

EVALUATION TECHNIQUE DE PRODUITS ET MATERIAUX

N° ETPM-22/0077 du 2 juin 2022

Concernant le ciment d'argile MCC1® pour béton Argiroc®



Première édition :
Evaluation Technique de Produits et Matériaux
ETPM-22/0077 du 2 juin 2022
Edition corrigée du 26/07/2022

Titulaire : Materrup
440 rue des Estagnots - 40230 Saint Geours de Marenne

Distributeur : Materrup
440 rue des Estagnots - 40230 Saint Geours de Marenne

Usine : Materrup
Usine de Saint Geours de Marenne

Cette Evaluation Technique comporte 52 pages. Sa reproduction n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral sauf accord particulier du CSTB.

AVERTISSEMENT

Cette Evaluation Technique de Produits et Matériaux, du fait qu'elle ne vise qu'à déterminer des caractéristiques intrinsèques d'un produit ou d'un matériau, n'a pas de valeur d'Avis Technique au sens de l'arrêté modifié du 21 mars 2012. Elle ne dispense pas de vérifier l'aptitude du produit ou matériau à être incorporé dans un ouvrage déterminé, par consultation de documents de références de l'application considérée (NF-DTU, CPT, Avis Technique, ...).

EVALUATION TECHNIQUE

Ciment d'argile MCC1® pour béton Materrup Argiroc®

DEFINITION SUCCINCTE

Le ciment d'argile MCC1® est un liant à faible empreinte environnementale¹ en intégrant notamment de l'argile crue à la composition de son ciment. Le ciment d'argile MCC1® est destiné à la réalisation de bétons structuraux et non structuraux à partir de ressources locales et utilisées à proximité du lieu de production.

Le ciment d'argile MCC1® est un premix obtenu par mélange, dont les constituants principaux sont de l'argile crue non calcinée, un précurseur pouzzolanique, un activateur alcalin et un agent de mouture spécifique.

Le ciment d'argile MCC1® est un ciment, qui se distingue des ciments traditionnels par sa composition, présentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1 : Composition des ciments d'argile MCC1®

<i>Les % indiqués sont des pourcentages massiques</i>		Ciment d'argile MCC1®	Ciment conforme NF EN 197-1 ou EN 197-5
Constituants	Argile crue non calcinée	30 à 70%	Non couvert
	Précurseur pouzzolanique complémentaire	10 à 30%	-
	Activateur alcalin	20 à 50%	-
	Agent de mouture spécifique	0,2 à 1,5% de la masse d'argile	Couvert en tant qu'additif organique dans l'EN197-1 (paragraphe 5.5) avec une borne de 0,2% maximum en poids de ciment.

NF EN 197-1 (Avril 2012) : Ciment – Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants

NF EN 197-5 (Mai 2021) : Ciment – ciment Portland composé CEM II/C-M et ciment composé CEM VI

Les applications envisagées des bétons à base de ciment d'argile MCC1® sont les mêmes que celles d'un béton traditionnel. Les principales applications visées sont les suivantes :

- Superstructure : ouvrages coulés en place de type voiles, planchers en dalle pleine ;
- Infrastructures : fondations, semelles, massifs, longrines, radiers, murs enterrés...
- Dallage ;
- Bétons de propreté et de calage ;
- Préfabrication coulée ou moulée : notamment parpaings, éléments décoratifs intérieur et extérieur.

Rappel : l'ETPM porte uniquement sur les caractéristiques intrinsèques du produit et ne préjuge pas de l'aptitude à l'emploi du produit dans l'ouvrage. Les applications précisées ci-avant sont données à titre indicatif.

¹ Le ciment d'argile MCC1® présente un bilan carbone de 350 kgCO₂/T. Analyse de cycle de vie réalisée selon la norme NF EN 15804+A1 et son complément national NF EN 15804/CN. Ce document est disponible sur demande auprès de Materrup.

EVALUATION TECHNIQUE

Les propriétés du ciment MCC1® et des bétons ARGIROC® fabriqués à partir du ciment d'argile MCC1® présentées ci-après résultent principalement de l'analyse des résultats d'essais réalisés présentés au paragraphe E du Dossier Technique.

Préambule : l'ensemble des caractérisations de béton présentées ci-dessous proviennent d'une formulation de béton unique, décrite ci-dessous :

- Dosage en ciment 300 kg/m³,
- Volume de pâte cimentaire de 31%,
- Rapport $E_{eff}/C = 0,55$ avec des granulats de D_{max} 16 mm,
- Les granulats utilisés sont du sable 0/4 roulé alluvionnaire et des gravillons 4/16 roulés alluvionnaires (absorption : WA24 = 2,5%)
- Le G/S du squelette granulaire est de 1,57.

Caractéristiques mécaniques sur mortiers normalisés et sur béton

- Caractéristiques sur mortiers normalisés

Les résistances à la compression déterminées selon la norme NF EN 196-1 sur des éprouvettes de mortier normalisé sont données dans le **Tableau 17** du dossier technique. La formulation du mortier de référence déroge à la norme NF EN 196-1 par un ajustement de la quantité d'eau pour obtenir un $E/C = 0,4$ au lieu de 0,5.

Les valeurs moyennes sont de l'ordre de 20 MPa à 2 jours, de 34 MPa à 7 jours et de l'ordre de 48 MPa à 28 jours.

La classe de résistance, au sens de la norme NF EN 196-1, du ciment MCC1® peut être équivalente à 42,5 N.

- Caractéristiques mécaniques sur bétons

Des essais de résistance en compression (NF EN 12390-3), de mesure du module d'élasticité en compression (NF EN 12390-13) et de résistance en traction par fendage (NF EN 12390-6), ont été menées sur le béton à base de ciment d'argile MCC1®. Les résultats sont présentés dans le dossier technique tableaux 19 à 21.

Tableau 2 : Compression, traction par fendage et module sur béton d'argile MCC1® (éprouvettes conservées en eau à 20°C)

Formule	Age	Eprouvettes	Masse Vol. (kg/m ³)	Module d'élasticité E (MPa) (moyenne/écart type)	Résistance compression (MPa) (moyenne/écart type)	Résistance en traction par fendage (MPa) (moyenne/écart type)
Béton à base de d'argile MCC1® dosé à 300 kg/m ³ $E_{eff}/C = 0,55$	14 jours	Ø11x22 cm	2400	-	24,5 0,7	2,55 0,13
	28 jours	Ø11x22 cm	2380	24 000 200	29,5 0,3	2,95 0,20
	90 jours	Ø11x22 cm	2380	-	31,7 1,9	3,35 0,25

Avec un rapport E_{eff}/C de 0,5 ou moins, pour un dosage de 300kg/m³ le béton est de classe C25/30 au sens de l'Eurocode 2 (cf. tableau 3.1 de NF EN 1992-1-1).

