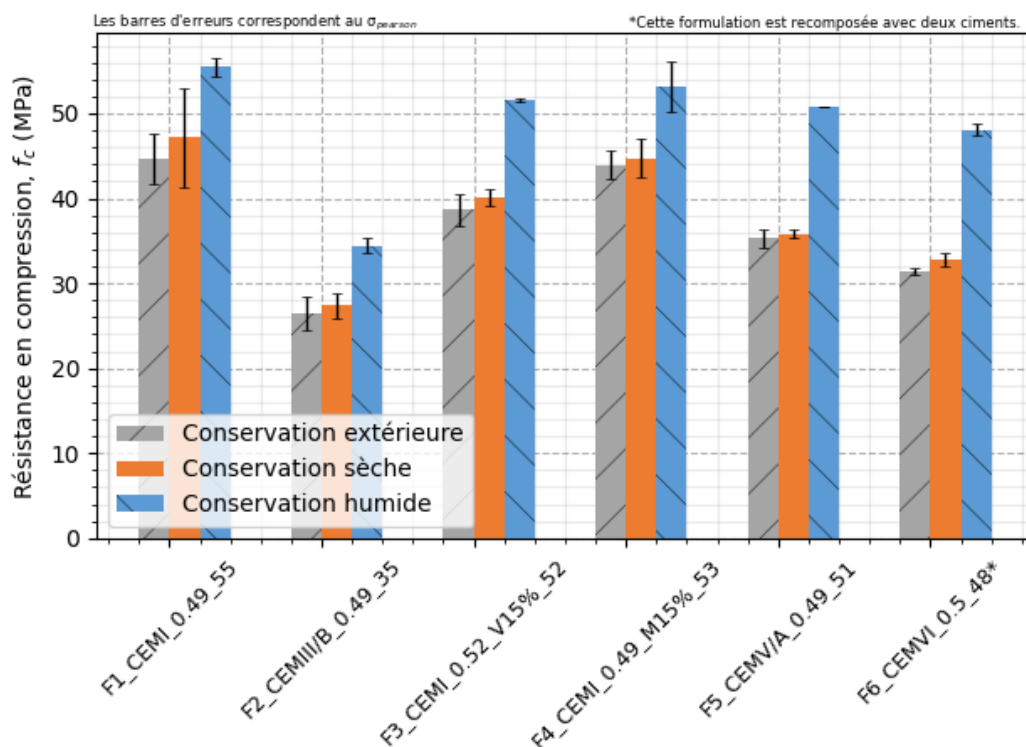


Figure 3 - Valeurs moyennes de résistance à la compression f_c obtenues pour chaque formulation et chaque condition de conservation après 28 jours.

Comme attendu, il est observé que la conservation humide conduit à des valeurs plus élevées pour f_c . La conservation sèche produit des valeurs moyennes légèrement supérieures à celles de la conservation en extérieur, bien que CS ne soit pas toujours plus favorable à l'hydratation que CE. Le facteur vent est certainement responsable de cette observation. En extérieur, pour une humidité relative similaire, le vent peut induire une dessiccation plus forte.

La différence entre les valeurs obtenues en conservation humide et les deux autres méthodes de conservation varie selon les compositions. Des différences plus importantes sont obtenues pour F5 et F6, probablement en raison d'une forte teneur en ajout pouzzolanique. Cela suggère que, l'eau a un impact fort sur la réaction pouzzolanique en permettant la dilution, la migration et la réaction des différents réactifs. Ainsi, avec une quantité moindre d'eau dans le matériau béton, l'hydratation du laitier, du métakaolin et des cendres volantes est limitée, ce qui entraîne une augmentation limitée de la résistance mécanique. Cette différence de variation observée entre F3 (22 %) et F4 (16 %) pourrait également indiquer que les cendres volantes nécessitent plus d'eau que le métakaolin dans ces conditions. Cela peut être attribué à une cinétique d'hydratation plus lente des cendres volantes par rapport au métakaolin [14], [15], [16]. Cependant, la différence entre les deux valeurs est faible, et d'autres facteurs tels que les différentes valeurs de E_{eff}/L_{tot} pourraient également être responsables, compliquant l'analyse.

Dans le cas de F2, la différence de conservation entre la conservation humide et les deux autres conditions reste relativement faible, malgré la forte teneur en laitier. Cela peut être attribué à la présence insuffisante de portlandite, qui devient le facteur limitant dans le processus d'hydratation du laitier. Une autre explication est que la résistance mécanique de ce béton est moins contrôlée par la matrice cimentaire, ce qui conduit à une moindre sensibilité aux conditions de conservation.

La Figure 4 illustre les variations de f_c pour tous les bétons conservés en conditions humides tandis que la Figure 5 donne l'évolution des ratios $f_c/f_{c,90j}$, permettant d'observer les cinétiques de montées en résistance.

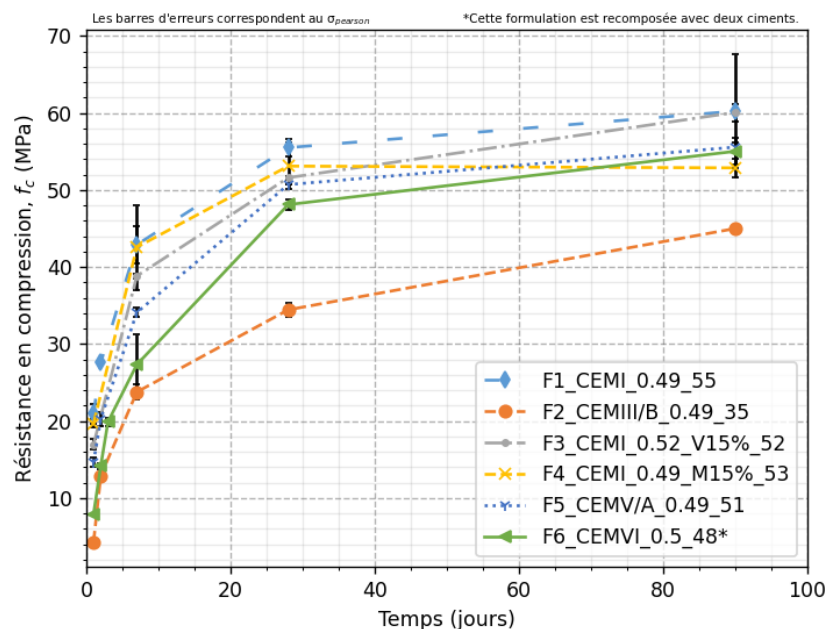


Figure 4 - Évolutions des résistances en compression des différentes formulations conservées en conditions humides.

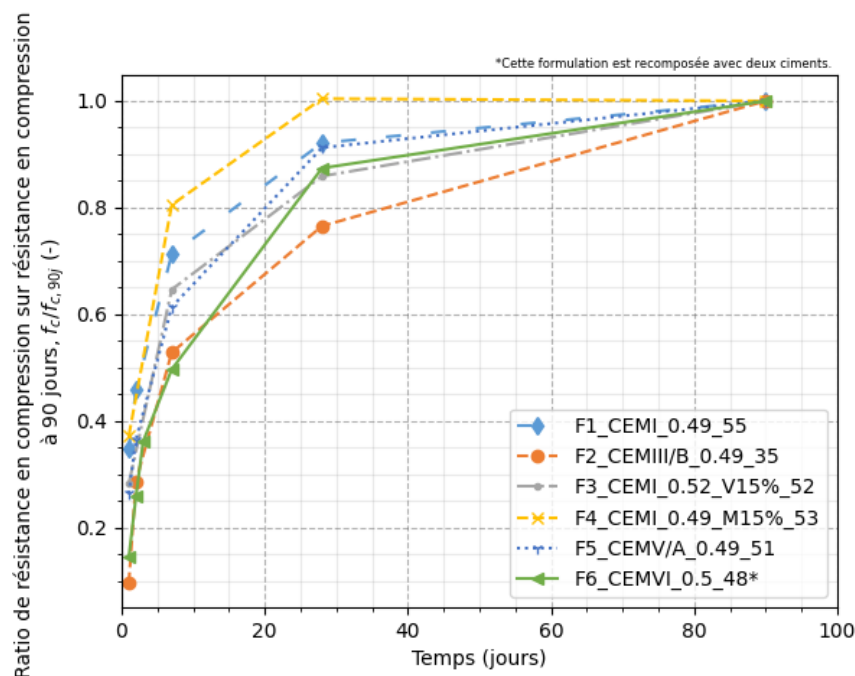


Figure 5 - Évolutions des résistances en compression des différentes formulations conservées en conditions humides sous la forme de ratio $f_c(t)/f_{c,90j}$.

La Figure 4 et la Figure 5 montrent une hydratation plus lente des cendres volantes par rapport au métakaolin (respectivement F3 et F4), avec les valeurs de F3 dépassant celles de F4 après 90 jours de conservation humide.

Cela confirme que le béton contenant des cendres volantes nécessite une exposition plus longue à des conditions humides favorables à l'enchaînement des réactions d'hydratation, comme illustré dans la Figure 3. La réactivité élevée du métakaolin a quant à elle déjà été démontrée [15], [17].

En général, les formulations avec une teneur en clinker plus faible et sans adjuvant chimique spécifique (accélérateur de durcissement) montrent une augmentation plus lente de la résistance mécanique. Ce point est observable pour F2 et F6, où une différence notable peut être observée entre les deux compositions après 7 jours de conservation et le reste des formulations. Notamment, la valeur de résistance à la compression de F6 rattrape presque celle de F5 après 28 et 90 jours de conservation CH. Les améliorations observées avec F6 par rapport à F2 sont probablement attribuables à une teneur en portlandite plus élevée, permettant l'hydratation du laitier introduit par les 50 % massique de CEM III/B, ainsi qu'à l'augmentation de la résistance moyenne du ciment (mélange de ciments à 50 m.% de CEM V/A 42,5 et de 50 m.% de CEM III/B 32,5 pour F6 en comparaison d'un unique ciment CEM III/B 32,5 pour F2).

Il est bien connu que les conditions de conservation jouent un rôle significatif dans le développement des propriétés mécaniques, en particulier pour les bétons à faible teneur en clinker [18]. Cette corrélation est flagrante dans la Figure 3 avec la différence de résistance à la compression obtenue entre la conservation sèche (CS) et la conservation humide (CH) pour les bétons F6 (42,5 m.% de clinker, 32 %MPa), F5 (56 m.% de clinker, 29 %MPa), F3 (85 m.% de clinker, 22 %MPa) et F1 (environ 100 m.% de clinker, 15 %MPa). Il est également visible dans la Figure 4, que les bétons à faible teneur en clinker nécessitent un temps de conservation plus long pour atteindre la résistance à la compression maximale.

2.6.2. Porosité accessible à l'eau

L'évaluation de la porosité accessible à l'eau (φ , %) a été réalisée sur les six formulations de béton après une période de conservation de 90 jours. La procédure utilisée est conforme à la norme NF P18-459 (2022) [19].

La porosité accessible à l'eau joue un rôle significatif dans l'évaluation de la durabilité du béton, servant d'indicateur général pertinent, même si celle-ci est parfois controversée. Elle influence la diffusion des espèces agressives et fournit des informations sur les capacités de transfert d'eau du matériau. De plus, cette propriété peut être utilisée pour estimer la résistance du béton à la carbonatation et à la corrosion (rapportée à la fraction volumique de la pâte, $F_{pâte}$), comme décrit dans l'approche performantielle détaillée dans le fascicule FD P18-480 (2025).

Les valeurs obtenues pour les trois conditions de conservation sont représentées dans la Figure 6.

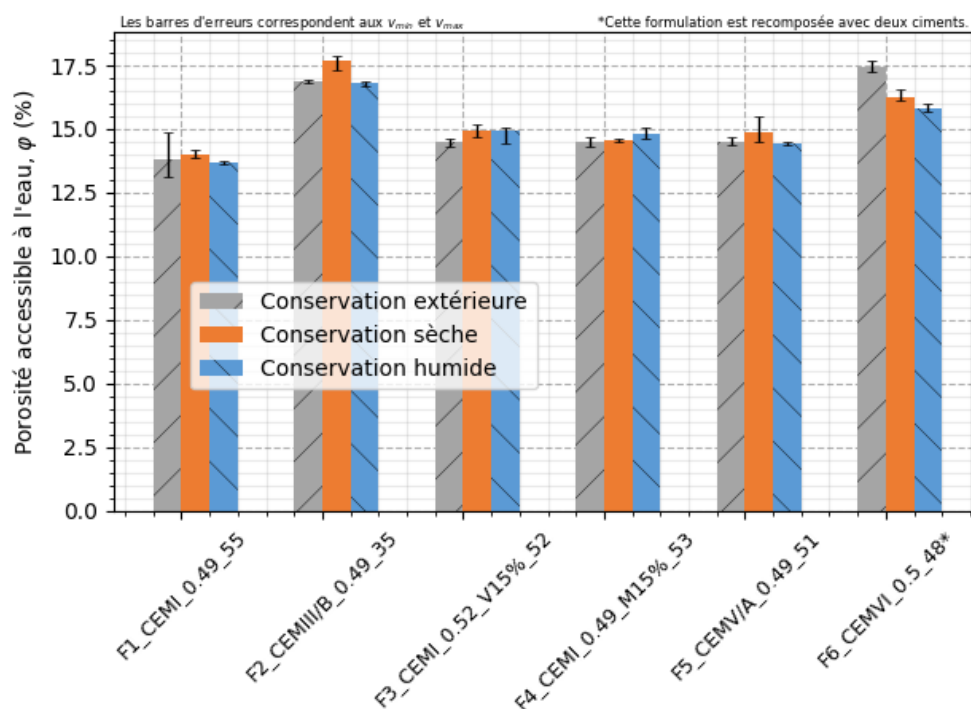


Figure 6 - Valeurs moyennes de porosité accessible à l'eau obtenues pour chaque formulation et chaque condition de conservation.

Les résultats obtenus révèlent des tendances différentes par rapport aux données de résistance mécanique. La condition de conservation n'exerce pas une influence notable sur la porosité accessible à l'eau, même pour les bétons contenant une forte proportion d'ajouts minéraux. Une des raisons est que la porosité fournie par les granulats n'est pas affectée par les conditions de conservation, ce qui explique en partie la faible différence entre les trois conditions. Seul F6 présente un niveau réduit de porosité accessible à l'eau dans les corps d'épreuve conservés en conditions humides (CH).

La Figure 6 montre des valeurs plus élevées de porosité accessible à l'eau pour F2 et F6. Cela peut être attribué à l'utilisation du ciment CEM III/B 32.5 et à un faible taux d'hydratation du laitier. Les volumes de pâte des différents bétons sont proches et ne sont certainement pas responsables de cette observation (Tableau 1). La diminution de la porosité accessible à l'eau en CH pour F6 peut résulter de l'effet combiné de la présence d'eau et de clinker, permettant une plus grande hydratation du laitier. De plus, le type de ciment utilisé dans F2 et F6, qui a une résistance caractéristique plus faible par rapport aux autres ciments utilisés, peut contribuer aux valeurs plus élevées observées. Il est cependant aussi possible que l'augmentation de la porosité observable pour les bétons F2 (71 m.% de laitier) et F6 (46.5 m.% de laitier et 11 m.% de cendres volantes) soit liée à la présence de laitier et la température de séchage de 105 °C. Il a en effet été montré dans la littérature [20] que les hydrates formés dans les bétons avec une forte teneur en laitier pouvaient être plus sensibles à ces gammes de température et donc entraîner une perte de masse supplémentaire pendant le conditionnement classique de l'essai NF P18-459 (2022), menant à des valeurs de porosité accessible à l'eau plus élevées. Afin de vérifier ce point sur les formules de cette étude, un conditionnement à 80 °C aurait pu être réalisé comme dans [20]. Il est possible que ce principe s'applique aussi aux additions pouzzolaniques, ce qui pourrait expliquer les valeurs légèrement plus élevées obtenues avec les bétons F3 (15 m.% de cendres volantes), F4 (15 m.% de métakaolin) et F5 (22 m.% de laitier et 22 m.% de cendres volantes) par rapport à F1.

Les valeurs de porosité obtenues sont utilisées dans la section 2.8 pour classer le béton selon la norme FD P18-480 (2025) pour les classes d'exposition XC.

2.6.3. Perméabilité aux gaz

La perméabilité aux gaz a été mesurée sur les six formulations de béton pour chacune des trois conditions de conservation. La procédure de test utilisée suit la norme XP P18-463 (2023). Cette section présente uniquement les résultats obtenus à partir des échantillons secs (K_{sec} , séchés à 105 °C jusqu'à atteindre une masse constante). Cette valeur correspond à la perméabilité intrinsèque du matériau.

La Figure 7 illustre les valeurs obtenues pour les six bétons et les trois conditions de conservation.

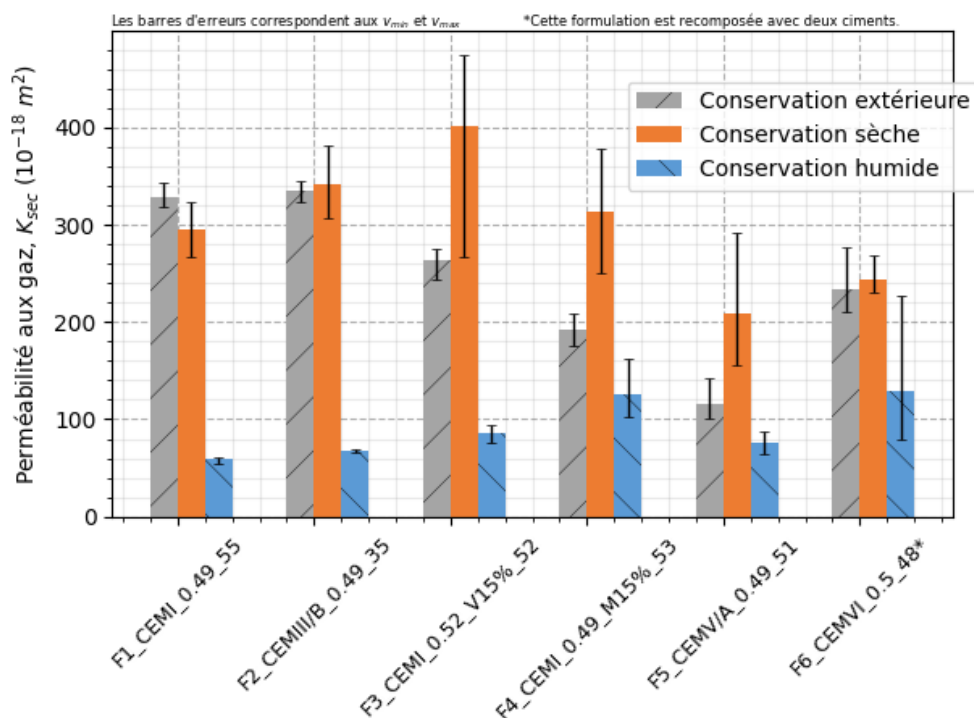


Figure 7 - Valeurs moyennes de perméabilité aux gaz mesurées sur bétons secs (K_{sec}) pour chaque condition de conservation.

Les écarts entre les valeurs minimale et maximale observées dans la mesure de la perméabilité aux gaz, en particulier pour la condition de conservation CS, sont supérieurs à ceux obtenus pour la porosité accessible à l'eau et la résistance mécanique.

Les différences observées entre les trois conditions de conservation montrent que la conservation humide (CH) conduit systématiquement à des valeurs de perméabilité aux gaz plus faibles comparées à la conservation sèche (CS) et à la conservation extérieure (EC) pour tous les bétons. Notamment, la différence entre CH et CS est plus prononcée pour les bétons F1, F2 et F3, ce qui contraste avec les résultats de la résistance à la compression illustrés dans la Figure 3. Dans cette dernière figure, la différence est plus significative pour les bétons F5 et F6 par rapport aux autres bétons. Cette divergence suggère que les impacts de l'hydratation du clinker, du laitier, du métakaolin et des cendres volantes sur la porosité fine (inaccessible à l'eau), la tortuosité et le degré de connectivité des pores diffèrent de leur influence sur la résistance mécanique.

Les conditions environnementales associées à CS et CE, comme indiqué dans le Tableau 3, peuvent expliquer certaines variations. L'humidité relative moyenne plus élevée en CE, à laquelle F3, F4 et F5 ont été exposés (85 %, 91 % et 89 % respectivement), favorise l'hydratation et réduit ainsi la perméabilité aux gaz par rapport aux résultats observés pendant la conservation à sec.

Globalement, la perméabilité aux gaz semble plus influencée par les conditions de conservation que la porosité accessible à l'eau. Ces résultats pourraient signifier que les conditions de conservation ont un impact plus grand sur certains aspects de la microstructure (tortuosité, connectivité des pores) que sur la valeur globale de la porosité accessible à l'eau (certainement plus contrôlée par la composition du béton). L'apparition de microfissures par retrait de dessiccation pourrait aussi expliquer pourquoi les conservations sèche et extérieure (CS, CE) mènent à des résultats plus importants pour ce paramètre. L'effet des conditions de conservation sur la tortuosité de la porosité accessible à l'eau est étudié dans la section 2.6.4 en investiguant la perméabilité à l'eau par un suivi de perte de masse.

Cependant, il est important de noter que l'état initial des échantillons juste avant les essais variait en fonction de la méthode de conservation employée (CE, CS ou CH). Malgré le préconditionnement pour ce test, il est probable que les valeurs obtenues pour le paramètre K_{sec} aient été influencées par cet aspect. Par conséquent, cela pourrait être un facteur contribuant aux résultats et exacerbant la différence entre CH et les autres méthodes de conservation.

2.6.4. Suivi de perte de masse

Le test décrit dans cette section visait à estimer la perméabilité aux liquides en utilisant le modèle SDReaM-Crete [1].

La procédure expérimentale a été réalisée conformément aux études [2], [3]. Elle consiste à saturer les échantillons avec de l'eau et à évaluer la perméabilité unidirectionnelle dans des conditions environnementales contrôlées.