Avec un rapport E_{eff}/C de 0,55, le béton est de classe de résistance C20/25, et par rapport aux caractéristiques de résistance d'un béton de classe C20/25 au sens de l'Eurocode 2 (cf. tableau 3.1 de NF EN 1992-1-1), la résistance en traction du béton Argiroc® est comparable ($f_{ctm} = 0,9 \cdot f_{ct,sp} = 0,9 \times 2,95$ MPa soit 2,66 MPa comparé à 2,6 MPa) mais présente un module d'élasticité légèrement plus faible ($E_{cm} = 24$ GPa contre 30 GPa).

La Figure 5 du dossier technique illustre l'impact du rapport E_{eff}/C sur la résistance en compression et la rhéologie d'un béton Argiroc® dosé à 300 kg/m³ de ciment MCC1®. Pour disposer d'un béton Argiroc® de classe C25/30 et dosé à 300 kg/m³, il convient de formuler celui-ci avec un E_{eff}/C inférieur à 0,5.

Variations dimensionnelles sur béton

Les variations dimensionnelles ont été déterminées conformément à la norme NF EN 12390-16 sur des éprouvettes de béton dont la formulation est indiquée au § E.3.1 du Dossier Technique. Les éprouvettes sont de dimensions 70 mm x 70 mm x 280 mm et conduisent aux résultats suivants.

Tableau 3 : Retrait sur béton Argiroc® avec ciment d'argile MCC1®

	Béton avec ciment d'argile MCC1® (début des mesures : 48 heures après fabrication)
Retrait endogène (conservation 20°C)	71 µm/m après 28 jours 85 µm/m après 217 jours
Retrait total (conservation 20°C et 50%HR)	895 µm/m après 28 jours 1100 µm/m après 217 jours

Pour un béton courant (béton Portland dosé à environ 300 kg/m³ de ciment), le retrait total est d'environ 600 µm/m après 6 mois et le retrait endogène est d'environ 100 à 150 µm/m.

Le ciment MCC1® présente un retrait de séchage, sur béton, plus élevé que celui d'un ciment Portland. A résistance équivalente, il convient ainsi de prendre en compte que le retrait total d'un béton à base de ciment MCC1® est le double de celui d'un béton à base de ciment Portland. Cependant, le retrait endogène d'un béton avec ciment MCC1® est du même ordre de grandeur que celui d'un béton à base de ciment Portland.

Comportement au fluage en compression sur béton

Des essais de fluage en compression d'une formulation de béton avec ciment d'argile MCC1® dont la formulation est indiquée au § E.3.1 du Dossier Technique ont été effectués. Les résultats sont présentés en Figure 7 du Dossier Technique.

Le fluage a été effectué à un niveau de chargement de 33% de la charge à rupture mesurée à 28 jours, soit 9,8 MPa.

Pour le béton d'argile MCC1®, les résultats des essais de fluage en compression montrent que la déformation totale sous chargement est la suivante :

- en mode dessiccation, après 191 jours (début des mesures : 28 jours) : 1721 µm/m
- en mode endogène, après 191 jours (début des mesures : 28 jours) : 604 µm/m

A titre d'information, les mesures effectuées sur le lot d'éprouvettes non chargées donnent les caractérisations suivantes :

- Retrait de dessiccation, après 191 jours de chargement (début des mesures : 28 jours): 733 µm/m
- Retrait endogène, après 191 jours de chargement (début des mesures : 28 jours): néant.

Les figures ci-après présentent la déformation de fluage sous chargement et le coefficient de fluage en compression des éprouvettes de béton.

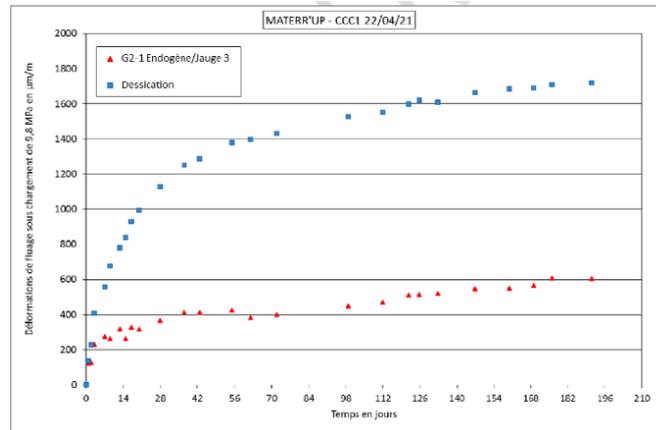


Figure 1 : Déformations de fluage sous chargement en mode endogène et en mode de dessiccation

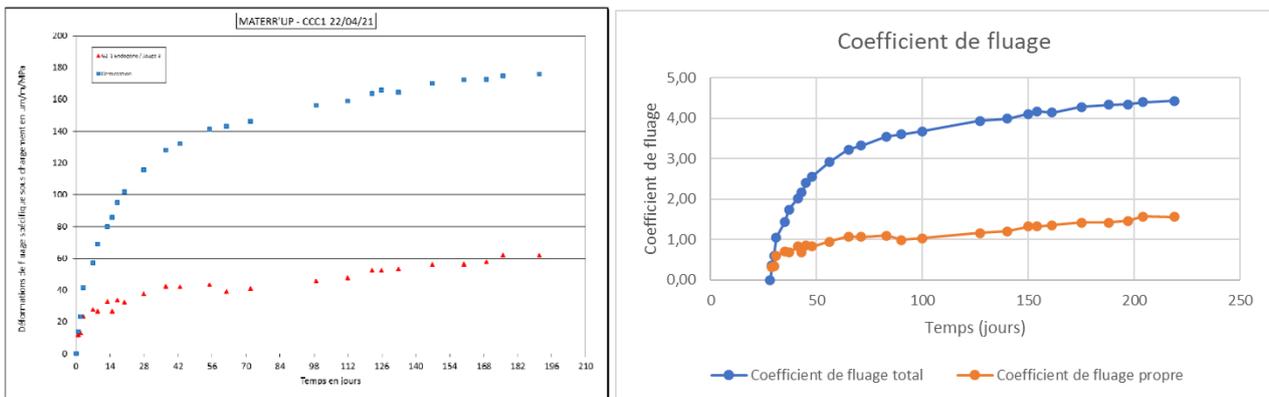


Figure 2 : Coefficient de fluage en mode endogène et en mode de dessiccation

18 Influence of cement and admixtures on creep

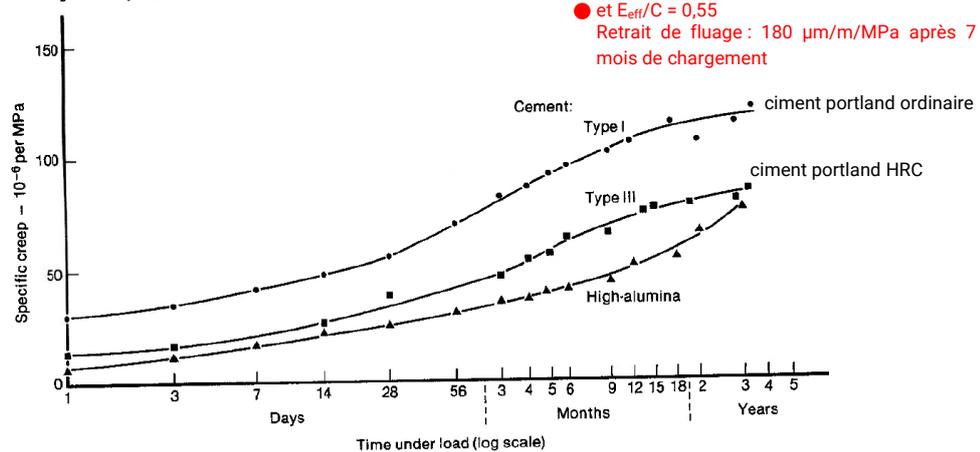


Fig. 3.1. Specific creep of concretes made with different cements, loaded at the age of 28 days.⁵

Figure 3 : Extrait Neville (properties of concrete, chap. 3) (bétons avec E/C = 0,55 et G/C = 0,55)

A titre d'exemple, pour un béton ordinaire à dosage en liant de 350 à 450 kg/m³, le fluage en compression est de l'ordre de 50 à 60 µm/m/MPa en mode endogène et de l'ordre de 110 à 120 µm/m/MPa en mode dessiccation.

Le fluage du béton à base de ciment MCC1® est plus important que celui d'un béton traditionnel. Nous pouvons considérer que le fluage d'un béton à base de ciment MCC1® est 1,5 fois plus élevé que celui d'un béton à base de

ciment Portland. Il convient de prendre en compte ce constat pour le dimensionnement des éléments de structure associés.

Adhérence béton-acier

Des essais d'adhérence entre armature acier HA12 et une formulation de béton Argiroc® avec ciment d'argile MCC1® ont été effectués. Les résultats sont présentés ci-dessous.

Tableau 4 : Adhérence entre les armatures et le béton Argiroc®

Type de ciment (dosage)	Résistance le jour d'essai (MPa) (série de 3 essais)	Contrainte d'adhérence acier / béton t (série de 5 essais)
Armature HA Ø12 mm		
Ciment d'argile MCC1® Dosage : 300 kg/m ³ et E _{eff} /C = 0,55	<u>Compression</u> f _c = 33,10 MPa à 28 j <u>Fendage</u> : f _{ct} = 2,95 MPa	t = 21,6 MPa

Ces valeurs sont représentatives des valeurs d'adhérence d'armature sur béton traditionnel de classe de résistance équivalente ou supérieure. A titre d'exemple, dans le Projet National Recybéton², des essais sur béton formulé à base de CEM II/ A-L 42,5N ont été réalisés sur différents types d'armatures et avec des granulats recyclés ou non. Les valeurs sont données dans le tableau ci-après. Les valeurs obtenues pour une armature HA12 et un ancrage de 5 fois le diamètre de l'armature sont de l'ordre de 15 à 18 MPa suivant la classe de résistance du béton (type C25 ou C35). Une autre référence³ donne des valeurs équivalentes sur armature HA Ø12 mm de 14,1 MPa également pour un béton formulé à base de CEM 42,5 de 28.6 MPa de résistance en compression (tableau 4 de la publication).

Tableau 5 : valeurs de référence sur l'adhérence entre armatures et béton à base de CEM II /42,5 A-L ; données issues du Projet National Recybéton (cf. référence précédente)

Tableau 7 – Contrainte ultime d'adhérence.

Contrainte ultime d'adhérence f _{bd} (MPa)					
Diamètre	HA10 (φ = 10 mm)		HA12 (φ = 12 mm)		EC2 d'après éq. (3)
	5φ	10φ	5φ	10φ	
C25-OR-OR	14,5 ± 1,2	13,2 ± 0,3	15,1 ± 1,3	11,9 ± 1,0	2,3 (13,3)*
C25-OR-100R	13,4 ⁽¹⁾	11,9 ± 0,4	14,2 ± 1,4	11,1 ± 0,4	2,3 (13,3)
C25-30R-30R	12,6 ⁽¹⁾	12,6 ± 1,5	12,3 ± 0,7	11,4 ± 0,5	2,3 (13,1)
C25-100R-100R	12,6 ± 2,0	12,4 ± 1,2	12,5 ± 0,3	11,6 ± 1,9	2,3 (13,0)
C35-OR-OR	14,5 ± 0,8	14,4 ± 0,3	17,4 ± 1,3	14,2 ± 0,2	3,0 (16,1)
C35-OR-100R	14,8 ± 1,2	13,6 ± 0,1	16,9 ± 0,8	14,0 ± 0,1	3,0 (15,3)
C35-30R-30R	14,6 ± 2,0	13,8 ± 0,1	16,2 ± 0,4	13,5 ± 1,1	3,0 (15,9)
C35-100R-100R	15,8 ± 1,6	13,6 ± 0,3	16,4 ± 0,4	14,2 ± 0,2	3,0 (14,8)

⁽¹⁾Une seule courbe était exploitable.