Après une période de conservation de 90 jours, des échantillons cylindriques mesurant 110/50 mm ont été découpés dans un échantillon cylindrique de 110/220 mm. Pour garantir la diffusion unidirectionnelle de l'eau, un revêtement en scotch aluminium a été appliqué sur la face circulaire des échantillons cylindriques. Les échantillons ont ensuite été saturés en suivant la même procédure de préconditionnement décrite dans la norme NF P18-459 (2022) [19].

Après une exposition de 44 heures à l'eau sous vide, les échantillons ont été placés dans un environnement identique à celui utilisé pour la Conservation Sèche (CS). La température et l'humidité relative ont été surveillées à l'aide d'un appareil Rotronic (HL-1D-SET). Des mesures de masses quotidiennes ont été effectuées pour déterminer la perte de poids résultant de l'évaporation de l'eau.

La Figure 8 illustre les valeurs moyennes obtenues à partir de trois échantillons pour chaque béton et chaque condition de conservation.

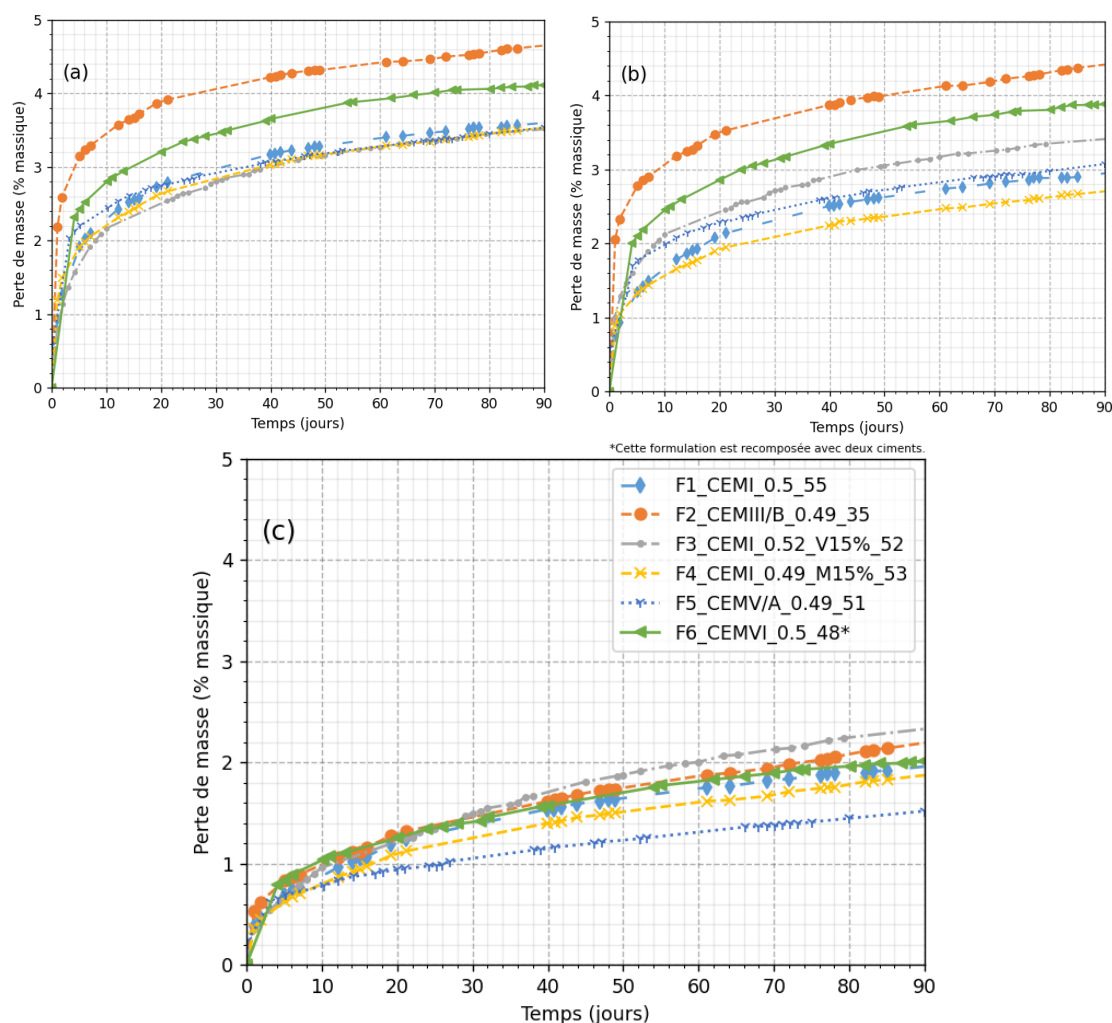


Figure 8 - Valeurs moyennes de suivi de perte de masse des échantillons de chaque formulation conservés 90 jours en CS (a), CE (b) et CH (c).

Les valeurs statistiques de l'humidité relative et de la température mesurées tout au long de la période de suivi de 90 jours sont présentées en Annexe 2. Notamment, la température enregistrée pour F3 a montré une moyenne inférieure par rapport aux autres bétons. Cette variation est susceptible d'avoir entraîné un taux de séchage plus lent de l'échantillon et une perméabilité apparente aux liquides réduite.

Les résultats de suivi de perte de masse illustrés dans la Figure 8 révèlent une distinction significative entre les bétons conservés en conditions humides (CH) et les deux autres conditions. En effet, les conditions de conservation ont un impact substantiel sur la capacité de transfert hydrique du matériau béton. Ce constat diffère des résultats de la porosité accessible à l'eau obtenus dans la section 2.6.2. Cela peut suggérer que bien que les conditions de conservation exercent une influence minimale sur la valeur globale de la macroporosité, leurs effets sur le réseau poreux, tels que la tortuosité ou le degré de connectivité des pores, entraînent une capacité de transport de l'eau distincte.

Les différences de perte de masse observées après 90 jours de surveillance entre les échantillons conservés en CH et CS sont présentées dans le Tableau 6. Les plus grandes différences (à la fois absolues et relatives) ont été observées avec les compositions contenant des quantités plus élevées d'ajouts minéraux (F2, F5 et F6). Cela confirme que les conditions de conservation jouent un rôle significatif sur les propriétés de transfert hydrique de ces liants.

Pour CS et CE, il est évident que F2 présente la perméabilité aux liquides la plus élevée, entraînant une perte de masse plus rapide, suivie par F6. Cela peut être attribué à l'utilisation du ciment CEM III/B, qui nécessite une exposition plus longue à un environnement humide pour une hydratation complète. De plus, la porosité accessible à l'eau plus élevée dans ces bétons conduit à une perte de contenu en eau plus importante (Figure 6). En revanche, en CH, les différences entre les divers bétons sont moins prononcées, indiquant une microstructure plus uniforme et probablement une tortuosité plus élevée comparée à CS et CE.

Tableau 6 - Différence de perte de masse entre les échantillons conservés en CH et CS après 90 jours de séchage.

Composition	F1_CEMI _0.49_55	F2_CEMIII/B _0.49_35	F3_CEMI_0.52 _V15%_52	F4_CEMI_0.49 _M15%_53	F5_CEMV/A _0.49_51	F6_CEMVI _0.5_48*
Différence relative entre CH et CS (%)	45	53	33	47	57	51
Différence absolue entre CH et CS (m.%)	1,64	2,45	1,16	1,66	2,02	2,10

* Cette formulation est recomposée à partir de deux ciments.

La comparaison des compositions F1, F3 et F4 peut aboutir à des conclusions différentes concernant l'influence des cendres volantes et du métakaolin sur la perméabilité aux liquides. Tout d'abord, la courbe de F4 reste systématiquement en dessous de celle de F1 et F3, quelle que soit la condition de conservation. Cela implique que l'ajout de métakaolin (à hauteur de 15 m.%) réduit la perméabilité globale à l'eau du matériau.

L'analyse de F3 est légèrement plus complexe. À l'exception des éprouvettes conservées en CS, les valeurs de perte de masse de F3 sont toujours supérieures à celles de F1. De plus, les conditions environnementales du test pour F3 présentent une humidité relative moyenne plus élevée et une température moyenne plus basse comparativement aux conditions de test pour F1 et F4 (Annexe 2). Cela suggère que, sous les mêmes conditions, la perte de masse de F3 aurait probablement été encore plus élevée que celle des deux autres compositions. Par conséquent, les cendres volantes semblent augmenter la perméabilité à l'eau pour cette composition particulière.

Enfin, une valeur de perméabilité à l'eau faible peut être observée pour F5, en particulier pour les échantillons conservés en CH. Cela pourrait être attribué aux conditions environnementales, car une valeur moyenne d'humidité relative plus élevée a été enregistrée lors du test sur F5 par rapport aux autres bétons.

Ces observations mettent en évidence l'importance des ajouts minéraux et des conditions de conservation sur la perméabilité à l'eau des bétons.

2.6.5. Carbonatation accélérée

Les essais de carbonatation accélérée ont été réalisés selon les recommandations de la norme XP P18-458 (2022) [21]. Cependant, il est important de noter que les échantillons conservés en CS n'ont pas été immergés dans l'eau pendant 48 heures avant d'être placés dans l'enceinte de séchage à 45 °C. Par conséquent, le niveau de saturation initial des bétons différait entre CS et CH. Cet aspect affecte la cinétique de carbonatation et doit être pris en considération.

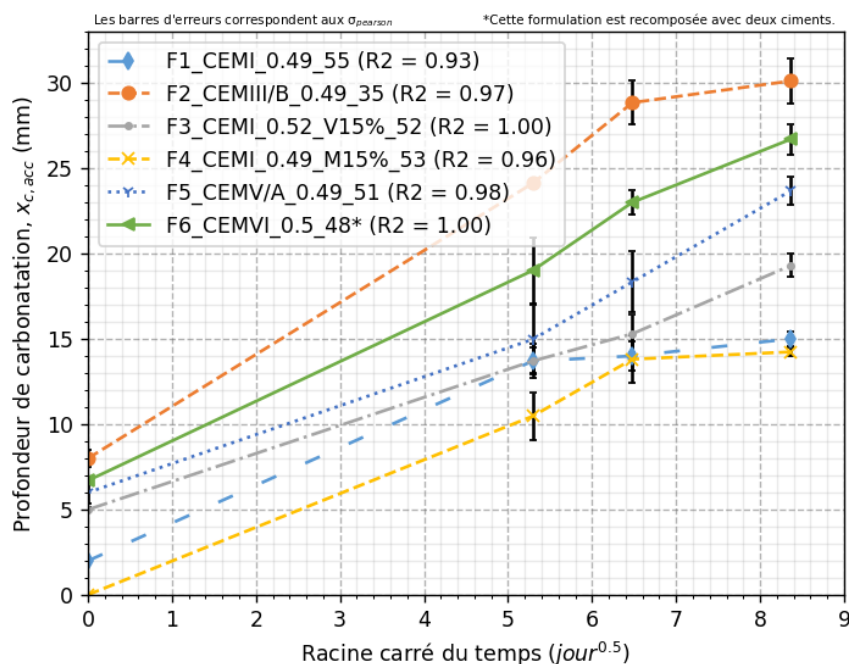


Figure 9 - Profondeur de carbonatation en fonction de la racine carré du temps pour les différents bétons conservés en CS.

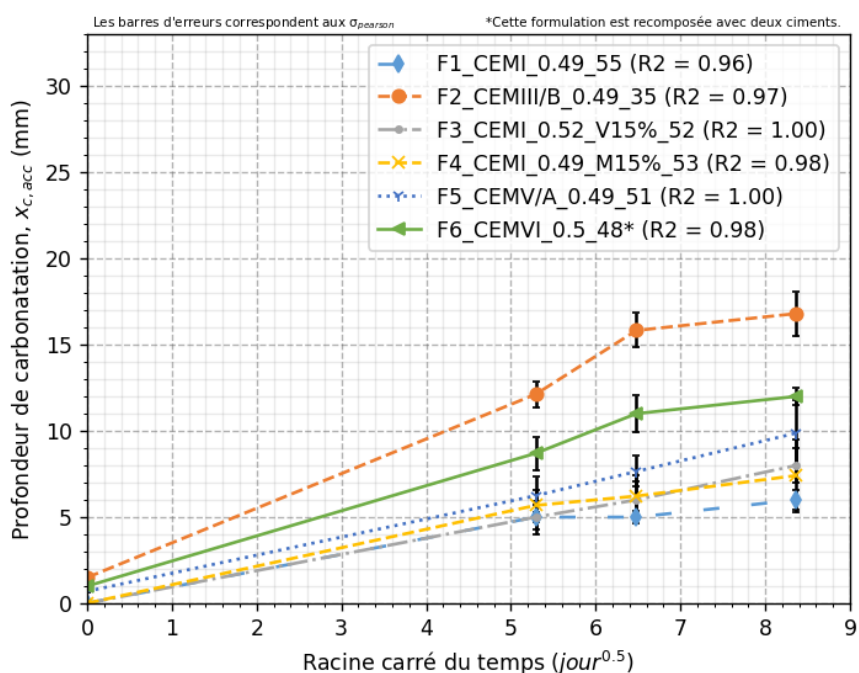


Figure 10 - Profondeur de carbonatation en fonction de la racine carré du temps pour les différents bétons conservés en CH.

La profondeur de carbonatation des différents échantillons est présentée dans la Figure 9 et la Figure 10 pour CS et CH, respectivement. La vitesse de carbonatation est déterminée par régression, en supposant que la cinétique de carbonatation est proportionnelle à la racine carrée du temps. Les résultats de la régression sont donnés dans le Tableau 7. Il est important de noter que tous les coefficients de détermination (R2) dépassent 0,92, confirmant la validité de la méthode d'estimation.

Tableau 7 - Vitesse de carbonatation V_{acc} (mm.jour^{0.5}) obtenues par régression pour CH et CS.

Nom	F1_CEMI _0.49_55	F2_CEMIII/B_ 0.49_35	F3_CEMI _0.52_V15% _52	F4_CEMI _0.49_M15% _53	F5_CEMV/A _0.49_51	F6_CEMVI _0.5_48*
V_{acc} , CH (mm.jour ^{0.5})	0,79	1,93	0,95	0,91	1,09	1,38
R2	0,96	0,97	1,00	0,98	1,00	0,98
V_{acc} , CS (mm.jour ^{0.5})	1,65	2,8	1,68	1,82	2,05	2,42
R2	0,93	0,97	1,00	0,96	0,98	1,00
Différence relative (%) CS -> CH	52	31	43	50	47	43
Différence absolue (mm.jour ^{0.5}) CS - CH	0,86	0,87	0,73	0,91	0,96	1,04

* Cette formulation est recomposée avec deux ciments.

Les résultats présentés dans le Tableau 7 montrent que, indépendamment du traitement de conservation appliqué, les vitesses de carbonatation sont significativement plus faibles pour les bétons à base de CEM I. Cela peut être attribué à la plus grande quantité de clinker et donc de portlandite, qui est l'espèce hydratée principalement responsable de l'amélioration de la résistance à la carbonatation. L'ordre des bétons en termes de vitesses de carbonatation correspond au classement des composants ajoutés. F5, composé de 22 m.% de laitier et de 22 m.% de cendres volantes, présente la quatrième plus haute résistance à la carbonatation. Il est suivi par F6, composé de 11 m.% de cendres volantes et de 46,5 m.% de laitier, et F2 avec 71 m.% de laitier.

La vitesse de carbonatation est une propriété du béton qui est affectée différemment par les conditions de conservation par rapport à d'autres paramètres tels que la perméabilité aux liquides et la résistance à la compression. L'utilisation de la conservation humide (CH) semble avoir un effet similaire sur la carbonatation pour les bétons à base de CEM I (F1, F3, F4) et les bétons avec des quantités plus élevées d'additions pouzzolaniques ou hydrauliques latentes (F2, F5, F6). Les différences de vitesse de carbonatation, comme indiqué dans le Tableau 7, varient de 0,73 à 1,04 mm.jour^{0.5} entre la conservation sèche et la conservation humide. Parmi ces bétons, F6 montre la plus grande amélioration, indiquant qu'il a un potentiel d'hydratation plus élevé par rapport à F2 en raison d'une teneur en clinker plus élevée, permettant une hydratation plus importante du laitier du CEM III/B.

Il convient de noter que la vitesse de carbonatation (V_{acc}) est calculée en excluant la profondeur de carbonatation initiale mesurée après le préconditionnement. Par conséquent, dans le cas de CS, où la carbonatation naturelle se produit à un rythme plus rapide que dans CH, les matériaux en béton sont déjà affectés avant le début du test.

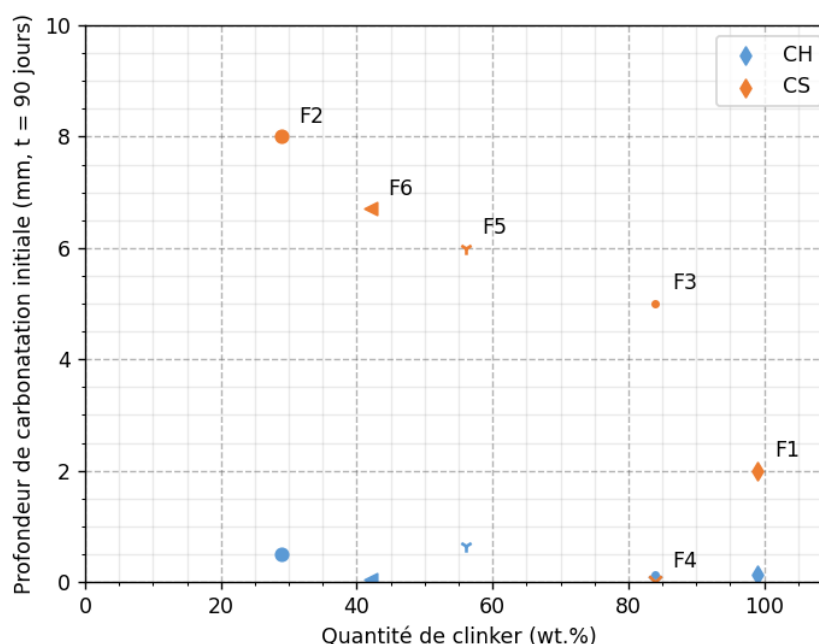


Figure 11 - Profondeur de carbonatation initiale en fonction de la quantité de clinker du liant pour les conservations CH et CS.

Les profondeurs de carbonatation initiales évaluées sont présentées dans la Figure 11 en fonction de la teneur en clinker dans le liant. Il apparaît que, quelle que soit la composition du liant, les échantillons stockés en conservation humide (CH) affichent systématiquement une profondeur de carbonatation initiale proche de 0 mm. En revanche, une tendance claire émerge pour les bétons conservés en CS. La substitution du clinker par des additions minérales entraîne une augmentation des profondeurs de carbonatation mesurées, à l'exception de F4, qui présente une profondeur significativement plus faible. La résistance du matériau en béton à la carbonatation dépend manifestement de la teneur initiale en clinker, une constatation qui est en accord avec les résultats obtenus dans cette étude et ceux rapportés dans la littérature.

Les tendances obtenues avec la conservation sèche (CS) sur la Figure 11 sont corrélées avec celles de la Figure 8 (a) et (b) qui donnent une idée de la perméabilité liquide des bétons et la désaturation des éprouvettes de béton en surface. En effet, il est possible que la formule F2, suivie de F6, F5 et F3, soit plus vite désaturée en surface, permettant une pénétration plus rapide du CO_2 , entraînant une profondeur de carbonatation supérieure. Cette observation pourrait aussi expliquer pourquoi F4, qui semble posséder la plus faible perméabilité liquide selon la Figure 8 (a), présente une carbonatation naturelle en CS à 90 jours inférieure à F1 alors que son taux de clinker est inférieur.

De plus, il est observé que les différents bétons ne sont pas dans le même état initial avant le début du test de carbonatation accélérée. Cette différence d'état initial impacte les valeurs des vitesses de carbonatation accélérée et explique le faible avantage de la conservation en CH par rapport aux autres conservations. Les compositions avec une teneur en clinker plus faible bénéficient davantage des conditions de conservation avec une humidité élevée (CH) que les bétons à teneur en clinker plus élevée. Cela pourrait être vérifié en comparant des corps d'épreuve conservés en CS, qui ne sont pas exposés au CO_2 , avec leurs homologues conservés en CH, où la carbonatation progresse lentement en raison de l'humidité relative élevée, conduisant à la saturation du béton. Cependant, comme la carbonatation naturelle se produit en CS, la surface du béton est déjà carbonatée sur quelques millimètres, et cette profondeur augmente à mesure que la teneur en clinker diminue. Par conséquent, les premiers millimètres du matériau présentent une porosité totale plus faible, possiblement un coefficient de diffusion du CO_2 plus faible, et certainement une distance plus longue à parcourir par l'atmosphère de carbonatation accélérée pour atteindre la zone non carbonatée.

Enfin, il est possible d'en déduire que la profondeur de carbonatation plus faible observée dans F4 peut être attribuée à la compacité plus élevée du matériau en béton résultant de l'inclusion de métakaolin dans le liant. Il est aussi possible de faire le lien avec la Figure 8 qui montre que la formule F4 est celle qui est la moins perméable à l'eau (cinétique de perte de masse plus lente), ce qui pourrait justifier un taux de saturation plus élevée dans les éprouvettes de béton menant à des profondeurs de carbonatation plus faibles.

2.6.6. Carbonatation naturelle

Les profondeurs de carbonatation naturelle sont mesurées après un an d'exposition. Les échantillons ont été placés dans deux environnements différents correspondant à CE et CS, directement après démoulage. Les variations des paramètres environnementaux sont décrites dans le Tableau 3 de la section 2.4. Les conditions de carbonatation dans chaque environnement (CS ou CE) sont supposées similaires pour tous les bétons car le temps de carbonatation couvre une année. Cette hypothèse permet de considérer que les différentes dates de fabrication n'affectent que les conditions de conservation du béton, décrites dans le Tableau A1 de la section 2.4.

Les profondeurs de carbonatation évaluées ($x_{c,nat}$, mm) au temps t (an) pour les différents bétons sont utilisées pour calculer les vitesses de carbonatation naturelle V_{nat} exprimées en $\text{mm.an}^{-0.5}$ avec l'Équation I.3 :

$$V_{nat} = x_{c,nat} / \sqrt{t} \quad \text{Eq (I.3)}$$

Les différentes valeurs obtenues pour les six bétons dans les conditions CE et CS sont exposées dans la Figure 12.

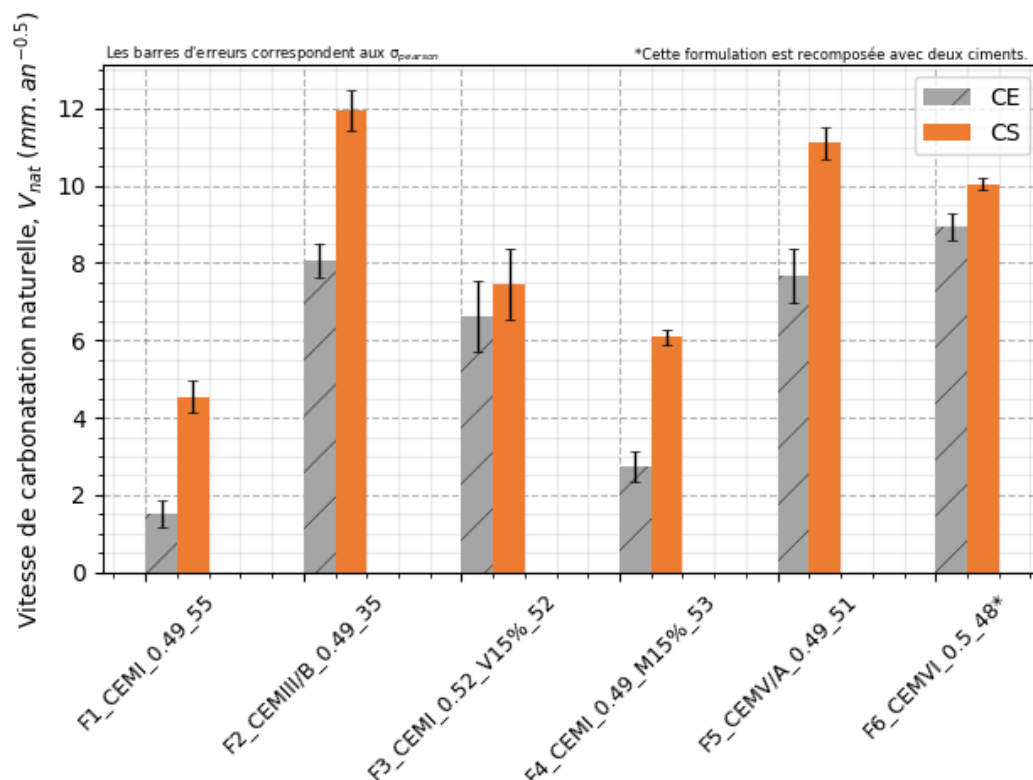


Figure 12 - Vitesses de carbonatation naturelle (V_{nat} , $\text{mm.an}^{-0.5}$) obtenues pour les différentes compositions en CS et CE.

Les conditions CE ont conduit à des vitesses de carbonatation naturelle inférieures par rapport aux conditions CS. Une comparaison des valeurs statistiques présentées dans le Tableau 3 révèle une température moyenne plus basse (10,8 °C pour CE contre 20,3 °C pour CS) et une humidité relative moyenne plus élevée (79,7 % contre 37,2 %).

Ces paramètres environnementaux, ainsi que le développement de l'hydratation de la pâte de ciment, ont le potentiel de réduire la progression de la carbonatation. En général, la carbonatation augmente avec la hausse des températures et est favorisée dans des environnements avec une humidité relative proche de 65 % [22], [23]. Par conséquent, il est surprenant d'observer des niveaux de carbonatation aussi élevés dans les conditions CS. Ce résultat inattendu peut être attribué à la saturation initiale des échantillons de béton, conduisant à une augmentation de la profondeur de carbonatation à mesure que le matériau se désature progressivement. De plus, des variations significatives du contenu en humidité, jusqu'à 60 %, sont observées dans les conditions CS, ce qui explique davantage les profondeurs de carbonatation élevées rencontrées dans ces conditions d'exposition.

En comparaison avec les résultats obtenus sous conditions accélérées, le classement des vitesses de carbonatation présente des variations. Plus précisément, en considérant la carbonatation naturelle en CE, le niveau de carbonatation de F6 dépasse celui de F2, ce qui est contraire aux résultats en conditions accélérées ou à la carbonatation naturelle en conditions CS. En revanche, dans le cas de la carbonatation naturelle en CS, F2 présente une vitesse de carbonatation plus élevée par rapport à F5 et F6. Ces tendances opposées peuvent potentiellement s'expliquer par des mécanismes sous-jacents différents. Il est possible que les conditions spécifiques d'exposition pour les divers échantillons au sein de la même catégorie d'exposition aient légèrement varié, entraînant des écarts dans les conditions de conservation et impactant ainsi la carbonatation. Par exemple, dans le cas de CS, certains échantillons ont été stockés à différentes hauteurs tandis que d'autres ont été stockés au sol, en fonction de l'espace disponible. La même logique s'applique à CE. Ces différences auraient alors entraîné des différences de profils de saturation en surface, et de vitesse de diffusion du CO₂.

Dans le cadre du projet national PerfDuB, l'estimation des vitesses de carbonatation naturelle et accélérée a permis d'établir une corrélation entre ces deux paramètres. Les participants au projet ont défini l'Équation I.4 qui représente cette relation, basée sur l'analyse des 42 bétons de béton impliqués dans le projet.

Il est important de souligner les unités de mesure distinctes utilisées pour les vitesses de carbonatation, où V_{nat} est exprimée en mm.an^{-0.5} et V_{acc} en mm.jour^{-0.5}.

$$V_{nat} = 3.01V_{acc} \quad \text{Eq (I.4)}$$

Tableau 8 - Ratios de la vitesse de carbonatation naturelle en mm.an^{-0.5} (CE et CS) sur la vitesse de carbonatation accélérée en mm.jour^{-0.5} (CS).

Nom	F1_CEMI _0.49_55	F2_CEMIII/B _0.49_35	F3_CEMI _0.52_V15% _52	F4_CEMI _0.49_M15 %_53	F5_CEMV/A _0.49_51	F6_CEMVI_ 0.5_48*	Moyenne
$V_{nat,CE}/V_{acc,CS}$	0.91	2.88	3.95	1.5	3.74	3.69	2.78
$V_{nat,CS}/V_{acc,CS}$	4.99	4.15	1.89	4.05	2.97	2.72	3.46

* Cette formulation est recomposée avec deux ciments.

Les valeurs de ratio obtenues diffèrent de la valeur moyenne de 3,01 du PN PerfDuB. Ces variations de ratio peuvent être attribuées à des différences dans le préconditionnement des échantillons de test.

Dans le PN PerfDuB, pour le test de carbonatation accélérée, les échantillons ont été immergés dans l'eau pendant 48 heures avant d'être séchés à 45 °C, tandis que dans cette étude, les échantillons ont été directement placés dans l'étuve.

Cette différence a probablement entraîné des degrés de saturation variables au début du test de carbonatation accélérée, les échantillons PerfDuB étant plus saturés.

La fluctuation des ratios autour de 3 peut être attribuée à cette différence de préconditionnement des tests, ainsi qu'aux fluctuations annuelles des conditions environnementales dans les environnements CS et CE.

Dans une étude précédente de El Farissi [24], une valeur de 3,66 a été proposée pour des échantillons conservés en CS, ce qui est plus proche des résultats obtenus dans ce travail.

2.6.7. Migration des ions chlorure sous champ électrique

Des essais de migration accélérée des chlorures ont été réalisés en régime non stationnaire selon la norme XP P18-462 (2022) [25]. Les essais sont effectués après des temps de conservation de 28 et 90 jours pour chaque béton et condition de conservation. Les résultats sont présentés dans les Figure 13 et Figure 14.

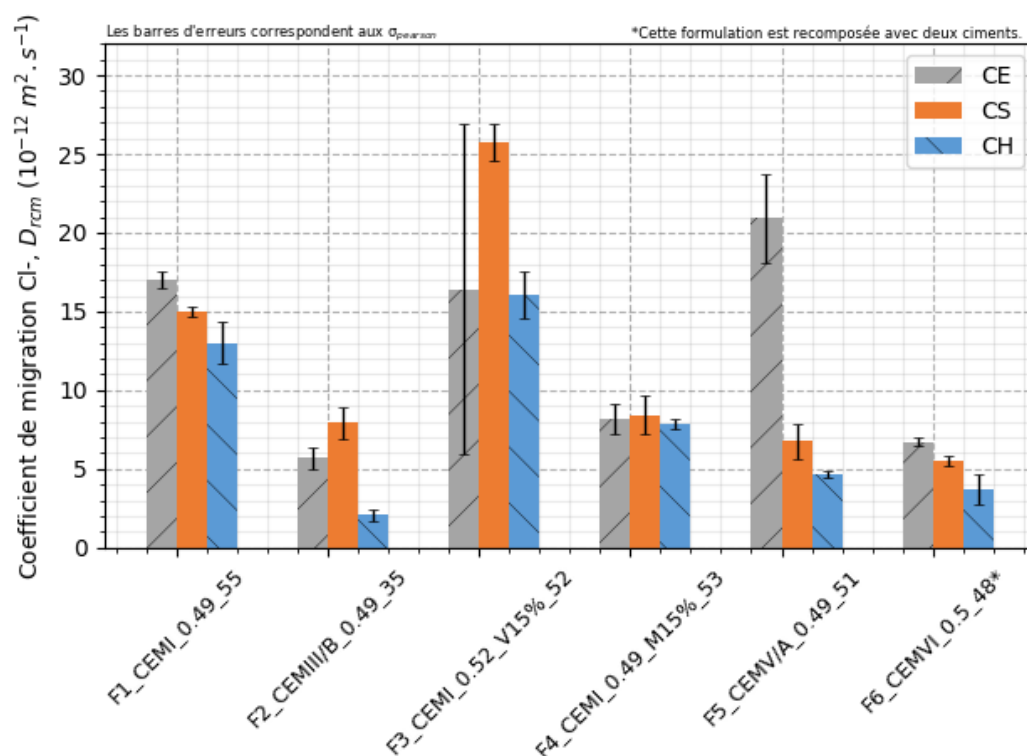


Figure 13 - Coefficients de migration des ions chlorure obtenus après 28 jours de conservation.

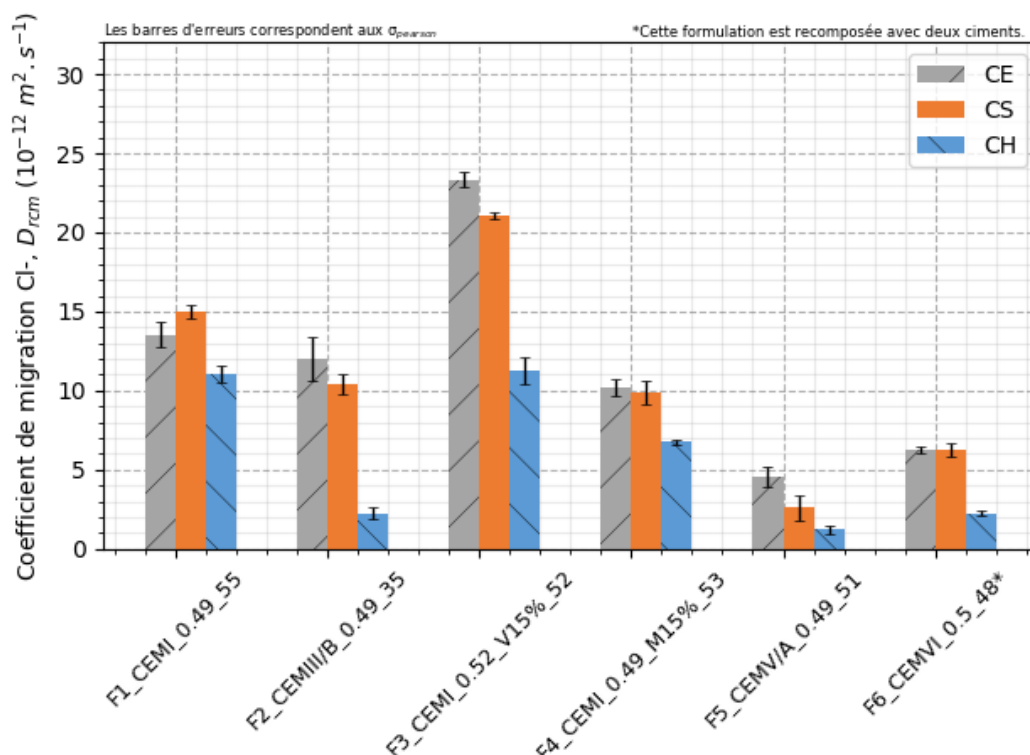


Figure 14 - Coefficients de migration des ions chlorure obtenus après 90 jours de conservation.

Les résultats obtenus sur les six formulations montrent une performance améliorée (coefficients de migration des chlorures plus faibles) lorsque la conservation est effectuée en CH par rapport à CS et CE. En comparant les deux conservations plus stables (CH et CS), il apparaît que CH est plus bénéfique pour les bétons contenant une haute teneur en ajouts minéraux réactifs pour le remplacement du clinker. Le Tableau 9 contient les différences relatives et absolues des valeurs obtenues sous les deux conditions de conservation.

Il est possible de souligner les performances de la formule de béton F2, nettement supérieures à celles de F3, F4 et F1 en CH, malgré une porosité accessible à l'eau plus élevée de 1,5 % minimum (cf. Figure 6). Ces résultats justifient donc l'intérêt du laitier, comme des cendres volantes au regard des résultats obtenus avec F5 et F6, d'un point de vue chimique pour la durabilité des bétons armés dans les environnements contenant des chlorures.

Le Tableau 9 montre que F2, F5 et F6 présentent une réduction relative plus élevée par rapport aux trois autres bétons. F5 affiche le coefficient de diffusion le plus bas, indiquant l'effet positif de l'incorporation de cendres volantes et de laitier dans le béton pour la résistance contre la corrosion induite par les chlorures. Cela soutient l'idée que les conditions de conservation jouent un rôle significatif, particulièrement dans le cas des nouveaux ciments avec un haut taux de remplacement du clinker par des ajouts pouzzolaniques et hydrauliques latents.

En comparant F1, F3 et F4, il est possible d'observer que :

- les cendres volantes seules, utilisées à hauteur de 15 % massique dans le liant, semblent avoir un effet négatif sur la migration des chlorures lorsqu'elles sont stockées en CS ou CE, car F3 présente des propriétés inférieures à celles de la référence F1. Cela est probablement dû à la cinétique d'hydratation et possiblement à la demande en eau plus élevée des cendres volantes. Des valeurs similaires sont observées en CH entre F1 et F3, particulièrement après 90 jours, lorsque l'hydratation plus lente des cendres volantes est complète. Il est cependant important de rappeler que F3 possède un ratio E/L plus élevé de 0,03 point par rapport à F4 et F1, ce qui a pu aussi avoir un impact négatif sur les résultats de F3 ;

- l'inclusion de métakaolin améliore les propriétés du béton concernant le coefficient de migration des chlorures puisque F4 montre une résistance accrue à la pénétration des chlorures comparée à F1 pour toutes les conditions de conservation ;
- le métakaolin semble être moins affecté par les conditions de conservation en comparaison aux cendres volantes dans les conditions de formulation actuelles. Les différences relatives et absolues entre CH et CS (Tableau 9) sont notamment plus prononcées pour F3 que pour F4 ;
- la résistance à la migration des chlorures de F1 profite moins des conditions de conservation idéales que pour les autres bétons.

Ces observations soulignent l'importance des conditions de conservation, en particulier pour les bétons avec des ajouts minéraux importants, et montrent comment différents ajouts peuvent réagir sous diverses conditions de conservation pour affecter la migration des ions chlorure.

Tableau 9 - Comparaisons des coefficients de migration des ions chlorure obtenus après une conservation de 90 jours en CH et CS.

Nom	F1_CEMI _0.49_55	F2_CEMIII/B _0.49_35	F3_CEMI _0.52_V15% _52	F4_CEMI _0.49_M15% _53	F5_CEMV/A _0.49_51	F6_CEMVI _0.5_48*
D_{rcm} , CH ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	11,1	2,3	11,2	6,8	1,2	2,2
D_{rcm} , CS ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	15,0	10,4	21,1	9,9	2,6	6,2
Différence relative (%)	26,2	78,4	46,7	31,3	53,8	64,0
Différence absolue ($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	3,9	8,2	9,8	3,1	1,4	4,0

* Cette formulation est recomposée avec deux ciments.

Une observation générale du Tableau 9 révèle que des performances supérieures sont obtenues dans les bétons contenant des niveaux accrus d'ajouts pouzzolaniques et de laitier par rapport aux bétons à base de CEM I. Ce phénomène est probablement attribué à la nature de la matrice cimentaire, qui comprend davantage d'hydrates capables de fixer les chlorures (tels que C-S-H et C-A-S-H) dans le cas des formulations F2, F5 et F6 [26], [27]. La capacité de fixation accrue de ces hydrates aide à réduire la capacité de diffusion du matériau. Cet effet est particulièrement prononcé dans le béton conservé en CH, car un processus d'hydratation plus complet aboutit à des teneurs plus élevées en hydrates.

La Figure 15 illustre la progression du coefficient de migration des chlorures obtenu pour les 6 différents bétons.

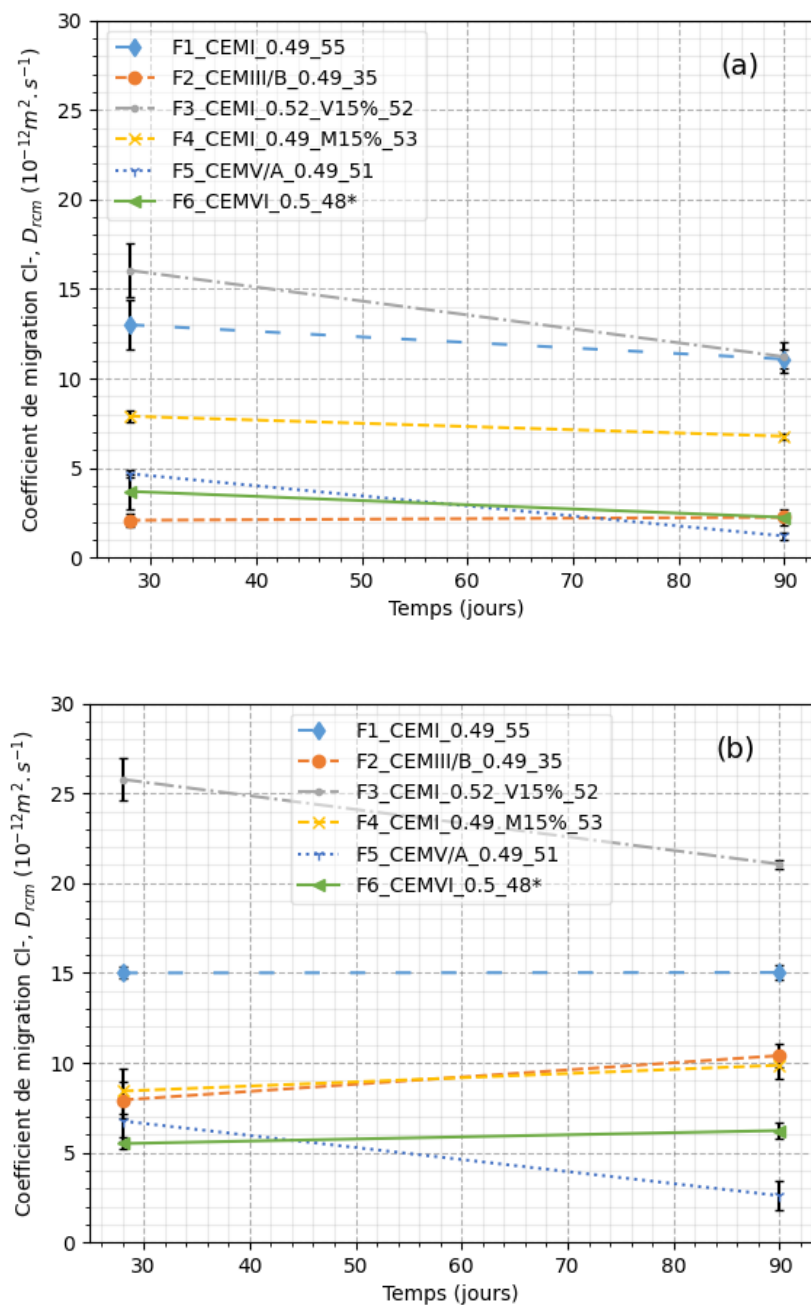


Figure 15 - Évolution du coefficient de migration des ions chlorure (D_{rcm}) pour chaque formulation conservée en CH (a) et en CS (b).

Une réduction du coefficient de diffusion apparent du béton au fil du temps est couramment observée dans la littérature scientifique [28], [29]. Cette amélioration des propriétés du béton est influencée par divers facteurs, dont sa composition au premier plan. Dans ce contexte, un facteur de vieillissement (ae , -) est fréquemment défini, représentant un coefficient sans dimension allant de 0 à 1. Le facteur de vieillissement peut être déterminé en mesurant le coefficient D_{rcm} à différents intervalles de temps.