(*) Valeurs calculées sans considérer les coefficients de sécurité de l'EC2

² Rapport de recherche : Thème 2 Adhérence béton recyclé/armatures HA Auteurs : G. WARDEH – B. FIORIO E. GHORBEL – H. GOMART (L2MGC) – rapport de Septembre 2015

³ Marta Baena, Lluís Torres, Albert Turon, Cristina Barris - Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test - Composites: Part B 40 (2009) 784–797

Durabilité

La durabilité des bétons Argiroc® avec ciment MCC1® a été évaluée à partir d'essais en laboratoire. L'évaluation des résultats s'appuie sur du fascicule FD P18-480:2022 de justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle. Les deux méthodes, méthode performantielle absolue et méthode performantielle comparative, ont été utilisées.

Nous distinguons les essais de vieillissement naturel ou accéléré (vitesse de carbonatation, cycles de gel/dégel, ...), qui visent à reproduire les processus de dégradation physico-chimiques des bétons, et les essais de type « indicateur » (porosité accessible à l'eau, résistivité électrique, coefficient de diffusion des chlorures...).

Les risques de dégradation évalués sur la base de cette démarche sont :

- Risque de corrosion des aciers induites par carbonatation
- Risque de corrosion des aciers induites par les ions chlorures
- Risque de dégradation des bétons par le gel interne,
- Risque de dégradation par écaillage des bétons soumis au gel en présence des sels de déverglaçage.

Les Tableaux 5, 8 et 10, repris dans les paragraphes suivants, sont extraits du fascicule FD P18-480:2022. Ils présentent les seuils de performance sur la base des résultats d'essais en fonction des classes d'exposition.

Les tableaux 6, 9 et 11 sont mis en vis-à-vis des résultats des essais déterminés sur la formule de béton Argiroc® testée.

Préambule à l'évaluation de la durabilité des bétons Argiroc® par le fascicule FD P18-480:2022 :

Ce projet de norme, bien que destiné à favoriser l'innovation, s'applique uniquement à des bétons composés de constituants faisant l'objet d'une aptitude à l'emploi selon la norme NF EN 206/CN. Le ciment d'argile MCC1® ne fait pas, à ce jour, l'objet d'une aptitude à l'emploi selon la norme NF EN 206/CN. La démarche du projet de norme n'est pas applicable en l'état.

La méthode performantielle absolue s'applique ici uniquement aux résultats des essais de vieillissement naturel ou accéléré qui visent à reproduire les processus de dégradation physico-chimiques des bétons. Les valeurs mesurées au moyen de ces essais sont alors comparées aux valeurs seuils du projet de norme pour la détermination des classes d'environnement des bétons évalués.

Les retours d'expérience de l'évaluation de la durabilité des bétons d'argile Argiroc® au moyen des essais de type « indicateur » manquent. Les résultats déterminés au moyen de ces essais sont présentés dans les paragraphes suivants à titre informatif.

Risque de corrosion des aciers induites par carbonatation (classes d'exposition XC)

La justification performantielle définie dans le fascicule FD P18-480:2022 pour les classes d'exposition XC, est basée sur les résultats de l'un des deux essais suivants :

- carbonatation accélérée selon la norme XP P18-458 ;
- porosité accessible à l'eau selon la norme NF P18-459.

Le tableau ci-dessous présente les seuils de performance pour ces deux essais.

Tableau 6 : Vérification des seuils de performance (à 50 ans et 100 ans) selon FD P18-480

Classe d'exposition	Module selon la classe de résistivité à 90 j ($\Omega \cdot m$)	Vitesse caractéristique de carbonatation accélérée $V_{acc,90j}$ (mm/(jour) ^{0,5})		Porosité caractéristique accessible à l'eau / Fraction volumique de pâte $P_{eau,90j}/fV_p$ (%)	
		DUP 50 ans	DUP 100 ans	DUP 50 ans	DUP 100 ans
XC1	< 100	4	4	65%	65%
	100 à 175				
	> 175				
XC2	< 100	3	2,6	65%	60%
	100 à 175	3,5	3	65%	65%
	> 175				
XC3	< 100	1,8	1,8	50%	50%
	100 à 175	2,2		55%	
	> 175				
XC4	< 100	1,8	1,8	50%	50%
	100 à 175	2,2		55%	50%
	> 175	3		2,2	65%

Le tableau ci-après synthétise les résultats des mesures et des mesures affectées par la marge de sécurité (calcul décrit au §8 du fascicule FD P18-480:2022) des grandeurs après 90 jours de cure humide pour les différents bétons et comparés aux seuils du tableau précédent. Cette comparaison permet de définir les classes de durabilité des bétons pour le comportement vis-à-vis de la corrosion par carbonatation.

Tableau 7 : Grandeurs associées à la durabilité mesurées sur les différentes formulations de béton

Formulation béton		Module selon la classe de résistivité à 90 j ($\Omega \cdot m$)	Vitesse de carbonatation accélérée $V_{acc,90j}$ (mm/(jour) ^{0,5})	Porosité accessible à l'eau / Fraction volumique de pâte $P_{eau,90j}/fV_p$ (%)	Classe exposition justifiée pour une DUP 50 ans	Classe d'exposition justifiée pour une DUP 100 ans
Bétons à base de ciment d'argile MCC1®	Dosage 300 kg/m ³ , granulats absorption ≤ 2,5%	non mesuré (hypothèse < 100)	Moyenne : 1,1 Corrigée : 1,4	Moyenne : 44% Corrigée : 46%	XC1, XC2, XC3 et XC4	XC1, XC2, XC3 et XC4

Note : les essais de carbonatation accélérée ont été réalisés selon la norme NF EN 12390-12 avec une teneur en CO₂ de 1% au lieu de 3% afin de limiter le « caractère accéléré » de cet essai et les interactions possibles avec un liant innovant. Cette dérogation par rapport au protocole spécifié dans le fascicule FD P18-480 :2022 (norme XP P18-458 avec une carbonatation accélérée avec une teneur en CO₂ de 3%) ne nous permet pas d'utiliser ce critère de vitesse de carbonatation accélérée $V_{acc,90j}$ comme critère d'évaluation.

En complément de ces essais de carbonatation, la **Figure 4** ci-après permet la comparaison des valeurs obtenues avec des références formulées à partir de bétons à base de ciments conventionnels (bétons formulés avec des ciments dosés à 280 kg/m³ et un E/C de 0.65)⁴.