L'Équation I.5, présentée dans [30], décrit l'évolution du coefficient de diffusion en fonction du temps et peut être utilisée pour dériver l'Équation I.6 :

$$D(t) = D(t_0) \left(\frac{t_0}{t} \right)^{ae} \quad \text{Eq (I.5)}$$

où D est le coefficient de diffusion (m^2/s) mesuré à un moment donné, t ou t_0 (jours).

$$ae = \frac{\ln(D(t)) - \ln(D(t_0))}{\ln(t_0) - \ln(t)} \quad \text{Eq (I.6)}$$

Dans le fascicule de documentation FD P 18-480 (2025), une formule a été proposée pour estimer le facteur de vieillissement en fonction des additions présentes dans le liant :

$$ae_{480} = 0.3 + \min(0.2S; 0.15) + \min(1.1V; 0.3) + \min(1.1D; 0.1) + \min(1.1MK; 0.1) \quad \text{Eq (I.7)}$$

où S est la fraction massique de laitier de haut fourneau (-), V est la fraction massique de cendres volantes (-), D est la fraction massique de fumée de silice (-) et MK la fraction massique de métakaolin (type A) (-).

Les valeurs obtenues à 28 et 90 jours peuvent être utilisées pour calculer le facteur de vieillissement pour différentes conditions de conservation en utilisant l'Équation I.6. Il est important de noter qu'il convient de faire preuve de prudence lors de l'utilisation d'une faible différence de temps de 62 jours dans le cas présent, car cela peut entraîner des inexactitudes dans l'estimation de la valeur du facteur de vieillissement. De plus, le facteur de vieillissement tel que défini dans le bulletin fib 76 [31] prend en compte l'impact de l'environnement sur le béton. En général, les coefficients de diffusion des chlorures mesurés après des périodes d'exposition prolongées (plus d'un an) sont utilisés pour estimer ce paramètre.

La méthode du FD P18-480 (2025) est utilisée comme base de comparaison.

Tableau 10 - Valeurs de facteur de vieillissement ou « ageing factor » (ae) calculées à partir des valeurs expérimentales et en utilisant la méthode du FD P18-480 (2025).

Nom	F1_CEMI_0.49_55	F2_CEMIII/B_0.49_35	F3_CEMI_0.52_V15%_52	F4_CEMI_0.49_M15%_53	F5_CEMV/A_0.49_51	F6_CEMVI_0.5_48*
ae_{CE}	0,20	-0,64	-0,30	-0,18	1,30	0,06
ae_{CS}	0,00	-0,23	0,17	-0,14	0,82	-0,11
ae_{CH}	0,14	-0,07	0,31	0,13	1,17	0,43
ae_{480}	0,30	0,44	0,47	0,40	0,59	0,59

* Cette formulation a été recomposée à partir de deux ciments

Les facteurs de vieillissement affichés dans le Tableau 10 présentent des variations significatives. Il peut être observé que :

- les facteurs de vieillissement obtenus dans la condition CH sont généralement plus élevés que ceux dans les conditions CS et CE, à l'exception de F1 et F5. Cela confirme la plus grande efficacité du traitement de conservation en CH pour améliorer la microstructure des bétons et consécutivement les propriétés de migration des chlorures, même après 28 jours ;

- des valeurs négatives des facteurs de vieillissement peuvent être obtenues en utilisant la méthode expérimentale, en particulier dans les conditions CS et CE. Cela peut être attribué à divers facteurs qui peuvent influencer la capacité de diffusion des chlorures, tels que les altérations du réseau poreux dues à la carbonatation. Il est également possible que ce paramètre soit plus sensible aux hétérogénéités entre les échantillons résultant du processus de fabrication, conduisant à des variations de valeurs. Les incertitudes de l'essai peuvent également contribuer à la diminution apparente de la résistance à la corrosion induite par les chlorures au fil du temps. Dans le cas de F2, les faibles résistances mécaniques observées dans les conditions CS et CE à 28 jours (comme montré dans la Figure 3) et présumées similaires après un temps de conservation de 90 jours (basé sur l'évolution minimale de F2 en CH comme montré dans la Figure 4), pourraient expliquer les valeurs négatives élevées de ae_{CS} et ae_{CE} obtenues. Il est possible que le processus de découpe affecte l'intégrité du matériau, ce qui entraînerait l'apparition de microfissures aléatoires qui affecteraient négativement ses propriétés ;
- les facteurs de vieillissement calculés en utilisant l'Équation I.7 de la norme FD P18-480 (2025) sont plus élevés que ceux obtenus expérimentalement, à l'exception de F5. Des différences substantielles peuvent être observées, et il est difficile de tirer des conclusions sur l'exactitude de cette équation pour estimer les valeurs obtenues dans cette campagne expérimentale. Les résultats indiquent clairement que la proximité des mesures des deux résultats de diffusion des chlorures conduit rapidement à des erreurs dans l'estimation du facteur de vieillissement.

Dans le projet national PerfDuB, des conclusions similaires ont été tirées, indiquant que le calcul du facteur de vieillissement à partir des valeurs de D_{rcm} était complexe. Cette complexité découle probablement de la méthode d'acquisition employée. Par conséquent, il est plus conseillé d'utiliser les valeurs de D_{app} mesurées sur des structures ou des échantillons de béton qui ont été exposés aux chlorures pendant une durée prolongée pour appliquer la méthode de calcul du facteur de vieillissement (l'Équation I.6).

2.6.8. Résistivité électrique

La résistivité électrique est mesurée conformément aux recommandations de la norme XP P18-481 (2022) [32].

Le préconditionnement est identique à celui décrit dans la section 2.6.7 précédente.

Les résultats obtenus sur les différents bétons et conditions de conservation sont présentés dans la Figure 16 pour des durées de 7, 28 et 90 jours.

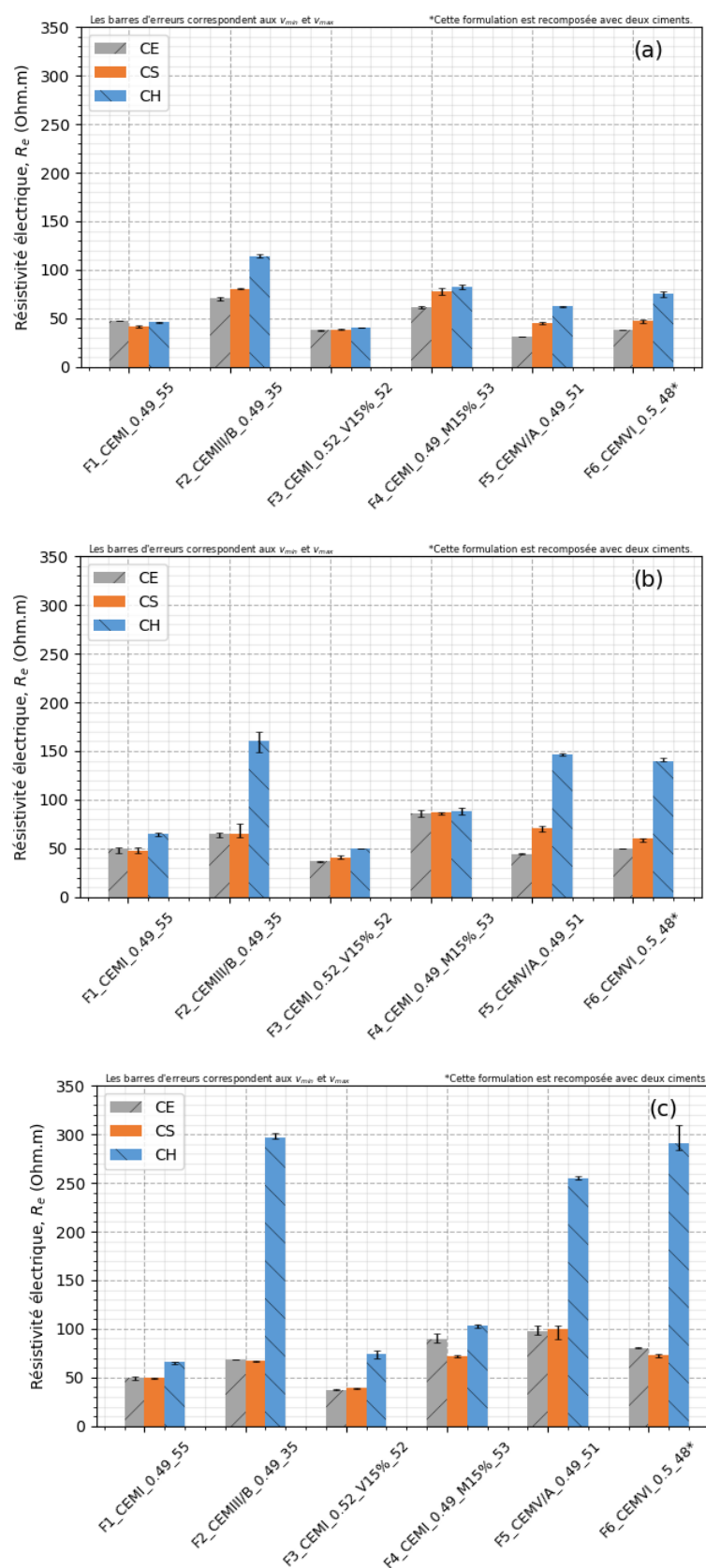


Figure 16 - Résistivité électrique mesurées après des conservations de 7 (a), 28 (b) et 90 jours (c).

L'évolution de la résistivité électrique des 6 formulations est également représentée sur la Figure 17 pour les conditions de conservations sèche et humide.

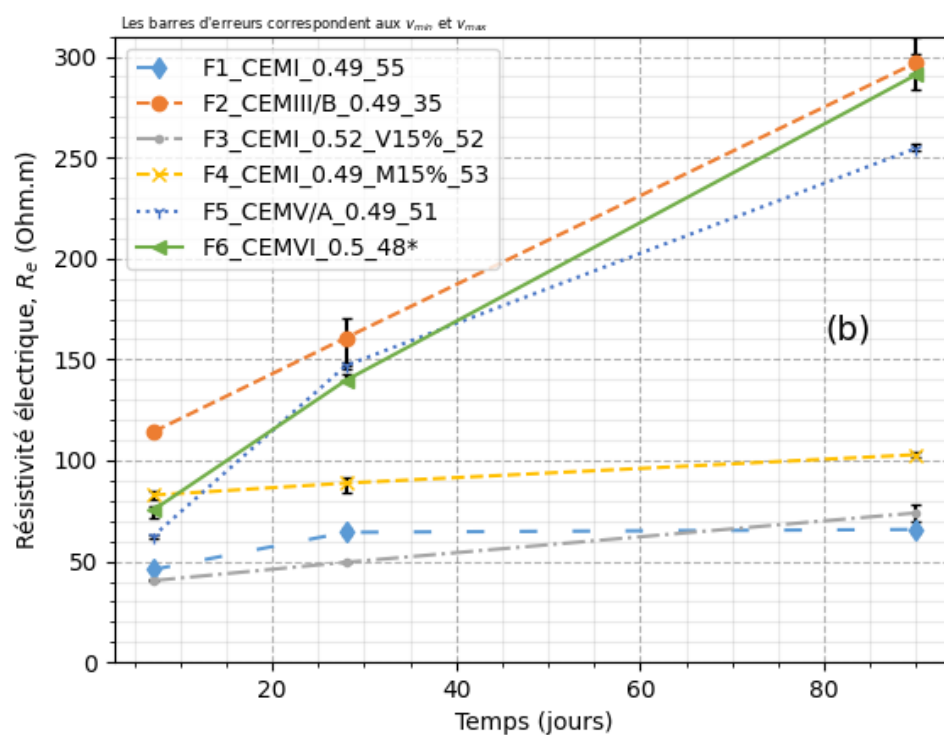
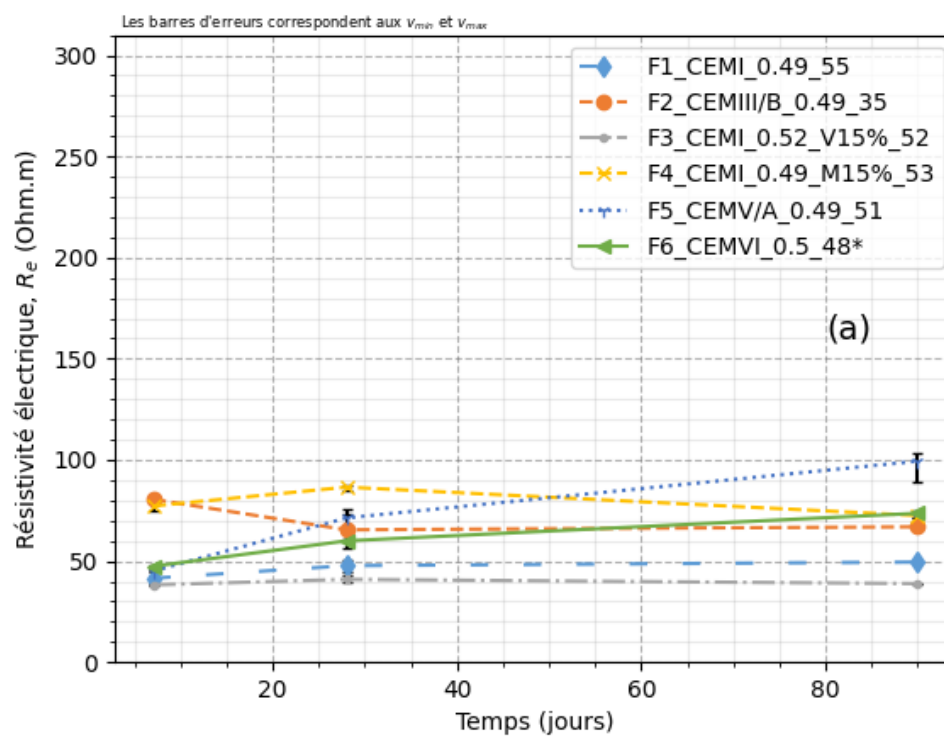


Figure 17 - Évolution de la résistivité électrique en conservation CS (a) et CH (b).

De claires différences entre CH et CS sont observables :

- une augmentation significative de la résistivité électrique est mesurée dans les bétons contenant des niveaux élevés de cendres volantes et/ou de laitier exposés aux conditions CH. Les liants à fortes teneurs en laitier et en calcaire ont un potentiel supérieur en termes de paramètres électriques lorsque l'hydratation est optimale. Il convient de noter que l'augmentation de la résistivité semble être linéaire au fil du temps pour F2 et F6, comme observé dans la Figure 17. Cela suggère qu'une augmentation supplémentaire de la résistivité électrique pourrait être possible avec des périodes de conservation plus longues ;
- l'augmentation de la valeur de la résistivité électrique de F1 n'est observée que jusqu'à 28 jours. Cela peut être attribué au mécanisme d'hydratation plus rapide du clinker par rapport aux autres additions minérales. Par conséquent, les valeurs finales de résistivité à 90 jours de F3 et F4 sont presque atteintes après 28 jours. Il est intéressant de noter que la pente de l'évolution de la résistivité est plus élevée pour F3 que pour F4. Cela suggère que les cendres volantes nécessitent une durée d'exposition à l'eau plus longue pour leur hydratation par rapport au métakaolin ;

Le Tableau 11 résume les différences relatives et absolues entre les valeurs de R_e obtenues en CH et CS après une période de conservation de 90 jours. Il montre que :

- les bétons à base de CEM I (F1, F3 et F4) présentent les valeurs les plus faibles. Les cendres volantes, malgré des valeurs de résistivité électrique plus faibles que le métakaolin, affichent une augmentation relative plus importante entre CS et CH. Il est intéressant de noter qu'en CS, F1 présente une résistivité électrique plus élevée que F3, malgré l'absence d'autres constituants minéraux en dehors du clinker. Ces deux observations prouvent que les cendres volantes nécessitent des conditions plus favorables pour compléter leur hydratation que le métakaolin (contenu dans F4) ;
- les bétons à base de CEM V/A et CEM III/B montrent les valeurs de résistivité électrique les plus élevées. La différence entre les valeurs en CS et CH augmente avec le contenu en ajouts. En commençant par F2 (71 m.% de laitier), dont la valeur augmente de 230 Ohm.m (344 %), suivi par F6 (46,5 m.% de laitier, 11 m.% de cendres volantes) avec une augmentation de 217 Ohm.m (295 %). Enfin, la valeur de F5 (22 m.% de laitier, 22 m.% de cendres volantes) augmente de 155 Ohm.m (156 %). Par conséquent, des contenus plus élevés en additions minérales réactives entraînent une résistivité électrique plus élevée en CH, tandis que la tendance est différente en CS, avec F5 présentant la valeur de résistivité électrique la plus élevée.

Tableau 11 - Comparaisons des résistivités électriques obtenues en CH et CS après 90 jours de conservation.

Nom	F1_CEMI _0.49_55	F2_CEMIII/B_ 0.49_35	F3_CEMI _0.52_V15% _52	F4_CEMI _0.49_M15% _53	F5_CEMV/A _0.49_51	F6_CEMVI _0.5_48*
R_e , CH (Ohm.m)	66	297	74	103	255	291
R_e , CS (Ohm.m)	50	67	39	73	99	74
Différence relative (%) CS -> CH	33	344	91	42	156	295
Différence absolue (Ohm.m) CS - CH	16	230	35	30	155	217

* Cette formulation est recomposée avec deux ciments.

2.7. Discussions et analyses des résultats – additions pouzzolaniques et conditions de conservation

Les résultats de la campagne expérimentale menée sur les six compositions de béton ont généré une quantité significative de données, englobant diverses conditions de conservation. Cette section présente un résumé des conclusions tirées de cette étude.

Les résultats obtenus permettent les observations suivantes :

- les bétons à base de CEM I 52,5 N permettent l'obtention d'une résistance mécanique plus élevée après 28 jours. Cela peut être attribué à l'utilisation d'un ciment avec une résistance caractéristique de 52,5 N, par rapport au CEM III/B 32,5 N utilisé pour F2_CEMIII/B_0.49_35 et F6_CEMVI_0.5_48, et au CEM V/A 42,5 N utilisé pour F5_CEMV/A_0.49_51 et F6_CEMVI_0.5_48.
Il faut noter que les trois conditions de conservation mènent au même ordre de classification pour l'ensemble des bétons. Un classement différent est observé pour la résistance à la compression après 90 jours de conservation en CH concernant la formule F4_CEMI_0.49_M15%_53. La résistance en compression obtenue pour cette formule est surpassée par celles de F3_CEMI_0.52_V15%_52, F5_CEMV/A_0.49_51 et F6_CEMVI_0.5_48, indiquant la limite d'hydratation du métakaolin dans ces conditions de formulation ;
- un examen global de la microstructure des bétons, avec l'évaluation de la porosité accessible à l'eau (ϕ , 90 jours), la perméabilité aux gaz (K_{sec}) et la perméabilité aux liquides (K_{liq}), révèle que les bétons F1_CEMI_0.49_55, F5_CEMV/A_0.49_51 et F4_CEMI_0.49_M15%_53 présentent les microstructures les moins perméables, suivis de F3_CEMI_0.52_V15%_52 ;
- comme prévu, l'utilisation de bétons avec une teneur élevée en clinker montre de meilleures performances tant en carbonatation naturelle qu'accélérée. F1_CEMI_0.49_55 et F4_CEMI_0.49_M15%_53 présentent les vitesses de carbonatation les plus faibles, suivis de F3_CEMI_0.52_V15%_52. À l'inverse, F5_CEMV/A_0.49_51 et F6_CEMVI_0.5_48 présentent de meilleures propriétés que F2_CEMIII/B_0.49_35. Comme décrit dans la section 2.6.5, pour des propriétés de transfert similaires, il existe une corrélation entre la cinétique de carbonatation et la quantité de portlandite. Cette corrélation explique les performances inférieures des bétons avec des teneurs plus élevées en laitier et en cendres volantes. La résistance plus élevée à la carbonatation dans F5_CEMV/A_0.49_51, par rapport à F2_CEMIII/B_0.49_35 et F6_CEMVI_0.5_48, peut être attribuée à la microstructure plus dense et moins perméable du béton en plus d'une quantité en clinker supérieure. La comparaison entre les résultats obtenus pour F3_CEMI_0.52_V15%_52 et F4_CEMI_0.49_M15%_53 révèle que le métakaolin se comporte mieux que les cendres volantes en termes de résistance à la carbonatation, quelles que soient les conditions de conservation et d'exposition à la carbonatation. Le rapport E_{eff}/L_{tot} plus élevé de F3_CEMI_0.52_V15%_52 (0,52), par rapport à F4_CEMI_0.49_M15%_53 (0,49), pourrait également justifier en partie ces résultats. Les bétons incorporant des additions minérales peuvent présenter de bonnes performances dans des environnements carbonatés dans des conditions spécifiques. Par exemple, réduire le rapport E_{eff}/L_{tot} améliore la résistance à la carbonatation de ces bétons, ce qui donne une résistance à la carbonatation acceptable [33], [34], [35]. Par conséquent, l'incorporation de niveaux élevés d'additions minérales dans la formulation peut être justifiée en utilisant la méthodologie FD P18-480 (2025) ;
- les résultats des coefficients de migration des chlorures présentent une tendance distincte. Tout d'abord, les bétons avec les plus hautes teneurs en additions pouzzolaniques et hydrauliques latentes présentent les meilleures performances, malgré une matrice plus perméable dans le cas de F6_CEMVI_0.5_48 et F2_CEMIII/B_0.49_35. Ce phénomène peut être attribué à la capacité de certains hydrates présents en plus grandes quantités dans ces bétons, à savoir les C-(A)-S-H et les Afm, de fixer les ions chlorure. Ces résultats

sont cohérents avec de précédentes recherches sur le sujet [36], [37], [38]. Cette observation explique en partie la résistance supérieure des bétons à base de laitier et d'additions pouzzolaniques à la pénétration des chlorures, en grande partie en raison des propriétés chimiques de ces matrices cimentaires [20], [39] ;

- les résultats obtenus sur la résistivité électrique révèlent des observations similaires à celles obtenues pour les coefficients de migration des ions chlorure. F2_CEMIII/B_0.49_35, F5_CEMV/A_0.49_51 et F6_CEMVI_0.5_48 présentent les valeurs de R_e les plus élevées, en particulier lorsqu'ils sont conservés en CH. De plus, F4_CEMI_0.49_M15%_53 présente une résistivité électrique relativement élevée à jeune âge, même dans des conditions de conservation défavorables. Ces valeurs de résistivité électrique plus élevées sont donc certainement associées à la composition des solutions interstitielles des bétons avec laitiers, cendres volantes ou métakaolin. Les résultats de la perméabilité aux liquides et de la porosité accessible à l'eau indiquent que F1_CEMI_0.49_55 présente une matrice plus dense. Cependant, la compacité de sa matrice cimentaire semble être un critère insuffisant pour obtenir des valeurs de résistivité électrique élevées. Par conséquent, les valeurs de résistivité électrique obtenues pour F2_CEMIII/B_0.49_35, F5_CEMV/A_0.49_51 et F6_CEMVI_0.5_48 sont le résultat de réactions pouzzolaniques et hydrauliques latentes, conduisant à la formation d'espèces différentes de celle résultant de l'hydratation du clinker seul et donc à des solutions interstitielles de natures différentes.