⁴ Voir les références suivantes pour plus de précisions :

- Leemann et Moro - 2017 - Carbonation of concrete- the role of CO₂ concentration, relative humidity and CO₂ buffer capacity
- Gluth et al - 2020 - RILEM TC 247-DTA round robin test- Carbonation and chloride penetration testing of alkali-activated concretes

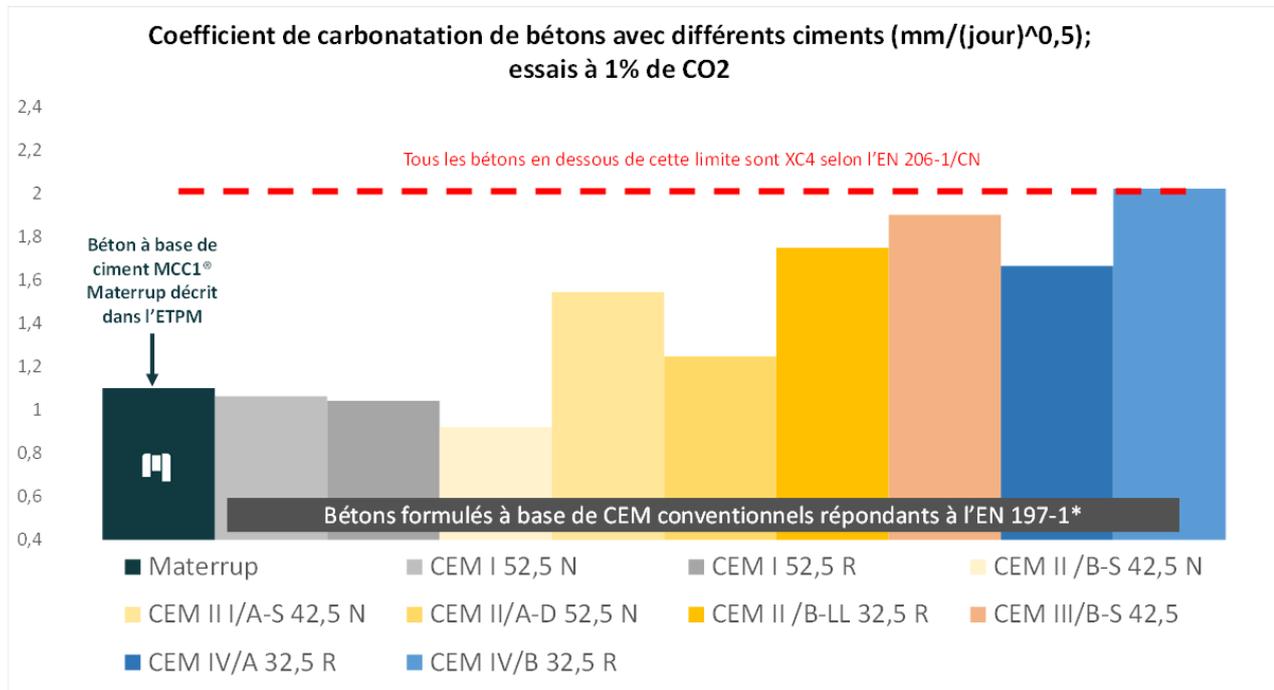


Figure 4 : comparaison de coefficients de carbonatation avec différents ciments et une teneur en CO2 de 1%.

A titre indicatif le pH mesuré sur les bétons Materrup à base de MCC1® se situe autour de 12,7.

Des dérivées en composition peuvent être considérées comme satisfaisant aux mêmes exigences, sous réserve de respecter les critères suivants :

- Granulats de même nature et ayant une absorption d'eau inférieure ou égale (\leq)
- Même nature de ciment et dosage à minima équivalent (\geq)
- Rapport E_{eff}/C à minima équivalent (\leq)
- Une durée d'utilisation de projet (DUP) équivalente

Le tableau ci-dessous, synthétise les critères à respecter (dosage en liant minimum et rapport E_{ff}/C maximal) pour les formulations dérivées justifiant les différentes classes XC.

Tableau 8 : Compositions minimales justifiant les classes d'exposition XC

		DPU 50 ans				DPU 100 ans			
		XC1	XC2	XC3	XC4	XC1	XC2	XC3	XC4
Granulats avec une absorption $\leq 2,5\%$	Dosage en liant mini	300	300	300	300	300	300	300	300
	E_{ff}/C maxi	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55

Risque de corrosion des aciers induites par les ions chlorures de l'eau de mer des bétons à base de d'argile MCC1® (classes d'exposition XS)

La justification performantielle définie dans le fascicule FD P18-480:2022 pour les classes d'exposition XS, est basée sur les résultats de l'essai suivant :

- d'essais de migration des chlorures selon la norme XP P 18-462.

Le tableau ci-dessous présente les seuils de performance pour cet essai.

Tableau 9 : Vérification des seuils de performance (à 50 ans et 100 ans) selon prFD P18-480

Classe d'exposition	Modulation selon la classe de facteur de vieillissement	Coefficient caractéristique de migration des ions chlorures $D_{cm,90}$ ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	
		DUP 50 ans	DUP 100 ans
XS1	0,30 à 0,39	16 (28*)	9 (16*)
	0,40 à 0,49	28	22
	0,50 à 0,59		
	0,60 et plus		
XS2	0,30 à 0,39	5 (9*)	3 (5*)
	0,40 à 0,49	9	5
	0,50 à 0,59	16	9
	0,60 et plus		
XS3e (zone de marnage ou de projection)	0,30 à 0,39	5	5
	0,40 à 0,49	9	9
	0,50 à 0,59	16	16
	0,60 et plus	22	22
XS3m (zone exposée aux embruns)	0,30 à 0,39	2	2
	0,40 à 0,49	3	3
	0,50 à 0,59	5	5
	0,60 et plus	9	9

Le tableau ci-après synthétise les résultats des mesures des grandeurs après 90 jours de cure humide pour les différents bétons et comparés aux seuils du tableau précédent. Cette comparaison permet de définir les classes de durabilité des bétons pour le comportement vis-à-vis de la corrosion par les chlorures de l'eau de mer.

Tableau 10 : Grandeurs associées à la durabilité mesurées sur les différentes formulations de béton

Formulation béton		Facteur de vieillissement	Coefficient caractéristique de migration des ions chlorures $D_{cm,90}$ ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Classe exposition justifiée pour une DUP 50 ans	Classe d'exposition justifiée pour une DUP 100 ans
Bétons à base de d'argile MCC1®	Dosage 300 kg/m ³ , granulats absorption $\leq 2,5\%$	inconnu pris < 0,3 (cas le plus défavorable)	Moyenne : 7,9 Corrigée : 10,3	Sera évaluée après la réalisation des essais selon la norme NF EN 12390-11	

L'évaluation a été effectuée par l'approche absolue (coefficient de migration des ions chlorures). Le coefficient de migration des ions chlorures des bétons à base de ciment MCC1® est en dessous du seuil pour justifier de la classe XS1 (unique classe d'exposition vérifiée pour une DUP de 50 ans).

Néanmoins, l'essai de migration des ions chlorure en régime non stationnaire XP P 18-459 étant un essai accéléré, l'évaluation du risque de corrosion sera réalisée sur la base d'un essai plus proche d'un vieillissement naturel (essais comparatifs menés selon la norme d'essais NF EN 12390-11). La satisfaction aux classes XS ne sera validée qu'à l'issue de cette campagne d'essais complémentaires (durée 6 à 7 mois). Ces conclusions sont données à titre indicatif.

Risque de corrosion des aciers induites par les ions chlorures autres que ceux de l'eau de mer des bétons à base de d'argile MCC1® (classes d'environnement XD)

La justification performantielle définie dans le fascicule FD P18-480:2022 pour les classes d'exposition XS, est basée sur les résultats de l'essai suivant :

- d'essais de migration des chlorures selon la norme XP P 18-462.

Le tableau ci-dessous présente les seuils de performance pour cet essai.

Tableau 11 : Vérification des seuils de performance (à 50 ans et 100 ans) selon FD P18-480:2022

Classe d'exposition	Modulation selon la classe de facteur de vieillissement	Coefficient caractéristique de migration des ions chlorures $D_{rem,90j}$ ($\times 10^{-12} m^2/s$)	
		DUP 50 ans	DUP 100 ans
XD1	0,30 à 0,39	16 (28*)	16 (22*)
	0,40 à 0,49	28	28
	0,50 à 0,59		
	0,60 et plus		
XD2	0,30 à 0,39	9	9
	0,40 à 0,49	16	16
	0,50 à 0,59	22	22
	0,60 et plus		
XD3f (salage fréquent)	0,30 à 0,39	9	9
	0,40 à 0,49	16	16
	0,50 à 0,59	22	22
	0,60 et plus		
XD3tf (salage très fréquent)	0,30 à 0,39	5	5
	0,40 à 0,49	9	9
	0,50 à 0,59	16	16
	0,60 et plus		

Le tableau ci-après synthétise les résultats des mesures des grandeurs après 90 jours de cure humide pour les différents bétons et comparés aux seuils du tableau précédent. Cette comparaison permet de définir les classes de durabilité des bétons pour le comportement vis-à-vis de la corrosion par les chlorures autres que ceux de l'eau de mer.

Tableau 12 : Grandeurs associées à la durabilité mesurées sur les différentes formulations de béton

Formulation béton		Facteur de vieillissement	Coefficient caractéristique de migration des ions chlorures $D_{rem,90j}$ ($\times 10^{-12} m^2/s$)	Classe exposition justifiée pour une DUP 50 ans	Classe d'exposition justifiée pour une DUP 100 ans
Bétons à base de d'argile MCC1®	Dosage 300 kg/m ³ , granulats absorption $\leq 2,5\%$	inconnu pris < 0,3 (cas le plus défavorable)	Moyenne : 7,9 Corrigée : 10,3	Sera évaluée après la réalisation des essais selon la norme NF EN 12390-11	

L'évaluation a été effectuée par l'approche absolue (coefficient de migration des ions chlorures). Le coefficient de migration des ions chlorures des bétons à base de ciment MCC1® est en dessous du seuil pour justifier de la classe XD1 (unique classe d'exposition vérifiée pour une DUP de 50 ans).

Néanmoins, l'essai de migration des ions chlorure en régime non stationnaire XP P 18-459 étant un essai accéléré, l'évaluation du risque de corrosion sera réalisée sur la base d'un essai plus proche d'un vieillissement naturel (essais comparatifs menés selon la norme d'essais NF EN 12390-11). La satisfaction aux classes XD ne sera validée qu'à l'issue de cette campagne d'essais complémentaires (durée 6 à 7 mois). Ces conclusions sont données à titre indicatif.

Risque de dégradation par le gel interne et par l'écaillage des bétons soumis au gel en présence des sels de déverglaçage (classes d'environnement XF).

Les essais de résistance au gel modéré par cycles de gel dans l'air/dégel dans l'eau sont présentés **Tableau 26** et **Figure 12** du dossier technique.

A ce jour, seule la formulation de béton Argiroc®, dosé à 300 kg/m³ de ciment MCC1®, avec un E_{eff}/C de 0,45 et une utilisation d'entraineur d'air présentant 6% d'air occlus, a justifié l'essai de gel interne NF P 18-425 et validant ainsi la classe d'environnement XF3 (et de fait XF1).

Au sens du fascicule FD P18-480 §7.6, la justification de l'utilisation des bétons Argiroc® pour la classe d'exposition XF1 peut être réalisée sur la base d'une approche performantielle en se ramenant aux exigences définies pour la classe d'exposition XC4.

De même, selon le fascicule FD P18-480 §7.6, la justification de l'utilisation des bétons pour la classe d'exposition XF2 pour des pièces peu exposées au risque d'écaillage, peut être réalisée sur la base d'une approche performantielle en se ramenant aux exigences définies pour la classe d'exposition XD3f. Comme précisé précédemment, cette approche performantielle ne peut être employée qu'après justification du bon comportement du béton Argiroc® avec un protocole d'essai dit naturel en lieu et place de l'essai de migration des ions chlorures (des essais comparatifs seront menés selon la norme d'essais NF EN 12390-11).

Enfin, des dérivées en composition peuvent être considérées comme satisfaisant aux mêmes exigences, sous réserve de respecter les critères suivants :

- Même structure de squelette granulaire ;
- Granulats de même nature et ayant une absorption d'eau inférieure ou égale (\leq)
- Même nature de ciment et dosage à minima équivalent (\geq)
- Rapport E_{ff}/C à minima équivalent (\leq)
- En cas d'utilisation d'adjuvant : même adjuvant
- Une résistance en compression à 28 jours à minima équivalent (\geq)
- Une masse volumique normale au sens de la NF EN 206/CN
- Si exigée, une teneur en air occlus à minima équivalent (\geq) et un facteur d'espacement des bulles d'air à minima équivalent (\leq)
- Une classe de consistance S3 ou S4
- Une durée d'utilisation de projet (DUP) équivalente

Résistance aux attaques acides et sulfatiques

Les essais de résistance aux attaques acides sont présentés **Figure 10** du dossier technique.