Pour presque tous les paramètres, l'environnement de conservation humide (CH) conduit à des valeurs optimisées pour toutes les propriétés, bien qu'il les impacte différemment.

Le Tableau 12 résume les différences relatives observées entre les paramètres des bétons conservés en CH et des bétons conservés dans des conditions sèches (CS) pour chaque paramètre mesuré dans cette étude.

Tableau 12 - Différence relative absolue (%), $(|V_{CH} - V_{CS}|)/V_{CS}$ entre les résultats obtenus en CH et CS pour les six formulations de béton et chaque paramètre.

	F1_CEMI_0.49_55	F2_CEMIII/B_0.49_35	F3_CEMI_0.52_V15%_52	F4_CEMI_0.49_M15%_53	F5_CEMV/A_0.49_51	F6_CEMVI_0.5_48*
f_c (28j)	15	21	22	16	29	32
ϕ_{eau} (90j)	2	5	0	1	3	3
K_{sec} (90j)	80	80	79	60	64	47
K_{liq} (90j)	45	53	33	47	57	51
V_{acc} (90j)	52	31	43	50	47	43
D_{rcm} (28j)	13	74	38	6	31	33
D_{rcm} (90j)	26	78	47	31	54	64
R_e (7j)	11	41	6	7	38	59
R_e (28j)	35	147	21	3	106	133
R_e (90j)	33	344	91	42	156	295

*Cette formulation a été recomposée à l'aide de deux ciments.

Pour analyser les tendances associées aux différentes propriétés et bétons, une représentation des impacts de la conservation est proposée dans la Figure 18.

Cette figure montre le ratio des différences relatives (entre CH et CS) par rapport à la différence relative (entre CH et CS) maximale obtenue sur l'ensemble des six bétons. Tous les paramètres évalués dans les deux conditions de conservations (CH et CS) pour chacun des six bétons sont présentés selon ce ratio.

Plus la valeur obtenue pour ce ratio est élevée et plus l'impact de la conservation est important.

Les graphiques de la Figure 18 permettent de comparer les différentes compositions quant à l'impact de la conservation sur chaque paramètre. Il est évident que F2_CEMIII/B_0.49_35, F5_CEMV/A_0.49_51 et F6_CEMVI_0.5_48 couvrent une surface significativement plus

grande par rapport aux bétons à base de CEM I (F1_CEMI_0.49_55, F3_CEMI_0.52_V15%_52 et F4_CEMI_0.49_M15%_53).

Cela indique que la conservation a une plus grande influence sur les bétons avec une teneur élevée en ajouts minéraux réactifs que sur les bétons avec une teneur élevée en clinker.

Afin d'atteindre la durabilité souhaitée des bétons à base d'additions pouzzolaniques et de laitiers, il est impératif de réaliser un processus de conservation dans des conditions appropriées et pour une durée prolongée en comparaison avec des bétons à forte teneur en clinker (pour des conditions de formulation similaire).

Il est possible d'anticiper que la quantité de clinker aura un impact moindre sur les bétons avec une teneur en eau plus faible. La densité plus élevée de la matrice dans ces bétons devrait finalement améliorer leurs performances, contrebalançant l'effet chimique lié à la nature du liant dans le cas de la carbonatation notamment, et réduire l'impact de la conservation sur les grandeurs mesurées.

Concernant F1_CEMI_0.49_55, F3_CEMI_0.52_V15%_52 et F4_CEMI_0.49_M15%_53, la Figure 18 révèle que, bien que le bénéfice global de la conservation humide soit plus faible par rapport aux bétons avec une teneur en ajouts plus élevée, certaines propriétés restent dépendantes du type de conservation. Plus précisément, les perméabilités aux gaz (K_{sec}) et aux liquides (K_{liq}), ainsi que les vitesses de carbonatation accélérée (V_{acc}), présentent un ratio de 60% ou plus pour l'ensemble des bétons. Cela implique que le type de conservation a un impact équivalent sur ces trois paramètres pour tous les types de béton dans cette étude. De plus, ce graphique confirme que les différences d'impact sur la porosité accessible à l'eau et la résistance à la compression (après 28 jours) sont minimales par rapport à d'autres paramètres.

F3_CEMI_0.52_V15%_52 semble être plus affecté par les conditions de conservation que F1_CEMI_0.49_55 et F4_CEMI_0.49_M15%_53, malgré une teneur en clinker proche. Les valeurs obtenues pour le coefficient de migration des ions chlorure (D_{rcm}) et la résistance à la compression (f_c) dans la Figure 18 sont égales ou supérieures à 50 %, ce qui indique une plus grande augmentation des valeurs des paramètres en passant de CS à CH.

Cette observation suggère que les matrices avec cendres volantes sont plus dépendantes des conditions de conservation que des matrices avec d'autres ajouts comme le métakaolin, au minimum dans le cas de cette composition spécifique (E_{eff}/L_{tot} proche de 0,5). Ce point est également confirmé par la valeur "moyenne" des paramètres affichée dans la Figure 18, qui est inférieure pour F1_CEMI_0.49_55 et F4_CEMI_0.49_M15%_53 par rapport à F3_CEMI_0.52_V15%_52.

Les surfaces obtenues dans la Figure 18 pour les formulations F2_CEMIII/B_0.49_35, F5_CEMV/A_0.49_51 et F6_CEMVI_0.5_48 indiquent que l'augmentation globale de l'impact de la conservation est étroitement associée à la teneur en ajouts. Notamment, la plus petite surface parmi les trois est observée pour F5_CEMV/A_0.49_51 (22 m.% de laitier et 22 m.% de cendres volantes), suivie de F6_CEMVI_0.5_48 (11m.% de cendres volantes et 46,5 m.% de laitier), et enfin F2_CEMIII/B_0.49_35 (71 m.% de laitier).

Cette constatation reflète la demande croissante d'une exposition prolongée à l'humidité à mesure que la teneur en ajouts pouzzolaniques et hydrauliques latents augmente, en raison de leur temps de prise plus long par rapport au clinker.

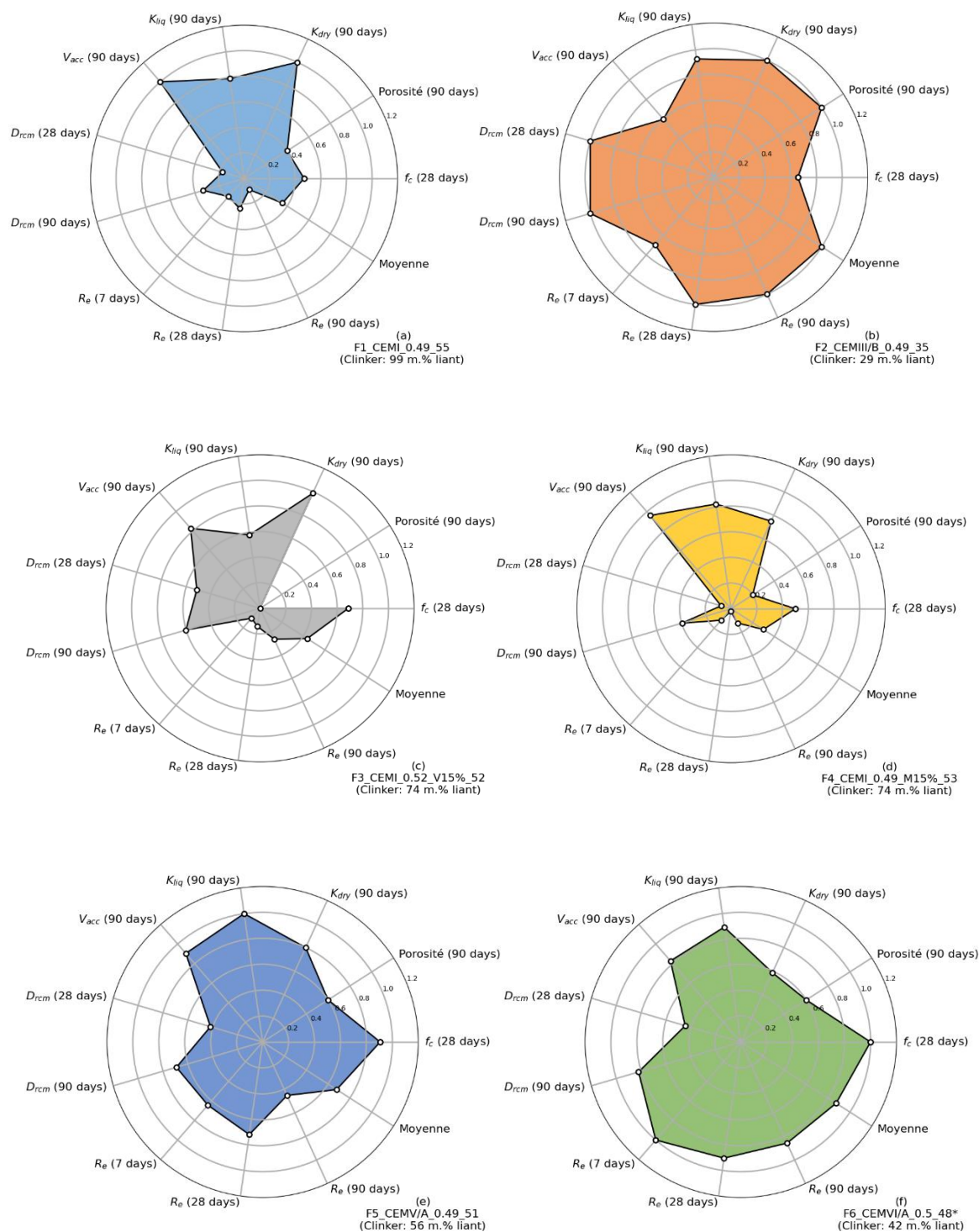


Figure 18 - Ratio des différences relatives entre CH et CS sur les valeurs maximales obtenues sur les six formules de béton pour F1 (a), F2 (b), F3 (c), F4 (d), F5 (e) et F6 (f) (la « Moyenne » correspond à la moyenne de l'ensemble des valeurs de ratio).

Les différences observées entre les traitements de conservation défavorables (CS et CE) et le traitement de conservation favorable (CH) peuvent avoir des implications significatives, surtout dans le cas des bétons à faible empreinte carbone contenant des niveaux élevés d'ajouts pouzzolaniques et hydrauliques latents. Lors de la classification des bétons, particulièrement dans une approche basée sur la performance, il est essentiel de prendre en compte l'impact des conditions de conservation appliquées.

Dans la section suivante, les résultats de l'approche prescriptive sont comparés à ceux de l'approche performantielle en utilisant les résultats obtenus sur les bétons conservés dans des conditions favorables (CH) et des conditions défavorables (CS et CE). Cette comparaison examine spécifiquement la performance par rapport aux classes d'exposition à la carbonatation et aux chlorures (XC, XS et XD).

Cette analyse vise à mettre en évidence comment différentes stratégies de conservation influencent la durabilité et les caractéristiques de performance des bétons, notamment sous des conditions d'exposition variables à la carbonatation et à la pénétration de chlorures.

Les chapitres 2.8 et 2.9 complètent l'analyse des travaux de thèse de Paulo Claude [1] (chapitres 2.1 à 2.7 extraits et traduits du chapitre 2 « Travaux expérimentaux ») et traitent du positionnement des bétons vis-à-vis du contexte normatif, ainsi que du volet environnemental.

2.8. Approche prescriptive et approche performantielle décrite dans le fascicule FD P18-480 (2025)

Les résultats obtenus dans cette étude sont utilisés pour positionner les bétons par rapport aux critères performantiels du FD P 18-480 et aux valeurs seuils des tableaux NA.F de la norme NF EN 206+A2/CN. Tout d'abord, l'approche basée sur la performance telle que décrite dans le FD P18-480 (2025) est mise en œuvre en utilisant les résultats suivants :

- la vitesse de carbonatation accélérée (V_{acc} , mm.jour^{-0.5}) mesurée selon les recommandations de la norme XP P18-458 (2022) ;
- le coefficient de migration des ions chlorure (D_{rcm} , m².s⁻¹) mesuré selon la norme XP P18-462 (2022) ;
- la résistivité électrique (R_e Ohm.m) mesurée selon la norme XP P18-481 (2022) ;
- les valeurs du facteur de vieillissement calculées avec l'Équation I.7 provenant du FD P18-480 (2025) sont utilisées (voir section 2.6.7).

Ce positionnement a été réalisé pour chaque formulation de béton, en fonction des types de conservation.

Plusieurs hypothèses ont été prises pour réaliser cette approche :

- les calculs ont été réalisés en considérant une seule gâchée nominale, contrairement aux trois gâchées recommandées dans le cadre des épreuves d'étude pour la validation des classes XC et XS. Chaque donnée individuelle a été intégrée comme représentative d'une gâchée nominale ;
- un DUP de 100 ans est considéré ;
- la validation des classes XC a été effectuée sur la base du critère de carbonatation accélérée (XP P18-458 (2022)) ;
- la comparaison des valeurs moyennes obtenues avec les valeurs seuils caractéristiques du FD P18-480 (2025) a été réalisée en considérant l'écart-type minimal requis par le fascicule (tableau 13 du FD P18-480 (2025)) ;
- les critères de résistance mécanique des différentes classes d'exposition ne sont pas considérés. Cette hypothèse entraîne des variations de résultats importantes, notamment pour les formulations à fort taux d'ajouts d'additions minérales conservées dans les environnements CS et CE ;
- selon le fascicule FD P18-480 (2025), les indicateurs de durabilité et grandeurs associées à la durabilité sont mesurés sur des éprouvettes conservées dans un environnement humide selon la norme NF EN 12390-2 (dans l'eau ou dans des conditions d'humidité relatives supérieures ou égales à 95 %). Cette conservation correspond à CH. Les classements des bétons conservés en CS et en CE sont donc réalisés à titre indicatif mais ne respectent pas les prescriptions du FD P18-480 (2025).

Il est également important de noter que les seuils du FD P18-480 (2025) sont alignés avec les valeurs minimales d'enrobage recommandées pour la durabilité ($C_{min,dur}$) dans la norme NF EN 1992-1-1 (2005). Cela s'applique aux ouvrages avec une durée de vie projetée de 50 ans (classe structurale S4) et de 100 ans (classe structurale S6).

Les règles de modulation d'enrobage basées sur des critères de résistance du béton ou de nature du liant, mentionnées dans le tableau 4.3NF (clause 4.4.1.2 (5) de l'annexe nationale à la norme NF EN 1992-1-1 (2005)), ne s'appliquent pas dans le cadre d'une approche performantielle. Les modulations d'enrobage autorisées, en complément de l'enrobage compact, sont associées à des exigences de performance plus sévères. En fonction de chaque classe d'exposition, du type d'essai réalisé et de la durée de vie du projet, une réduction d'une ou deux classes structurales est possible (correspondant respectivement à une réduction de 5 ou 10 mm d'enrobage).

Ces minorations sont détaillées dans le Tableau 13, avec les significations suivantes :

- **N** : classe d'exposition non validée selon FD P18-480 (2025) ;
- **O** : classe d'exposition validée selon FD P18-480 (2025) sans diminution de classe structurale ;
- **O⁺** : classe d'exposition validée selon FD P18-480 (2025) avec diminution d'une classe structurale ;
- **O⁺⁺** : classe d'exposition validée selon FD P18-480 (2025) avec diminution de deux classes structurales.

Tableau 13 - Positionnement des différents bétons selon les seuils de l'approche performantielle du fascicule FD P18-480 (2025).

Indicateur		V _{acc} (mm/jours ^{0.5})				D _{rem} (m ² /s)				D _{rem} (m ² /s)			
Classe d'exposition		XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3e	XS3m	XD1	XD2	XD3f	XD3ff
F1_CEMI _0.49_55	CH	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺	O ⁺	N	N	N	N	O	N	N	N
	CS	O ⁺	O	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
	CE	-	-	-	-	N	N	N	N	N	N	N	N
F2_CEMIII/B _0.49_35	CH	O ⁺	O ⁺	N	N	O ⁺⁺	O	O ⁺	N	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺
	CS	O	N	N	N	O ⁺	N	N	N	O ⁺⁺	O	O	N
	CE	-	-	-	-	O ⁺	N	N	N	O ⁺⁺	O	O	N
F3_CEMI _0.52_V15% _52	CH	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺	O ⁺	O ⁺	N	N	N	O ⁺⁺	O	O	N
	CS	O ⁺	O	N	N	N	N	N	N	O	N	N	N
	CE	-	-	-	-	N	N	N	N	N	N	N	N
F4_CEMI _0.49_M15% _53	CH	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺	O ⁺	O ⁺⁺	N	O	N	O ⁺⁺	O ⁺	O ⁺	O
	CS	O ⁺	O	N	N	O ⁺	N	N	N	O ⁺⁺	O	O	N
	CE	-	-	-	-	O ⁺	N	N	N	O ⁺⁺	O	O	N
F5_CEMV/A _0.49_51	CH	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O	O ⁺	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺⁺
	CS	O ⁺	N	N	N	O ⁺⁺	O ⁺	O ⁺⁺	O	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺⁺
	CE	-	-	-	-	O ⁺⁺	O	O ⁺	N	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺
F6_CEMVI_0. 5_48*	CH	O ⁺	O ⁺	N	O	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺⁺
	CS	O	N	N	N	O ⁺⁺	O	O ⁺	N	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺
	CE	-	-	-	-	O ⁺⁺	O	O ⁺	N	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺⁺	O ⁺

* Cette formulation a été recomposée à l'aide de deux ciments.

Le positionnement des bétons par rapport aux valeurs seuils des tableaux NA.F de la norme NF EN 206+A2/CN (approche prescriptive) requiert de vérifier les classes de résistance mécaniques des bétons. Les résistances caractéristiques (f_{ck}) sont déterminées sur la base des valeurs moyennes de résistance à la compression obtenues après une période de conservation de 28 jours en conditions humide ($f_{c,28}$).

L'Équation I.13 est utilisée pour ce calcul et s'applique lorsque la résistance moyenne à la compression est obtenue à partir d'échantillons cylindriques de dimensions 110/220 mm [40] :

$$f_{ck} = f_{c,28} - 8 \text{ MPa} \quad \text{Eq (I.13)}$$

Le Tableau 14 présente les différentes classes de résistance équivalentes. Il est important de noter que ces classes sont normalement déterminées après une période de conservation de 28 jours dans un environnement humide avec une humidité relative (HR) dépassant 95 %.

Tableau 14 - Classes de résistance caractéristique des différents bétons conservés en condition CH.

f_{ck} (MPa)	F1_CEMI _0.49_55	F2_CEMIII/B_ 0.49_35	F3_CEMI_ 0.52_V15% _52	F4_CEMI _0.49_M15% _53	F5_CEMV/A _0.49_51	F6_CEMVI _0.5_48*
CH	C40/50	C25/30	C40/50	C40/50	C40/50	C40/50

* Cette formulation est recomposée avec deux ciments.

Pour la condition de conservation CH l'utilisation des bétons dans diverses classes d'exposition peut être déterminée en se référant aux tableaux NA.F1 et NA.F3 de la norme NF EN 206+A2/CN (2025).

Les résultats sont ensuite présentés dans le Tableau 15 avec un code couleur spécifique :

- " N " Orange : Indique qu'un béton n'est pas valide pour une sous-classe spécifique selon l'approche prescriptive (NF EN 206+A2/CN (2025)), mais peut être justifié par l'approche performantielle du FD P18-480 (2025) ;
- " N " Bleu pour XS3 et XD3 : Utilisé pour indiquer que bien que le béton ne réponde pas aux exigences de la sous-classe XS3 ou XD3 selon l'approche prescriptive, il est possible de justifier son utilisation dans la sous-classe équivalente moins agressive (XS3e ou XD3f, respectivement) grâce à l'approche performantielle ;
- " Y " Rouge : Indique que le béton répond aux conditions d'utilisation selon l'approche prescriptive, mais n'est pas validé selon l'approche performantielle ;
- " Y " Bleu : Indique qu'une seule sous-classe de XS3 ou XD3 est validée par l'approche performantielle (XS3e ou XD3f), indiquant une validation partielle par rapport aux exigences spécifiques de cette classe. Dans ce cas, le béton est valide pour la classe d'exposition selon l'approche prescriptive ;
- " Y " et " N " Noirs : Indiquent respectivement que la formule de béton valide ou ne valide pas une classe d'exposition selon l'approche prescriptive et l'approche performantielle du FD P18-480 (2025).

Ces codes couleurs permettent d'évaluer et de comparer l'adéquation des bétons pour différentes conditions d'exposition, en tenant compte à la fois des critères prescriptifs stricts et des critères basés sur la performance, offrant ainsi des indications précieuses pour le choix du béton dans des applications de durabilité variées.