Les essais de résistance aux attaques sulfatique sont présentés **Figure 11** du dossier technique.

La mesure de variation de module d'élasticité dynamique est un indicateur d'évolution des caractéristiques mécaniques du matériau (résistance en compression, module d'élasticité).

Les essais de résistance à l'attaque acide montrent que le comportement sur mortier à base de ciment MCC1® est proche de celui d'un mortier à base de ciment Portland.

Tableau 13 : Résistance à l'attaque acide

	Mortier avec ciment MCC1®	Mortier avec ciment Portland
Attaque acide (HNO ₃ , solution pH 5,0)	Après 15 semaines d'immersion : Pas de variation massique Pas de variation dimensionnelle Peu de variation fréquence de résonnance	Après 15 semaines d'immersion : Pas de variation massique Pas de variation dimensionnelle Peu de variation fréquence de résonnance

Les essais de résistance à l'attaque sulfatique montrent que le comportement sur mortier à base de ciment MCC1® est similaire à celui d'un mortier à base de ciment Portland.

Tableau 14 : Résistance à l'attaque sulfatique

	Mortier avec ciment MCC1®	Mortier avec ciment Portland
Attaque sulfatique (NaSO ₄ à 50 g/l)	Après 15 semaines d'immersion : Pas de variation massique Variation dimensionnelle < 0,01% Variation fréquence de résonnance +1%	Après 15 semaines d'immersion : Pas de variation massique Variation dimensionnelle 0,01% Pas de variation fréquence de résonnance

Réaction au feu

Du fait du caractère innovant de ce matériau, le classement de réaction au feu doit être justifié par un procès-verbal de classement de réaction au feu.

Sécurité d'utilisation

Le ciment d'argile MCC1® fait l'objet d'une fiche de sécurité type FDS.

Environnement

Le béton à base de ciment d'argile MCC1® fait l'objet de fiches FDS.

De la même façon qu'un ciment Portland, il est nécessaire, lorsque l'on manipule les ciments Argiroc® ou mortiers/bétons à base de ciments Argiroc®, de porter des équipements de protection individuels lors de l'utilisation (gants, bottes, lunettes, casque).

CONDITIONNEMENT DU CIMENT MCC1®

Pour le conditionnement à sec des ciments MCC1® en big-bag ou en vrac, le stockage est effectué à l'abri de l'humidité.

L'aptitude de conditionnement en sac du ciment MCC1® n'étant pas visée dans la présente ETPM, pour un conditionnement en sac, une évaluation de la sensibilité à l'humidité et une évaluation de la durée de conservation devra être réalisée.

CONTROLES

La fabrication doit faire l'objet d'un contrôle portant sur la régularité de la fabrication. Les contrôles à réaliser sont décrits à l'article B du Dossier Technique et en annexe 1.

CONCLUSIONS

Appréciation globale

L'évaluation du ciment MCC1® met en évidence les points suivants :

- Vis-à-vis des propriétés mécaniques : le ciment MCC1® présente une résistance mécanique sur mortier normalisé, de 19 MPa à 2 jours, 34 MPa à 7 jours et de 48 MPa à 28 jours en compression représentatives d'une classe de résistance 42,5 N (sur formulation adaptée de mortier normalisé NF EN 196-1).
Sur béton, avec un rapport E_{eff}/C de 0,5 ou moins, pour un dosage de 300kg/m³ le béton est de classe C25/30 au sens de l'Eurocode 2 (cf. tableau 3.1 de NF EN 1992-1-1).
Avec un rapport E_{eff}/C de 0,55, le béton est de classe de résistance C20/25, et par rapport aux caractéristiques de résistance d'un béton de classe C20/25 au sens de l'Eurocode 2 (cf. tableau 3.1 de NF

EN 1992-1-1), la résistance en traction du béton Argiroc® est comparable ($f_{ctm} = 0,9 \cdot f_{ct,sp} = 0,9 \times 2,95$ MPa soit 2,66 MPa comparé à 2,6 MPa) mais présente un module d'élasticité légèrement plus faible ($E_{cm} = 24$ GPa contre 30 GPa).

- Vis-à-vis du retrait : le ciment MCC1® présente un retrait de séchage, sur béton, plus élevés que ceux d'un ciment Portland. A résistance équivalente, il convient ainsi de prendre en compte que le retrait total d'un béton à base de ciment MCC1® est le double de celui d'un béton à base de ciment Portland. Par contre, le retrait endogène d'un béton avec ciment MCC1® est du même ordre de grandeur que celui d'un béton à base de ciment Portland.
- Vis-à-vis du fluage : le fluage du béton à base de ciment MCC1® est plus important que celui d'un béton traditionnel. Il convient de prendre en compte ce constat pour le dimensionnement des éléments de structure associés. Nous pouvons considérer que fluage d'un béton à base de ciment MCC1® est 1,5 fois plus élevé celui d'un béton à base de ciment Portland.
- Vis-à-vis de l'adhérence acier/béton : des essais d'adhérence des aciers dans le béton à base de ciment MCC1® montrent que l'adhérence est du même ordre de grandeur que celle d'un béton traditionnel.
- Vis-à-vis du risque de corrosion des aciers induites par carbonatation (classes d'exposition XC) : L'évaluation a été effectuée par une double approche : approche absolue (vitesse de carbonatation et porosité à l'eau) et approche comparative.

La vitesse de carbonatation des bétons à base de ciment MCC1® est en dessous du seuil le plus faible demandé. Les classes d'exposition XC justifiées sont données dans le [Tableau 7](#).

Pour une durée d'utilisation de 50 ans, l'ensemble des formulations de béton à base de ciment MCC1® répondent aux classes XC1, XC2, XC3 et XC4. Pour les durées d'utilisation de 100 ans, les classes d'exposition justifiées sont, de la même façon, présentées dans le [Tableau 8](#)

Enfin, la satisfaction aux classes d'exposition XC n'est valable qu'aux formulations ayant fait l'objet de cette démarche d'évaluation ou à des formulations équivalentes au sens du fascicule prFD P18-480.