Tableau 15 - Approche prescriptive selon les tables NA.F1 et NA.F3 de la norme NF EN 206+A2/CN (2025).

	F1_CEMI _0.49_55	F2_CEMIII/B _0.49_35	F3_CEMI _0.52_V15% _52	F4_CEMI _0.49_M15% _53	F5_CEMV/A _0.49_51	F6_CEMVI _0.5_48*
	NA.F1	NA.F3	NA.F1	NA.F1	NA.F1	NA.F3
XC1	Y	Y	Y	Y	Y	Y
XC2	Y	Y	Y	Y	Y	Y
XC3	Y	N	Y	Y	Y	Y
XC4	Y	N	Y	Y	Y	Y
XS1	Y	N	Y	Y	Y	Y
XS2	Y	N	Y	Y	Y	Y
XS3	Y	N	N	Y	Y	Y
XD1	Y	N	Y	Y	Y	Y
XD2	Y	N	Y	Y	Y	Y
XD3	Y	N	N	Y	Y	Y

* Cette formulation a été recomposée à l'aide de deux ciments.

Les résultats montrent que les tendances des méthodes de validation varient en fonction du type de béton considéré. En particulier, il y a une occurrence notable de cas où l'approche prescriptive est validée et l'approche performantielle est invalidée pour les bétons à base de

CEM I (F1, F3 et F4) (8 cas de “Y” et 1 de “Y”). Cela concerne principalement les classes d'exposition liées à la présence de chlorures pour lesquelles les bétons contenant des additions minérales présentent généralement de meilleures résistances à la pénétration des ions chlorure. En revanche, pour les bétons avec un contenu élevé en laitier et cendres volantes (F2, F5 et F6), il est possible d'observer la tendance inverse, avec de nombreux cas validés par l'approche performantielle qui ne peuvent pas être atteints avec l'approche prescriptive (6 cas de “N” et 1 de “N”). Cette dernière observation souligne l'intérêt de l'approche performantielle, qui permet une plus grande flexibilité dans l'utilisation des matériaux. De manière générale, ces résultats montrent aussi qu'il est nécessaire de prendre davantage en compte la contribution des additions minérales à la durabilité des bétons dans l'approche prescriptive de la norme NF EN 206+A2/CN. Cela pourrait se traduire par une évolution des coefficients k des additions minérales, et une modification des valeurs limites $A/(A+C)$ des tableaux NA.F.

2.9. Indicateur d'empreinte carbone

Les travaux du Groupe d'Experts Solutions Bas Carbone (AFNOR P18B/GE SBC) ont conduit à l'élaboration et la publication d'un fascicule de documentation qui introduit la notion de "classe de réduction d'impact sur le potentiel de réchauffement global" (PRG), correspondant à l'indicateur "Global Warming Potential" (GWP) en anglais. Il s'agit du FD P18-483-2 « Ecoconception des structures en béton – Partie 2 : spécification des bétons pour des ouvrages à impact carbone réduit » (2025), appelé par la norme NF EN 206/CN. Cette classe est définie pour 1 m³ de béton, en tenant compte de la classe de résistance, la classe d'exposition et la durée d'utilisation prévue du projet. Le principe consiste à attribuer à un béton une classe de réduction d'impact carbone en le comparant à un béton de référence sur un périmètre défini.

Toutefois, il est important de noter que la comparaison de deux solutions constructives doit se faire en prenant en compte l'impact carbone du béton, ainsi que le dimensionnement de l'unité fonctionnelle considérée pour une durée de vie prévue du projet. Deux cas sont définis dans le FD P18-483-2 (2025) pour une unité fonctionnelle préalablement définie :

- Le cas 1 : La structure répond au dimensionnement défini et le béton utilisé respecte à minima la classe de réduction GWR attendue.
- Le cas 2 : L'optimisation du dimensionnement de la structure par rapport au dimensionnement initial entraîne une réduction de l'impact sur le changement climatique à l'échelle de l'unité fonctionnelle à minima équivalente au cas 1, peu importe la classe GWR du ou des béton(s) utilisé(s).

Dans la présente étude, seul l'impact carbone au mètre cube de béton est considérée, sans notion de dimensionnement.

La réduction (en %) du PRG-total du béton par rapport au béton de base est déterminée selon la formule suivante :

$$100 * [1 - (PRG - total \text{ du béton à évaluer} / PRG - total \text{ du béton de base correspondant})]$$

L'échelle des classes de réduction GWR0 à GWR7 est donnée dans le Tableau 16.

Tableau 16 - Classes de réduction GWR de l'indicateur “PRG-total” par rapport au béton de base.

Classe GWR(N)	0	1	2	3	4	5	6	7
Réduction (%)	< 10 (*)	10-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	≥ 70

* Les bétons avec un PRG-total supérieur aux valeurs des bétons de base sont inclus dans la classe GWR0.

Les 8 niveaux de cette échelle sont nommés GWR(N), N pouvant aller de 0 à 7 (plus la classe de réduction carbone est élevée plus l'impact carbone est faible).

La valeur du PRG-total du béton de base est donnée pour une classe d'exposition, une classe de résistance du béton et une durée d'utilisation du projet (DUP) selon le Tableau 17.

En fonction de la dimension maximale du plus gros granulat, du caractère autoplaçant ou non du béton, ou par exemple de l'optimisation du dimensionnement d'une unité fonctionnelle correspondant à une partie d'un ouvrage, il est possible de moduler les valeurs du PRG-total du m³ de béton de base. Ces modulations sont détaillées dans le FD P18-483-2 (2025).

Pour cette étude, voici les hypothèses qui ont été prises pour la réalisation des calculs :

- pour le choix de la valeur du PRG-total du béton de base (Tableau 17), la classe de résistance considérée est la classe de résistance réelle obtenue sur la base des valeurs de résistance à la compression obtenues à 28 jours dans les différentes conditions de conservation ;
- pour le choix de la valeur du PRG-total du béton de base (Tableau 17), la classe d'exposition considérée est la classe d'exposition validée par l'approche performantielle en considérant le respect du critère de résistance mécanique.
- un DUP de 100 ans est considéré ;
- une modulation de la valeur du PRG-total est réalisée car la coupure du plus gros granulat est inférieure à 20 mm (12 mm), soit une modulation de + 9 % ;
- le calcul de réduction du PRG-total par rapport au béton de base est réalisé pour chaque type de classe d'exposition XC et XS ;
- le PRG-total du béton à évaluer a été calculé en considérant une partie des étapes A1 à A3 du cycle de vie.

Les résultats de réduction et de classe associées sont présentés dans le Tableau 18 ainsi que les hypothèses prises pour le calcul.

Tableau 17 - Valeur du PRG-total kg CO_{2eq}/m³ du béton de base selon classe de résistance, classe d'exposition et DUP (FD P18-483-2 (2025)).

R _c	DUP	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
C20/25	50	219	219															
C25/30	50	219	219	235	235				235			235	252					
	100	235	235															
C30/37	50	235	235	235	235	276	276		235	276		235	274	274	285	276		
	100	235	235	252	276	276	276		276	276		276	292	318	318	276		
C35/45	50	276	276	276	276	276	276	292	276	276	292	276	300	301	301	276	292	
	100	276	276	276	276	276	276	292	276	276	292	276	300	323	323	276	292	
C40/50	50 et 100	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318	318	330	330	330	318	318	318
C45/55	50 et 100	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	346	346	346	336	336	336
C50/60	50 et 100	354	354	354	354	354	354	354	354	354	354	354	366	366	366	354	354	354
C55/67	50 et 100	356	356	356	356	356	356	356	356	356	356	356	367	367	367	356	356	356
C60/75	50 et 100	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	357	368	368	368	357	357	357

Tableau 18 - Tableau récapitulatif des données pour obtenir la classe de réduction GWR en fonction du type de classe d'exposition après une conservation de type CH.

Formules	Classe de résistance réelle	Classes d'exposition validées par approche performantielle	PRG-total du béton à évaluer (kg CO _{2eq} /m ³)	Classes XC			Classes XS/XD		
				Valeur du PRG-total de base considéré (kg CO _{2eq} /m ³)	Réduction du PRG-total (%)	Classe de réduction GWR	Valeur du PRG-total de base considéré (kg CO _{2eq} /m ³)	Réduction du PRG-total (%)	Classe de réduction GWR
F1_CEMI_0.49_55	C40/50	XC4/XD1	296	347	14,6	GWR(1)	347	14,6	GWR(1)
F2_CEMIII/B_0.49_35	C25/30	XC2	128	256	50,0	GWR(5)	-	-	-
F3_CEMI_V15%_0.52_52	C40/50	XC4/XS1/XD3f	255	347	26,7	GWR(2)	347	26,7	GWR(2)
F4_CEMI_M15%_0.49_53	C40/50	XC4/XS3e	260	347	25,0	GWR(2)	347	25,0	GWR(2)
F5_CEMVA_0.49_51	C40/50	XC4/XS3m	189	347	45,5	GWR(4)	347	45,5	GWR(4)
F6_CEMVI_0.5_48*	C40/50	XC2/XS3m	159	347	54,3	GWR(5)	347	54,3	GWR(5)

* Cette formulation a été recomposée à partir de deux ciments pour obtenir une composition équivalente à un CEM VI (S-V).

L'évaluation de l'impact carbone du béton est d'un intérêt significatif, comme illustré ci-dessus.

Dans la recherche de Damineli et al. [41], plusieurs estimations sont réalisées en combinant les émissions équivalentes de CO₂ d'une composition de béton avec des indicateurs de performance du béton. Cela a permis à Damineli et al. d'évaluer l'éco-efficacité d'un béton spécifique en fonction de sa résistance à la compression (f_c , MPa) et de sa résistivité électrique (Re , Ohm.m). Pour la première, l'indicateur $f_{cCO_2,i}$, qui représente le rapport des émissions équivalentes de CO₂ du liant à la résistance mécanique (f_c) après 28 jours de conservation, est déterminé à l'aide de l'Équation I.14. De même, le second indicateur $Re_{CO_2,i}$ est obtenu en utilisant l'Équation I.15 pour calculer le rapport des émissions équivalentes de CO₂ du liant à la résistivité électrique (Re) atteinte après 28 jours de conservation.

$$f_{cCO_2,i} = \frac{\text{Emissions CO}_2 \text{ équivalentes}}{f_c} \quad \text{Eq (I.14)}$$

$$Re_{CO_2,i} = \frac{\text{Emissions CO}_2 \text{ équivalentes}}{Re} \quad \text{Eq (I.15)}$$

Les valeurs obtenues sur les six formulations de bétons de la présente étude sont représentées sur la Figure 19 pour $f_{cCO_2,i}$ et sur la Figure 20 pour $Re_{CO_2,i}$. Les résultats obtenus après 28 jours de conservation en CS et CH sont représentés.

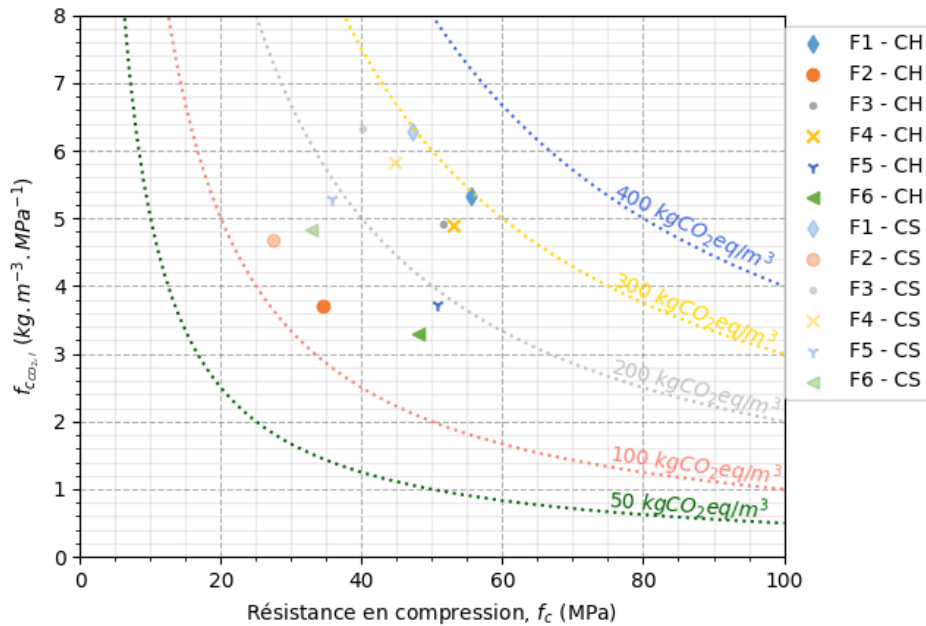


Figure 19 - Émissions de CO₂ relatives à la résistance en compression. ($f_{cCO_2,i}$, $\text{kgCO}_2\text{eq.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$) vs. Valeur de résistance en compression à 28 jours (f_c , MPa)

Les résultats présentés dans la Figure 19 montrent l'efficacité des bétons F5 et F6 lorsqu'ils sont soumis à une conservation favorable (CH). Ces bétons présentent une résistance mécanique moyenne relativement élevée d'environ 50 MPa, tout en maintenant un impact carbone réduit à moins de 200 $\text{kgCO}_2\text{eq/m}^3$ de béton. En comparaison, F2, qui a une empreinte carbone plus faible, n'atteint que 35 MPa, limitant ainsi sa pertinence globale (et son utilisation pour certaines applications). Les compositions avec des teneurs plus élevées en clinker montrent moins d'intérêt, avec une empreinte carbone plus élevée d'environ 300 $\text{kgCO}_2\text{eq/m}^3$.

L'utilisation d'une méthode de conservation moins favorable à l'hydratation (CS) affecte significativement les résultats globaux et modifie les tendances observées. Ainsi, les bétons avec des teneurs plus élevées en additions réactives (F2, F5 et F6) subissent une plus grande réduction de leurs propriétés mécaniques par rapport aux compositions avec des teneurs plus élevées en clinker (F1, F3 et F4). Par conséquent, l'intérêt des bétons F5 et F6 diminue en raison de résistances mécaniques inférieures.

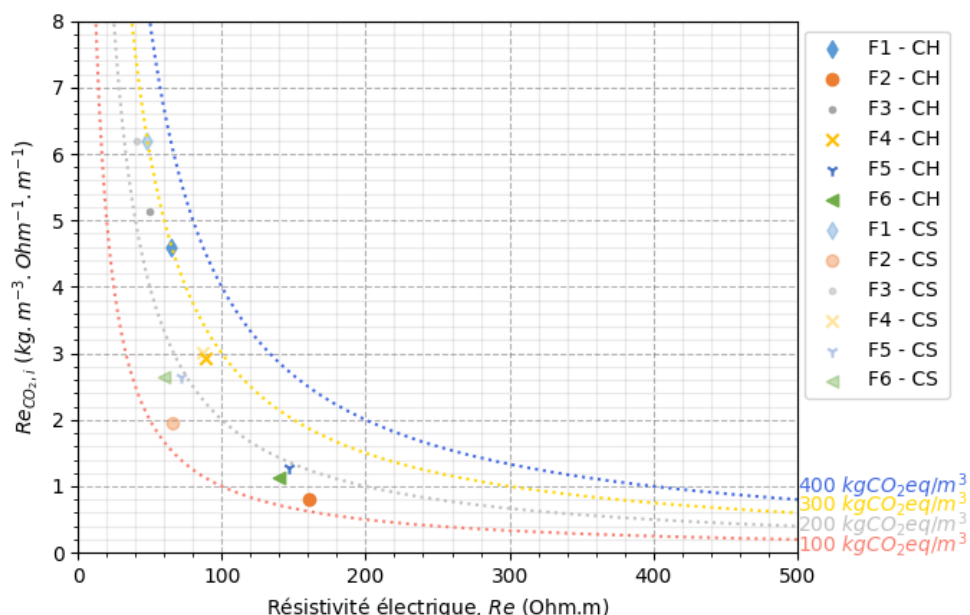


Figure 20 - Émissions de CO₂ relatives aux résistivités électriques ($Re_{CO_2,i}$, $kgCO_2eq \cdot m^{-3} \cdot Ohm^{-1} \cdot m^{-1}$) vs. Valeurs de résistivité électrique à 28 jours (Re , $Ohm \cdot m$).

Les résultats présentés dans le deuxième graphique de la Figure 20 montrent un intérêt accru pour les bétons à forte teneur en cendres volantes et/ou en laitier conservés en CH.

En particulier, les bétons F2, F5 et F6 présentent une empreinte carbone inférieure et une résistivité électrique plus élevée par rapport aux bétons à plus forte teneur en clinker (F1, F3 et F4). De plus, cette différence entre les deux types de béton devrait s'accroître lorsque l'on considère la résistivité électrique obtenue après 90 jours de conservation (voir les valeurs dans la section 2.6.8).

Les résultats obtenus en CS montrent également qu'une meilleure efficacité environnementale est obtenue dans les bétons F2, F5 et F6, malgré une différence moindre en termes de résistivité électrique. Ces conclusions mettent en lumière les avantages de l'utilisation des additions pouzzolaniques et du laitier en général, car elles peuvent permettre l'amélioration de la résistance du béton contre la corrosion et réduire l'empreinte carbone associée à leurs productions.

2.10. Conclusions

Six bétons ont été étudiés : un béton de référence à base de CEM I, deux bétons formulés avec du CEM I et 15 % en masse d'additions minérales (métakaolin et cendres volantes), un béton composé de CEM III/B, un béton composé de CEM V/A (S-V), et un béton formulé avec une recombinaison équivalente à un CEM VI (S-V) en utilisant les deux ciments précédents CEM III/B et CEM V/A (S-V). La principale distinction entre ces mélanges concerne le type de liant utilisé, tandis que la teneur en liant, le rapport eau/liant, le type et la teneur en granulats sont similaires pour l'ensemble des bétons.

L'objectif était de contribuer à la compréhension des processus d'hydratation, des phénomènes de carbonatation et de la migration des ions chlorure entre autres, afin d'évaluer l'efficacité des formulations de béton bas carbone pour répondre aux enjeux de durabilité et de réduction de l'empreinte carbone des structures en béton.

Il a été observé que les bétons incorporant des additions minérales réactives nécessitent des conditions de conservation plus favorables (humidité élevée) ainsi que des périodes de conservation plus longues pour être efficaces. C'est notamment le cas pour des indicateurs de durabilité comme la vitesse de carbonatation, la résistivité électrique, le coefficient de diffusion des chlorures, ainsi que les perméabilités aux gaz et aux liquides. Ces résultats ont mis en évidence l'importance de la conservation pour les bétons ayant de plus faibles taux de clinker formulés dans la présente étude ($E_{\text{eff}}/L_{\text{tot}} = 0,5$) par rapport à la référence à base de CEM I.

Il est important de noter que des matériaux permettent de limiter l'impact des conditions de conservation et de cure sur les performances des bétons à teneur en clinker réduite. La réduction du rapport E_{eff}/L , l'utilisation de traitements thermiques et l'optimisation du squelette granulaire peuvent être également des moyens efficaces pour favoriser une bonne durabilité de ces bétons.

Les résultats ont confirmé les données existantes de la littérature concernant la contribution des additions pouzzolaniques et hydrauliques latentes aux propriétés de durabilité des bétons.

À rapport E_{eff}/L constant, les bétons avec des teneurs plus élevées en clinker ont montré une meilleure résistance à la carbonatation, indiquant la relation intrinsèque entre la teneur en portlandite et la vitesse de carbonatation.

À rapport E_{eff}/L constant, les bétons avec des teneurs plus importantes en additions pouzzolaniques et hydrauliques latentes présentent de meilleures performances en termes de résistance aux chlorures et de résistivité électrique, confirmant les contributions positives de ces nouveaux liants dans la performance à long termes des bétons dans les environnements XS/XD.

Bibliographie

- [1] P. Claude, « Development of a decision support tool in uncertain conditions for the maintenance of reinforced concrete structures subjected to corrosion », Manuscrit de thèse, Toulouse, 2023.
- [2] « (PDF) Perméabilité à l'eau des bétons : développement d'une méthode alternative par séchage ». Consulté le: 3 février 2023. [En ligne]. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/327285593_Permeabilite_a_l'eau_des_betons_developpement_d'une_methode_alternative_par_sechage
- [3] J. Mai-Nhu, « Corrosion des armatures du béton : couplage carbonatation-chlorures en présence de cycles hydriques », Thèse de doctorat, LMDC, INSA Toulouse, 2013.
- [4] L. Schmitt, « Durabilité des ouvrages en béton soumis à la corrosion : optimisation par une approche probabiliste », Thèse de doctorat, LMDC, INSA Toulouse, 2019.
- [5] AFNOR, *FD P18-480 Béton - Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle*, 2022. [En ligne]. Disponible sur : <https://norminfo.afnor.org/consultation/fd-p-18-480/justification-de-la-durabilite-des-ouvrages-en-beton-par-methode-performantielle/123737>
- [6] « Ciments et LHR : analyse et inventaire du cycle de vie (ACV/ICV), déclaration environnementale produit (DEP) », Infociments. Consulté le : 30 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.infociments.fr/ciments/ciments-declaration-environnementale-inventaire-analyse-du-cycle-de-vie>
- [7] Y. Zhang, « Assessment of CO2 emissions and cost of fly ash concrete », oct. 2014.
- [8] « Constituants du béton ». Consulté le : 30 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.diogen.fr/index.php/constituants-du-beton>
- [9] « Plasticisers and superplasticisers EPD 2015 | EFCA ». Consulté le : 30 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.efca.info/download/plasticisers-and-superplasticisers-epd-2015/>
- [10] « Analyse de cycle de vie des granulats | UNPG ». Consulté le : 30 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.unpg.fr/accueil/dossiers/environnement/analyse-de-cycle-de-vie-des-granulats/>
- [11] « Documentation Base Carbone ». Consulté le : 30 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur : https://bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?eau_de_reseau.htm
- [12] AFNOR, *NF EN 12390-3 (2019) Essais pour béton durci - Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes*, 2019. Consulté le : 30 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-123903/essais-pour-beton-durci-partie-3-resistance-a-la-compression-des-eprouvette/fa190566/83462>
- [13] « NF EN 206/CN », Afnor EDITIONS. Consulté le : 18 janvier 2025. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-206-cn/beton-specification-performance-production-et-conformite-complement-nationa/fa185553/1463>
- [14] W. Chen, « Hydration of slag cement: theory, modeling and application ».
- [15] W. Li et al., « Influence of metakaolin on the hydration and microstructure evolution of cement paste during the early stage », *Applied Clay Science*, vol. 229, p. 106674, nov. 2022, doi: 10.1016/j.clay.2022.106674.
- [16] K. Weng, « Influence of silica fume and fly ash on hydration, microstructure and strength of cement based mixtures », p. xiv, 141 leaves: ill.; 30 cm., 1992, doi: 10.11575/PRISM/18566.
- [17] K. A. Gruber, T. Ramlochan, A. Boddy, D. Hooton, et M. D. A. Thomas, « Increasing Concrete Durability With High-Reactivity Metakaolin », *Cement and Concrete Composites*, vol. 23, p. 479-484, déc. 2001, doi: 10.1016/S0958-9465(00)00097-4.
- [18] A. Neville, « Consideration of durability of concrete structures: Past, present, and future », *Mat. Struct.*, vol. 34, n° 2, p. 114-118, mars 2001, doi : 10.1007/BF02481560.
- [19] AFNOR, *NF P18-459 Béton - Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique*, 2022. Consulté le : 30 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-p18459/beton-essai-pour-beton-durci-essai-de-porosite-et-de-masse-volumique/fa160729/34961>
- [20] L. Doussang, G. Samson, F. Deby, B. Huet, E. Guillon, et M. Cyr, « Durability (General Transfer Properties and Chloride Penetration Resistance) of Three Low-Carbon Concretes (Low Clinker,

- Alkali-Activated Slag and Supersulfated Cement) », 2 mai 2023, Rochester, NY: 4436149. doi: 10.2139/ssrn.4436149.
- [21] AFNOR, *XP P18-458 (2022) Essai sur béton durci - Essai de carbonatation accélérée*, 2022. Consulté le : 1 février 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/xp-p18458/essai-pour-beton-durci-essai-de-carbonatation-acceleree-mesure-de-lepaisseur/fa158331/32271>
- [22] A. B. Revert, K. De Weerd, K. Hornbostel, et M. R. Geiker, *State-of-the-art report: Service life modelling, carbonation of concrete and corrosion in carbonated concrete*. NTNU, 2017. Consulté le : 26 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2480580>
- [23] S. von Greve-Dierfeld et al., « Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC », *Mater Struct*, vol. 53, n° 6, p. 136, oct. 2020, doi: 10.1617/s11527-020-01558-w.
- [24] A. El Farissi, « Prédiction de la durée d'utilisation des ouvrages en béton armé par une approche performantielle dans le cas de la corrosion induite par la carbonatation ou l'attaque des ions chlorure », Thèse de doctorat, La Rochelle, 2020. Consulté le : 20 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.theses.fr/2020LAROS025>
- [25] AFNOR, *XP P18-462 (2022) Essai sur béton durci - Essai accéléré de migration des ions chlorure en régime non-stationnaire - Détermination du coefficient de diffusion apparent des ions chlorure*, 2022. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/xp-p18462/essai-sur-beton-durci-essai-accelere-de-migration-des-ions-chlorure-en-regi/fa203053/340441>
- [26] C. L. Page et Ø. Vennesland, « Pore solution composition and chloride binding capacity of silica-fume cement pastes », *Mat. Constr.*, vol. 16, n° 1, p. 19-25, janv. 1983, doi : 10.1007/BF02474863.
- [27] C. Arya, N. R. Buenfeld, et J. B. Newman, « Factors influencing chloride-binding in concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 20, n° 2, p. 291-300, mars 1990, doi: 10.1016/0008-8846(90)90083-A.
- [28] C. Andrade, M. Castellote, et R. d'Andrea, « Measurement of ageing effect on chloride diffusion coefficients in cementitious matrices », *Journal of Nuclear Materials - J NUCL MATER*, vol. 412, p. 209-216, mai 2011, doi: 10.1016/j.jnucmat.2010.12.236.
- [29] V. Baroghel-Bouny et al., « Ageing and durability of concrete in lab and in field conditions: Investigation of chloride penetration », *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, vol. 2, juin 2013, doi: 10.1080/21650373.2013.797938.
- [30] Task Group 5.6, *Model Code for Service Life Design - bulletin 34*. 2006.
- [31] M. Bartholomew et al., « fib Bulletin 76. Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standards: Durability of reinforced concrete structures exposed to chlorides », fib. The International Federation for Structural Concrete, Éd., in fib Bulletins. fib. The International Federation for Structural Concrete, mai 2015. doi: 10.35789/fib.BULL.0076.
- [32] « XP P18-481 », Afnor EDITIONS. Consulté le : 1 février 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/xp-p18481/essai-sur-beton-durci-mesure-de-la-resistivite-electrique/fa203059/340444>
- [33] L. Mosser, E. Garcia-Diaz, P. Rougeau, et F. Jacquemot, « Bétons bas carbone à base de liants ternaires : propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité », in *NOMAD 2022 - 4e conférence internationale francophone Nouveaux Matériaux et Durabilité*, Montpellier, France : IMT Mines Alès and LMGC and LIFAM, nov. 2022. Consulté le : 13 juillet 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://hal.science/hal-03879255>
- [34] M. D. A. Thomas et J. D. Matthews, « Carbonation of fly ash concrete », *Magazine of Concrete Research*, n° 1, p. 12, 1992.
- [35] E. Gruyaert, P. Van den Heede, et N. De Belie, « Carbonation of slag concrete: Effect of the cement replacement level and curing on the carbonation coefficient – Effect of carbonation on the pore structure », *Cement and Concrete Composites*, vol. 35, n° 1, p. 39-48, janv. 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.024.
- [36] A. M. Abd El Fattah et I. N. A. Al-Duais, « Modeling of Chloride Binding Capacity in Cementitious Matrices Including Supplementary Cementitious Materials », *Crystals*, vol. 12, n° 2, Art. n° 2, févr. 2022, doi: 10.3390/cryst12020153.

- [37] V. Baroghel-Bouny, X. Wang, M. Thiery, M. Saillio, et F. BARBERON, « Prediction of chloride binding isotherms of cementitious materials by analytical model or numerical inverse analysis », *Cement and Concrete Research*, vol. 42, p. 1207-1224, sept. 2012, doi: 10.1016/j.cemconres.2012.05.008.
- [38] G. K. Glass, N. M. Hassanein, et N. R. Buenfeld, « Neural network modelling of chloride binding », *Magazine of Concrete Research*, vol. 49, n° 181, p. 323-335, déc. 1997, doi: 10.1680/mac.1997.49.181.323.
- [39] M. Achrafi, G. Villain, et S. Bonnet, « Monitoring chloride diffusion in BFS concrete using an Electrical Resistivity Tomography device », *e-Journal of Nondestructive Testing*, vol. 27, sept. 2022, doi: 10.58286/27281.
- [40] AFNOR, *NF EN 1992-2 Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 2 : ponts en béton - Calcul des dispositions constructives*, 2006. Consulté le : 19 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-19922/eurocode-2-calcul-des-structures-en-beton-partie-2-ponts-en-beton-calcul-de/fa114140/27287>
- [41] B. L. Damineli, F. M. Kemeid, P. S. Aguiar, et V. M. John, « Measuring the eco-efficiency of cement use », *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, n° 8, p. 555-562, sept. 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009.

Annexes

Annexe 1 – Fiches techniques des constituants

FICHE TECHNIQUE PRODUIT

CIMENTS



LAFARGE
Construire des villes meilleures™

SERVICES EXCLUSIFS 

Centre de Relation Clientèle :

0 825 888 425 Service 0,15 €/min
+ prix appel

USINE DU TEIL

CEM I 52,5 N - SR 5 CE PM-CP2 NF HTS

NF EN 197-1 NF P 15-317 NF P 15-318

Déclaration de Performance n°
0333-CPR-1203




CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MECANIQUES

	DP (min)	Stabilité (mm)	Résistances mécaniques (MPa)				MV (g/cm3)	SSB (cm²/g)	Demande en eau (%)	L*		
			2 jours	28 jours								
Val. moyenne	166	1	33,4	66,1			3,16	3670	26,6	64,1		
Val. garantie	> 60	< 5	> 18	> 50								

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

	Valeur moyenne	Valeur garantie		Valeur moyenne
SO ₃ (%)	2,2	≤ 2,5	Alcalins équivalents [Na ₂ O + 0,658 K ₂ O] (%)	0,2
Chlorures Cl ⁻ (%)	0,03	≤ 0,1	Alcalins actifs [suivant la norme NF P 18-454] (%)	0,2
Perte au feu 950°C (%)	1,5	≤ 3	Vc coefficient de variation des alcalins actifs	0,13
Insolubles (%)	0,35	≤ 0,75		
S ⁻ (%)	0	≤ 0,2		

CONSTITUANTS PRINCIPAUX ET SECONDAIRES :

Clinker Portland LE TEIL		Constituants secondaires	
	97,0%		3,0%
C3S + C2S (%)	84	Calcaire	
CaO/SiO ₂	2,8	Fines de cuisson	
MgO (%)	0,8	Laitier de haut fourneau	
C3S (%)	67		
C2S (%)	17		
C3A (%)	4		
C4AF (%)	7		
		Total des constituants	100%

AUTRES CONSTITUANTS

Gypse (%)	2,5
Agent de mouture AMA 32E - Teneur sous forme d'extrait sec (%)	0,04

LIVRAISON EN VRAC



A member of
LafargeHolcim



ISO 9001
BUREAU VERITAS
Certification



ISO 14001
BUREAU VERITAS
Certification

Date de révision : 11/01/2017

Les données figurant sur la présente fiche technique sont la propriété de Lafarge Ciments et ne peuvent être reproduites partiellement ou totalement sans notre autorisation préalable. Les résultats indiqués ne sont mentionnés qu'à titre purement indicatif; ils sont susceptibles de variation dans les limites des normes applicables et ne sauraient en conséquence engager la responsabilité de Lafarge Ciments. Les résultats de nos autocontrôles périodiques sont disponibles sur demande auprès de votre interlocuteur commercial habituel ou sur notre site internet www.lafarge-france.fr

Direction Commerciale
Assistance
et Prescription Clients
Tél. : 01 34 77 78 81
Fax : 01 30 98 73 50



Ciments Calcia
HEIDELBERGCEMENT Group

Version du : 26/02/2020
N° DoP : 0333-CPR-2105

Fiche produit

COUVROT
CEM II/A-LL 42.5 R CE CP2 NF

Caractéristiques physiques et mécaniques											
Compression en MPa				Eau pâte pure en %	Début de prise en mn	Stabilité en mm	Masse volumique en g/cm ³	Surface Blaine en cm ² /g	Chaleurs en J/g		L*
1j	2j	7j	28j						41h	120h	
-	35	49	57	27.6	3H14	0	3.05	4824	335	-	67

Composition élémentaire (%)		Constituants (%)		Caractéristiques des constituants			
				Nature	Caractéristiques		
Perte au feu	6.8	Principaux		Clinker (K) de Couvrot	CaO/SiO ₂	-	3.1
SiO ₂	17.8	Clinker (K) de Couvrot	87.0		C ₃ S+C ₂ S (%)	-	78
Al ₂ O ₃	4.5	Calcaire (L)	12.0		MgO (%)	-	1.0
Fe ₂ O ₃	2.4				Al ₂ O ₃ (%)	-	-
TiO ₂	-				C ₃ S (%)	-	68.6
MnO	-				C ₂ S (%)	-	9.8
CaO	63.8	Secondaires	1.0		C ₃ A (%)	-	9.8
MgO	0.9				C ₄ AF (%)	-	8.3
SO ₃	3.3						
K ₂ O	0.87						
Na ₂ O	0.16			Calcaire (L ou LL)	CaCO ₃ (%)		100.0
P ₂ O ₅	0.1	BPD (%)			Vb (g/100g)		0.1
S--	<0,02				TOC (%)		0.15
Cl-	0.01						
Insoluble	0.2	Sulfate de calcium			Laitier vitreux (%)	-	-
Na ₂ O eq.	0.74	Gypse	5.4		(CaO+MgO)/SiO ₂	-	-
Na ₂ O eq. Actif	0.65	Anhydrite	-		CaO+MgO+SiO ₂ (%)	-	-
		Additifs			PF (%)	-	-
		Agent de mouture	0.037		CaO réactive (%)	-	-
		Agent réducteur de Cr VI	0.20		SiO ₂ réactive (%)	-	-
C ₃ A	-			Cendres (V)	SiO ₂ amorphe (%)	-	-
C ₃ A+0.27xC ₃ S	-				PF (%)	-	-
C ₄ AF+2xC ₃ A	-				Aire massique BET (m ² /kg)	-	-

Etablissement	Vrac	Big bag	Sac 25 kg	Sac 35 kg
Usine de Couvrot	Oui	Non	Non	Non
Dépôt de Bruneseau	Oui	Non	Non	Non
Dépôt de Strasbourg	Oui	Non	Non	Non

Ces valeurs ne sont données qu'à titre indicatif. Les résultats d'auto-contrôle sont disponibles sur demande à la Direction Commerciale Assistance et Prescription Clients



Siège social :
Rue des Technodes
78930 Guerville
Tél. : 01 34 77 78 00
Fax : 01 34 77 79 06

SAS au capital de 593 836 525 €
Siren 654 800 689 RCS Versailles

Direction Commerciale
Assistance
et Prescription Clients
Tél. : 01 34 77 78 81
Fax : 01 30 98 73 50



Ciments Calcia
HEIDELBERGCEMENT Group

version du: 21/02/22
N° DoP : 0333-CPR-2207

Fiche produit	ROMBAS CEM III/B 32,5 N-LH/SR CE PM-CP1 NF "SPM"
----------------------	--

Caractéristiques physiques et mécaniques											
Compression en MPa				Eau pâte pure en %	Début de prise en mn	Stabilité en mm	Masse volumique en g/cm³	Surface Blaine en cm²/g	Chaleurs en J/g		L*
1j	2j	7j	28j						41h	120h	
-	9	23	42	29,9	3h54	1	2,97	3497	188	-	73

Indice de concentration d'activité I	0,56
--------------------------------------	------

Composition élémentaire (%)		Constituants (%)	
Perte au feu	1,4	<u>Principaux</u>	
SiO ₂	31	Clinker (K) COUVROT (%)	29,0
Al ₂ O ₃	8,7		
Fe ₂ O ₃	1,2	Laitier (S)	71,0
TiO ₂	-		
MnO	-		
CaO	48	<u>Secondaires</u>	
MgO	4,9		
SO ₃	2,9		
K ₂ O	0,66		
Na ₂ O	0,21		
P ₂ O ₅	-		
S--	0,55		
Cl-	0,03		
Insoluble	0,5	<u>Sulfate de calcium</u>	
		Gypse	-
Na ₂ O eq.	0,64	Anhydrite	4,9
Na ₂ O eq. Actif	-	<u>Additifs</u>	
C ₃ A	-	Agent réducteur de Cr VI	0,15
C ₃ A+0.27xC ₃ S	-		
C ₄ AF+2xC ₃ A	-		

Etablissement	Vrac	Big bag	Sac 25 kg	Sac 35 kg
Usine de Rombas	Oui	Non	Non	Non

Caractéristiques des constituants			
Nature	Caractéristiques		
<u>Clinker (K)</u> <u>COUVROT (%)</u>	CaO/SiO ₂	-	K 3,1
	C ₃ S+C ₂ S (%)	-	78
	MgO (%)	-	1,0
	Al ₂ O ₃ (%)	-	-
	C ₃ S (%)	-	68
	C ₂ S (%)	-	9,3
	C ₃ A (%)	-	9,9
	C ₄ AF (%)	-	8,4
<u>Calcaire</u> <u>(L ou LL)</u>	CaCO ₃ (%)	-	-
	Vb (g/100g)	-	-
	TOC (%)	-	-
<u>Laitier</u> <u>(S)</u>	Laitier vitreux (%)	-	98
	(CaO+MgO)/SiO ₂	-	1,3
	CaO+MgO+SiO ₂ (%)	-	84
<u>Cendres</u> <u>(V)</u>	PF (%)	-	-
	CaO réactive (%)	-	-
	SiO ₂ réactive (%)	-	-
<u>Fumées de</u> <u>silice (D)</u>	SiO ₂ amorphe (%)	-	-
	PF (%)	-	-
	Aire massique BET (m ² /kg)	-	-

Ces valeurs ne sont données qu'à titre indicatif. Les résultats d'auto-contrôle sont disponibles sur demande
à la Direction Commerciale.

Siège social :
Rue des Technodes
78930 Guerville
Tél. : 01 34 77 78 00
Fax : 01 34 77 79 06

SAS au capital de 593 836 525 €
Siren 654 800 689 RCS Versailles

Direction Commerciale
Tour Alto
4 Place des Saisons
92400 Courbevoie
Tél : 01 40 89 51 00



version du: 01/08/22
N° DoP : 0333-CPR-5006

Fiche produit	AIRVAULT CEM V/A (S-V) 42,5 N CE PM-ES-CP1 NF "PMF3"
----------------------	--

Caractéristiques physiques et mécaniques											
Compression en MPa				Eau pâte pure en %	Début de prise en mn	Stabilité en mm	Masse volumique en g/cm³	Surface Blaine en cm²/g	Chaleurs en J/g		L*
1j	2j	7j	28j						41h	120h	
-	22	31	52	30,5	5h19	0	2,92	4971	291	-	59

Indice de concentration d'activité I	0,49
--------------------------------------	------

Composition élémentaire (%)	Constituants (%)
Perte au feu	1,5
SiO ₂	31
Al ₂ O ₃	10
Fe ₂ O ₃	4,0
TiO ₂	-
MnO	-
CaO	46
MgO	2,5
SO ₃	2,7
K ₂ O	1,3
Na ₂ O	0,37
P ₂ O ₅	0,36
S--	0,16
Cl-	<0,007
Insoluble	-
Na ₂ O eq.	1,2
Na ₂ O eq. Actif	0,74
C ₃ A	-
C ₃ A+0.27xC ₃ S	-
C ₃ AF+2xC ₃ A	-
	Principaux
	Clinker (K) AIRVAULT (%)
	58,0
	Laitier (S) (%)
	22,0
	Cendres (V) (%)
	20,0
	Secondaires
	Calcaire (LL) (%)
	-
	FDEC (%)
	-
	Sulfate de calcium
	Gypse
	3,1
	Anhydrite
	-
	Additifs
	Agent de mouture
	0,048
	Agent réducteur de Cr VI
	0,43

Etablissement	Vrac	Big bag	Sac 25 kg	Sac 35 kg
Usine d'Airvault	Oui	Non	Non	Oui

Caractéristiques des constituants			
Nature	Caractéristiques		
<u>Clinker (K)</u> <u>AIRVAULT (%)</u>	CaO/SiO ₂	-	K 3,1
	C ₃ S+C ₂ S (%)	-	78
	MgO (%)	-	1,4
	Al ₂ O ₃ (%)	-	-
	C ₃ S (%)	-	68
	C ₂ S (%)	-	10
	C ₃ A (%)	-	6,9
	C ₄ AF (%)	-	10
<u>Calcaire</u> <u>(L ou LL)</u>	CaCO ₃ (%)		94
	Vb (g/100g)		0,33
	TOC (%)		0,05
<u>Laitier</u> <u>(S)</u>	Laitier vitreux (%)		99
	(CaO+MgO)/SiO ₂		1,4
	CaO+MgO+SiO ₂ (%)		86
<u>Cendres</u> <u>(V)</u>	PF (%)		4,0
	CaO réactive (%)		<10
	SiO ₂ réactive (%)		40
<u>Fumées de silice (D)</u>	SiO ₂ amorphe (%)		-
	PF (%)		-
	Aire massique BET (m²/kg)		-

Ces valeurs ne sont données qu'à titre indicatif. Les résultats d'auto-contrôle sont disponibles sur demande à la Direction Commerciale.

Siège social
Tour Alto
4 Place des Saisons
92400 Courbevoie
Tél : 01 40 89 51 00

SAS au capital 593 836 525 euros
Siren 654 800 689 en cours de transfert au RCS de Nanterre

argicem®

METAKAOLIN (NF P 18-513) A - F_M - W_M

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES			
Exigences chimiques	Norme appliquée	Valeur garantie	Valeur moyenne
Silice (SiO ₂) + Alumine (Al ₂ O ₃)	NF EN 196-2	> 90,0 %	92,45 %
Chlorures	NF EN 196-2	< 0,1 %	0,002 %
Sulfates	NF EN 196-2	< 1,0 %	0,20 %
Oxyde de calcium (CaO) libre	NF EN 451-1	< 1,0 %	0,322 %
Teneur en alcalins totaux (Na ₂ O équivalent)	NF EN 196-2	-	0,251 %
Oxyde de magnésium (MgO)	NF EN 196-2	< 4,0 %	0,19 %
Perte au feu	NF EN 196-2	< 4,0 %	1,30 %
Valeur au bleu MB _F	NF EN 933-9	< 10 g/kg	7,48 g/kg
Fixation de l'hydroxyde de calcium (Ca(OH) ₂)	Essai Chapelle modifié	> 700 mg/g	773,9 mg/g

Les valeurs moyennes, données à titre indicatif, sont les valeurs des douze derniers mois

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES			
Exigences physiques	Norme appliquée	Valeur garantie	Valeur moyenne
Masse volumique des particules	NF EN 196-6 NF EN 197-7	2500 kg/m ³ ± 200 kg/m ³	2551 kg/m ³
Finesse	NF EN 933-1	Passant à 0.063 mm ≥ 70 % (Catégorie F _M)	74,6 %
Indice d'activité à 28 jours	NF EN 196-1	> à 100 % (Type A)	i ₂₈ = 101,93 %
Demande en eau	NF EN 196-3	≤ 1,15 (Catégorie W _M)	1,08
Temps de début de prise	NF EN 196-3	< 25 %	3,40 %
Stabilité	NF P 18-513	Si (CaO) libre < 1%	N.A.
Surface spécifique BET	NF ISO 9277	-	15,65 m ² /g

Les valeurs moyennes, données à titre indicatif, sont les valeurs des douze derniers mois

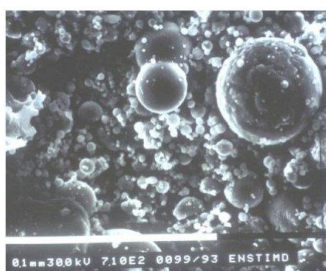
Date de révision : 13/07/2016

La reproduction de tout ou partie de ce document est soumise à l'accord préalable d'argeco DEVELOPPEMENT. Les informations contenues dans ce document peuvent évoluer. Aussi exactes que possibles, elles ne peuvent en aucun cas engager la responsabilité d'argeco DEVELOPPEMENT.



SILICOLINE®

- Cendre volante silico-alumineuse certifiée EN 450.
- La Silicoline® est disponible sèche ou humide, en vrac ou conditionnée en big bag, et se transporte par camion-citerne pulvérulent ou par bateau.



ANALYSES PHYSIQUES			
Perte au feu	%	EN 196-2 à 950° 1 heure	2 à 7
Taux de carbone		NF P 10-694	
Masse Volumique apparente - en vrac			
sèche non tassée	t/m3		0,6 à 0,8
sèche tassée	t/m3		0,8 à 1,00
humide	t/m3		1,00 à 1,20
Masse Volumique réelle des grains	t/m3	EN 196-6	2,00 à 2,40
Masse Volumique absolue de la matière	t/m3		2,06 à 2,80
Granulométrie			
passants à 45 µm	%	EN 451-2 ou Alpine	65 à 75
passants à 80 µm	%	méthode Alpine	75 à 90
passants à 200 µm	%	méthode Alpine	96 à 99
passants à 315 µm	%	méthode Alpine	100
Blaine		g/cm2	2300 à > 5000
Indices d'activité			
28 j	%	EN 196-1	> 75 - > 80 - > 83
90 j	%	EN 196-1	> 85 - > 90 - > 95
ANALYSES CHIMIQUES			
SiO2	%	ICP ou FLUO X	50 à 55
Al2O3	%	ICP ou FLUO X	20 à 25
Fe2O3	%	ICP ou FLUO X	8,5
MgO	%	ICP ou FLUO X	3
MnO2	%	ICP ou FLUO X	0,5
CaO Total	%	ICP ou FLUO X	1 à 6
CaO Libre	%	EN 451-1	0,15 à 1
SO3	%	EN 196-2	0,3 à 2
TiO2	%	ICP ou FLUO X	1
Chlore T	%	EN 196-2	0,04
P2O5	%	ICP ou FLUO X	0,25
Na2O	%	ICP ou FLUO X	0,6
K2O	%	ICP ou FLUO X	0,8 à 4

PROPRIETES POUZZOLANIQUES

BETON

Selon la norme EN 196.1

Détermination résistances mécaniques

Indice activité à 28 jours en % = 75* à > 90

Indice activité à 90 jours en % = 85* à >100

*minimum exigé par EN 450-1 2012

ROUTE

Selon norme NF P 98 111

Essais de réactivité des cendres silico-alumineuses à la chaux.

Indice pouzzolanique :

à 60 jours MPa > 3.5 et à 360 jours MPa >10

REGLEMENTATION

CIMENT

Spécifications dans la norme NF P 15 301 et NF EN 197-1

ROUTE

NF P 11 300

NF EN 14227-XX

EN 13282

Classification des sols

Mélanges traités aux liants hydrauliques

Liants hydrauliques routiers

BETON

EN 450-1 2012

EN 450-2

EN 206-1

Cendres volantes pour béton, spécifications et critères de conformités

Cendres volantes pour béton, Evaluation de la conformité

Béton – Spécification – Performance

SURSCHISTE SIEGE
ZI LA CROISSETTE
33 Rue Auguste Mariette
62300 LENS

Tél : 03 21 45 73 73
Fax : 03 21 45 73 70
Mail : siege@surschiste.com
Site internet : www.surschiste.com



 Carrières du Boulonnais Tél : 03.21.99.67.00 Fax : 03.21.99.67.10	S.A.S. CARRIERES DU BOULONNAIS 62250 FERQUES R.C. CALAIS B 541 750 550 - APE 142A	
	Fiche Technique Produit	
	GRAVILLON lavé 4/12 mm (GL0412)	
Référence normative	NF P 18-545, Article 10 Code : A	
Nature Pétrographique	Calcaire viséen dur compact	
Utilisation	Granulats pour bétons hydrauliques	

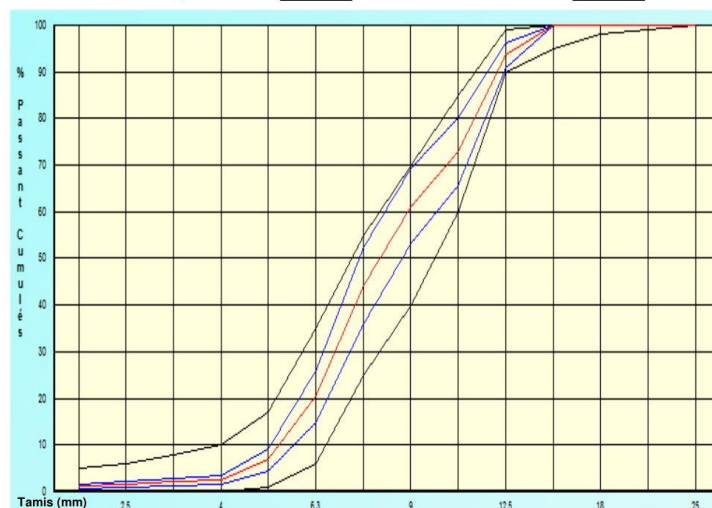
Spécifications contractuelles :

	2D	1.4D	D	D/1,4	d	d/2	f	FI	LA
Tamis (mm)	25	18	12,5	9	4	2			
Vss			99.0	70.0	10.0	5.0	4.00	20	30
Vsi	100.0	98.0	90.0	40.0					
Vss + U			100.0	76.0	15.0	6.0	4.30	24	33
Vsi - U		97.0	85.0	34.0					
Sf max				9.09					

Résultats : Granularité et propreté : Période du 05/05/12 au 05/11/12 (6 mois)
 Autres caractéristiques : Période du 05/11/10 au 05/11/12 (24 mois)

	2D	1.4D	D	D/1,4	d	d/2	f	FI	LA
Tamis (mm)	25	18	12,5	9	4	2			
maxi			97.0	74.5	4.3	2.4	1.33	14	26
Xf+1,25 Sf			96.2	69.4	3.4	1.7	0.81		25.2
moyenne Xf	100.0	100.0	93.6	61.3	2.4	1.1	0.54	12.8	23.7
Xf - 1,25 Sf	100.0	100.0	91.0	53.3					
mini	100.0	100.0	87.0	42.4					
Ecart type Sf	0.00	0.00	2.08	6.46	0.79	0.42	0.220		1.20
nb. valeurs	51	51	51	51	51	51	51	10	24

Fuseau de régularité  de fabrication  Moyenne de fabrication 



Autres Caractéristiques

	Valeur	Dernier Essai
MVR	2,67 t/m3	03/09/12
WA24	0,7 %	03/09/12
Na2O équi.	5,6 mg/kg	16/01/12
S total	0,03 %	16/01/12
Cl-	<0,0002%	16/01/12
MBF	1,9 g/kg	11/10/12
ImP	Néant	25/10/12
A R	NR	16/01/12

Sensibilité au gel-dégel: GA.
 Boulettes d'argile : Néant (25/10/2012)
 Présence éventuelle de nodules ferreux.

Date et visa du responsable contrôle qualité

05/11/12

Fiche n°: 1238

Nos produits étant sujets à évolution, merci de nous contacter pour tout engagement ou durée de validité



**Carrières
du Boulonnais**

Tél : 03.21.99.67.00
Fax : 03.21.99.67.10

S.A.S. CARRIERES DU BOULONNAIS
62250 FERQUES
RCS BOULOGNE-SUR-MER B 541 750 550

Fiche Technique Produit

SABLE lavé 0/4 mm à 7 % de fines (SL0704)

Référence normative	NF P 18-545, article 10	 AFNOR CERTIFICATION 11, rue Francis de Pressensé 93571 LA PLAINE ST DENIS Cedex
Lieu de production	FERQUES	
Site de production	CARRIERES DU BOULONNAIS	
Nature Pétrographique	Calcaire viséen dur compact	
Utilisation	Granulats pour bétons hydrauliques	

Spécifications contractuelles : Engagement producteur du 28/05/15 au 28/11/15

	2D	1.4D	D	2	1	0,5	0,25	0,125	f	FM	MB
Tamis (mm)	8	5,6	4	2	1	0,500	0,250	0,125	0,063		
Vss			99.0		64.0		37.0		10.0	3.15	1.50
Vsi	100.0	95.0	89.0		50.0		23.0		4.0	2.55	
Vss + U			100.0		68.0		41.0		12.0	3.30	2.00
Vsi - U		94.0	87.0		46.0		19.0		2.0	2.40	
Sf max					4.24		4.24			0.180	

Résultats : Granularité et propreté : Période du 28/11/14 au 28/05/15 (6 mois)
Autres caractéristiques : Période du 28/11/14 au 28/05/15 (6 mois)

	2D	1.4D	D	2	1	0,5	0,25	0,125	f	FM	MB
Tamis (mm)	8	5,6	4	2	1	0,500	0,250	0,125	0,063		
maxi			96.0		62.3		36.3		9.0	3.02	0.60
Xf+1,25 Sf			95.9		60.0		34.3		8.0	2.94	0.43
moyenne Xf	100.0	100.0	94.9	74.1	57.3	44.1	31.6	16.8	6.1	2.81	0.34
Xf - 1,25 Sf	100.0	100.0	94.0		54.5		28.9		4.3	2.68	
mini	100.0	100.0	93.0		51.9		27.6		4.0	2.57	
Ecart type Sf	0.00	0.00	0.76	2.26	2.19	2.35	2.15	1.86	1.45	0.100	0.080
nb. valeurs	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47

Fuseau de régularité

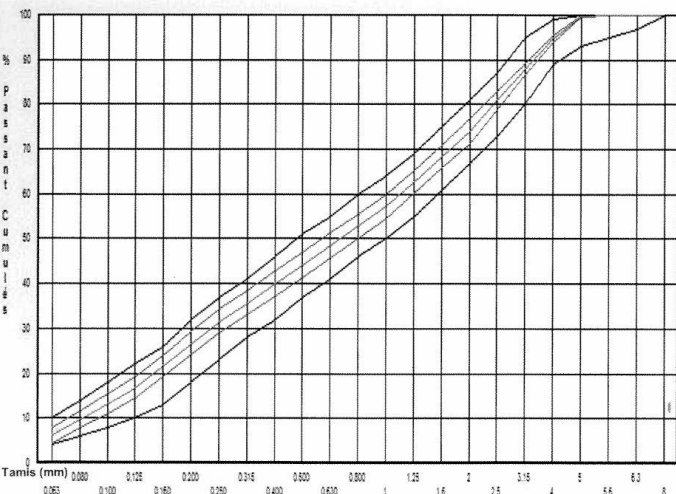


de fabrication



Moyenne de fabrication

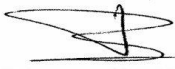




Autres Caractéristiques

	Valeur	Dernier Essai
WA24	0.53%	19/01/15
S total	0,08 %	02/02/15
Cl-	0,0007%	24/01/14
Na2O équi.	23.3mg/kg	19/01/15
MVR	2,66 t/m3	19/01/15
A R	NR	02/02/15
PO	Négatif	02/02/15
ImP	Néant	11/05/15
SO3	<0.04%	02/02/15

Date et visa du responsable contrôle qualité

28/05/15 

Fiche n° : 1464

Nos produits étant sujets à évolution, merci de nous contacter pour tout engagement ou durée de validité

Annexe 2 – Valeurs numériques de suivi des conditions environnementales

Tableau A1 - Valeurs moyennes d'humidité relative et de température mesurées pendant les 90 jours de conservation.

Nom	CE		CS	
	HR_{env}	T_{env}	HR_{env}	T_{env}
F1_CEMI_0.49_55	78	6	35	21
F2_CEMIII/B_0.49_35	73	16	40	24
F3_CEMI_0.52_V15%_52	85	12	37	20
F4_CEMI_0.49_M15%_53	91	6	35	20
F5_CEMV/A_0.49_51	89	5	36	21
F6_CEMVI_0.5_48*	71	14	42	24

* Cette formulation a été recomposée à partir de deux ciments (50 m.% de CEM III/B et 50 m.% de CEM V/A).

Tableau A2 - Valeurs statistiques des paramètres environnementaux mesurées sur la période de 90 jours de suivi de perte de masse en CS.

	F1_CEMI_0.49_55	F2_CEMIII/B_0.49_35	F3_CEMI_0.52_V15%_52	F4_CEMI_0.49_M15%_53	F5_CEMV/A_0.49_51	F6_CEMVI/A_0.5_48*
μ_{HR} (%)	33,1	33,1	37,4	33,1	40,6	37,7
CoV_{HR} (%)	14,1	14,1	21,5	14,1	16	18,4
min_{HR} (%)	23,5	23,5	24,3	23,5	27,1	22,5
max_{HR} (%)	47,9	47,9	60,6	47,9	60,5	67,4
μ_T (°C)	23,6	23,6	20,4	23,6	23,7	25,1
CoV_T (°C)	9,3	9,3	2,5	9,3	3,68	9,9
min_T (°C)	19,9	19,9	18,3	19,9	21,8	19,7
max_T (°C)	30,1	30,1	26	30,1	30,2	32,6

Index des figures

Figure 1 – Nomenclature utilisée dans le présent rapport (composition F4).	10
Figure 2 – Positionnement des formules de bétons sur le diagramme ternaire Clinker-Laitier-Cendres volantes (K-S-V).	10
Figure 3 – Valeurs moyennes de résistance à la compression f_c obtenues pour chaque formulation et chaque condition de conservation après 28 jours.	17
Figure 4 – Évolutions des résistances en compression des différentes formulations conservées en conditions humides.	18
Figure 5 – Évolutions des résistances en compression des différentes formulations conservées en conditions humides sous la forme de ratio $f_c(t)/f_c, 90j$.	18
Figure 6 – Valeurs moyennes de porosité accessible à l'eau obtenues pour chaque formulation et chaque condition de conservation.	20
Figure 7 – Valeurs moyennes de perméabilité aux gaz mesurées sur bétons secs (K_{sec}) pour chaque condition de conservation.	21
Figure 8 – Valeurs moyennes de suivi de perte de masse des échantillons de chaque formulation conservées 90 jours en CS (a), CE (b) et CH (c).	23
Figure 9 – Profondeur de carbonatation en fonction de la racine carré du temps pour les différents bétons conservés en CS.	25
Figure 10 – Profondeur de carbonatation en fonction de la racine carré du temps pour les différents bétons conservés en CH.	25
Figure 11 – Profondeur de carbonatation initiale en fonction de la quantité de clinker du liant pour les conservations CH et CS.	27
Figure 12 – Vitesses de carbonatation naturelle (V_{nat} , mm.an ^{-0.5}) obtenues pour les différentes compositions en CS et CE.	28
Figure 13 – Coefficients de migration des ions chlorure obtenus après 28 jours de conservation.	30
Figure 14 – Coefficients de migration des ions chlorure obtenus après 90 jours de conservation.	31
Figure 15 – Évolution du coefficient de migration des ions chlorure (D_{rcm}) pour chaque formulation conservée en CH (a) et en CS (b).	33
Figure 16 – Résistivité électrique mesurées après des conservations de 7 (a), 28 (b) et 90 jours (c).	36
Figure 17 – Évolution de la résistivité électrique en conservation CS (a) et CH (b).	37
Figure 18 – Ratio des différences relatives entre CH et CS sur les valeurs maximales obtenues sur les six formules de béton pour F1 (a), F2 (b), F3 (c), F4 (d), F5 (e) et F6 (f) (la « Moyenne » correspond à la moyenne de l'ensemble des valeurs de ratio).	42
Figure 19 – Émissions de CO ₂ relatives à la résistance en compression.	51
Figure 20 – Émissions de CO ₂ relatives aux résistivités électriques	52

Index des tableaux

Tableau 1 - Compositions des six bétons définis pour la campagne expérimentale.....	11
Tableau 2 - Plan expérimental réalisé pour les six formulations de béton.	13
Tableau 3 - Valeurs statistiques définissant les conditions environnementales des 3 types de conservation.....	14
Tableau 4 - Empreinte carbone ($kgCO_{2eq}/m^3$) des différents constituants et références utilisées.....	15
Tableau 5 - Empreinte carbone ($kgCO_{2eq}/m^3$) calculée pour chaque formulation.	16
Tableau 6 - Différence de perte de masse entre les échantillons conservés en CH et CS après 90 jours de séchage.	24
Tableau 7 - Vitesse de carbonatation V_{acc} (mm.jour ^{-0.5}) obtenues par régression pour CH et CS.....	26
Tableau 8 - Ratios de la vitesse de carbonatation naturelle en mm.an ^{-0.5} (CE et CS) sur la vitesse de carbonatation accélérée en mm.jour ^{-0.5} (CS).	29
Tableau 9 - Comparaisons des coefficients de migration des ions chlorure obtenus après une conservation de 90 jours en CH et CS.	32
Tableau 10 - Valeurs de facteur de vieillissement ou « ageing factor » (ae) calculées à partir des valeurs expérimentales et en utilisant la méthode du FD P18-480 (2025).	34
Tableau 11 - Comparaisons des résistivités électriques obtenues en CH et CS après 90 jours de conservation.....	38
Tableau 12 - Différence relative absolue (% , $(V_{CH} - V_{CS})/V_{CS}$) entre les résultats obtenus en CH et CS pour les six formulations de béton et chaque paramètre.	40
Tableau 13 - Positionnement des différents bétons selon les seuils de l'approche performantielle du fascicule FD P18-480 (2025).	45
Tableau 14 - Classes de résistance caractéristique des différents bétons conservés en condition CH.....	46
Tableau 15 - Approche prescriptive selon les tables NA.F1 et NA.F3 de la norme NF EN 206+A2/CN (2025).	46
Tableau 16 - Classes de réduction GWR de l'indicateur "PRG-total" par rapport au béton de base.	47
Tableau 17 - Valeur du PRG-total $kg CO_{2eq}/m^3$ du béton de base selon classe de résistance, classe d'exposition et DUP (FD P18-483-2 (2025)).....	49
Tableau 18 - Tableau récapitulatif des données pour obtenir la classe de réduction GWR en fonction du type de classe d'exposition après une conservation de type CH.	50

RAPPORT

ÉTUDES ET RECHERCHES

DÉVELOPPEMENT
DURABLE
DURABILITÉ

PAULO CLAUDE



/ Cerib - CS 10010
28233 Épernon cedex

/ 02 37 18 48 00
cerib@cerib.com

DURABILITÉ DES BÉTONS - ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE LA CONSERVATION SUR LES BÉTONS À BASE DE LAITIER, MÉTAKAOLIN ET CENDRES VOLANTES

Ce rapport présente une analyse de la durabilité des bétons décarbonés et étudie l'influence des conditions de conservation sur leurs propriétés. Il est issu de la thèse de Paulo Claude défendue en 2023. Il contient aussi une analyse selon le contexte normatif actuel à travers l'application des documents NF EN 206+A2/CN, FD P18-480 et FD P18-483-2.

Six liants à base de CEM III/B, CEM V/A, CEM VI, cendres volantes et métakaolin sont étudiés.

Les essais de durabilité réalisés sur béton sont la porosité accessible à l'eau (NF EN 18-459), la perméabilité aux gaz (XP P18-463), la carbonatation accélérée (XP P18-458) et naturelle, ainsi que la migration des ions chlorure (XP P18-462) et la résistivité électrique (XP P18-481). Trois types de conservations (humide, sèche et extérieure) sont considérées pour étudier les différences d'hydratation et de gains de propriétés des bétons.

Les résultats montrent que les bétons contenant des additions réactives présentent une hydratation plus lente, affectant leurs performances mécaniques et leur durabilité, en particulier avec des conservations sèche ou extérieure. La conservation humide permet une meilleure hydratation des liants et améliore significativement les propriétés mécaniques et de durabilité, notamment avec les liants à faible teneur en clinker étudiés.

This report presents an analysis of the durability of low-carbon concretes and examines the influence of conservation conditions on their properties. It originates from Paulo Claude's doctoral thesis defended in 2023. It also includes an analysis within the current normative context through the application of NF EN 206+A2/CN, FD P18-480, and FD P18-483-2 documents.

Six binders based on CEM III/B, CEM V/A, CEM VI, fly ash, and metakaolin are studied.

Durability tests performed on concrete include water-accessible porosity (NF EN 18-459), gas permeability (XP P18-463), accelerated and natural carbonation (XP P18-458), chloride ion migration (XP P18-462), and electrical resistivity (XP P18-481). Three conservation conditions (wet, dry, and outdoor) are considered to study differences in hydration and property gains in concretes.

The results show that concretes containing reactive additions exhibit slower hydration, affecting their mechanical performance and durability, particularly under dry or outdoor curing. Wet curing enables better binder hydration and significantly improves mechanical and durability properties, especially for the low-clinker binders studied.