- Vis-à-vis du risque de corrosion des aciers induites par les ions chlorures de l'eau de mer des bétons à base de MCC1® (classes d'exposition XS) : L'évaluation a été effectuée par l'approche absolue (coefficient de migration des ions chlorures). Le coefficient de migration des ions chlorures des bétons à base de ciment MCC1® est en dessous du seuil pour justifier de la classe XS1.

Néanmoins, l'essai de migration des ions chlorure en régime non stationnaire XP P 18-459 étant un essai accéléré, l'évaluation du risque de corrosion sera réalisée sur la base d'un essai plus proche d'un vieillissement naturel (essais comparatifs menés selon la norme d'essais NF EN 12390-11). **La satisfaction aux classes XS ne sera validée qu'à l'issue de cette campagne d'essais complémentaires (durée 6 à 7 mois).**

Ces conclusions sont données à titre indicatif.

- Vis-à-vis du risque de corrosion des aciers induites par les ions chlorures autres que ceux de l'eau de mer des bétons à base de MCC1® (classes d'environnement XD) : L'évaluation a été effectuée par l'approche absolue (coefficient de migration des ions chlorures). Le coefficient de migration des ions chlorures des bétons à base de ciment MCC1® est en dessous du seuil pour justifier de la classe XD1.

Néanmoins, l'essai de migration des ions chlorure en régime non stationnaire XP P 18-459 étant un essai accéléré, l'évaluation du risque de corrosion sera réalisée sur la base d'un essai plus proche d'un vieillissement naturel (essais comparatifs menés selon la norme d'essais NF EN 12390-11). **La satisfaction aux classes XD ne sera validée qu'à l'issue de cette campagne d'essais complémentaires (durée 6 à 7 mois).**

Ces conclusions sont données à titre indicatif.

- Vis-à-vis du risque de dégradation par le gel interne et par l'écaillage des bétons soumis au gel en présence des sels de déverglaçage (classes d'environnement XF): Afin de garantir la satisfaction aux classes d'environnement de résistance au gel, le béton à base de ciment MCC1® devra disposer d'une formulation adaptée.

Seule la formulation de béton Argiroc®, dosé à 300 kg/m³ de ciment MCC1®, avec un E_{eff}/C de 0,45 et une utilisation d'entraineur d'air présentant 6% d'air occlus, a justifié l'essai de gel interne NF P 18-425 et validant ainsi la classe d'environnement XF3 (et de fait XF1).

Néanmoins, au sens du fascicule prFD P18-480 §7.6, la classe d'exposition XF1 peut être validée en approche performantielle sur la base des exigences requises pour la classe XC4.

- Les essais comparatifs d'attaques sulfatiques montrent un comportement équivalent du mortier à base de ciment MCC1® par rapport à un ciment Portland.
- Les essais comparatifs d'attaques acides montrent un comportement équivalent du mortier à base de ciment MCC1® par rapport à un ciment Portland.

Les risques de dégradation suivants n'ont pas été étudiés dans la présente évaluation :

- L'alcali-réaction : aucune justification n'ayant été apportée sur les phénomènes d'alcali-réaction, il convient d'utiliser des granulats non alcali-réactif en combinaison avec le ciment MCC1®;
- L'impact du traitement thermique à jeune âge des pièces en béton MCC1® sur les propriétés du matériau.
- L'impact à long terme de l'exposition à des températures importantes sur les propriétés mécaniques du matériau (par exemple, façades exposées au sud en été).

Validité : 5 ans

Validité jusqu'au : 2 juin.2027

Direction Sécurité, Structures et Feu
La Directrice

Valérie GOURVES

DOSSIER TECHNIQUE ETABLI PAR LE DEMANDEUR

A. INTRODUCTION

La société Materrup fabrique des ciments à très faible empreinte environnementale en intégrant notamment de l'argile crue⁵ à la composition de son ciment. Le ciment d'argile MCC1® (Materrup Clay Cement 1®) se distingue des ciments traditionnels⁶ par sa composition à base d'argile crue, issue de ressources locales et utilisée à proximité du lieu de production.

Le ciment d'argile MCC1® répond au besoin de nombreuses applications : voile, dallage, dalle, prémur, bloc/parpaings, éléments préfabriqués divers. Il se substitue donc aux ciments conventionnels pour la fabrication de bétons, structurels ou non, que ce soit le prêt à l'emploi ou le préfabriqué.

Le ciment d'argile MCC1® se présente sous une forme similaire à celle d'un ciment conventionnel c'est-à-dire en poudre pouvant être stockée en sacs, en big-bags ou encore dans des silos, placée dans un malaxeur par bande transporteuse ou vis et transportée de l'usine de fabrication de Saint-Geours de Marenne vers les centrales à béton ou site de préfabrication par camion-citerne (vrac) ou camion plateau (sacs et big-bags).

La présente Evaluation Technique porte sur le ciment d'argile MCC1® et une formulation de béton Argiroc® à partir du ciment d'argile MCC1®. Après coulage, le béton Argiroc® ne nécessite pas de traitement thermique⁷ particulier.

B. FABRICATION DU CIMENT D'ARGILE MCC1®

1. Matières premières

Les matières premières constituant le ciment d'argile MCC1® sont les suivantes :

- Argile crue non calcinée
- Précurseur pouzzolanique complémentaire
- Activateur alcalin

Ainsi qu'un :

- Agent de mouture spécifique

Le dosage des constituants pour la formulation du ciment d'argile MCC1® est unique et a été communiquée au CSTB. Ce ciment se présente sous la forme d'une poudre de couleur beige.

La sélection des argiles et la vérification de leur homogénéité (minéralogie, granulométrie, composition chimique etc.) est réalisée en amont par Materrup. Les argiles utilisées pour formuler le ciment MCC1® sont issues de carrières et correspondent à des argiles non valorisées par d'autres industriels (terre cuite notamment). A terme, l'objectif de Materrup est de valoriser directement des argiles issues de terres d'excavation (par exemple métro Parisien), ceci dit cela implique des niveaux de complexité dans la gestion des stocks et la constance de la qualité du produit qui sont importants. Ainsi, dans le cadre de la présente ETPM, seules des argiles issues de stocks bien qualifiés sont utilisées pour formuler le ciment MCC1®. L'argile est séchée et broyée selon un procédé spécifique

⁵ Argile crue = argile non calcinée, c'est-à-dire n'ayant pas subi de traitement thermique au-dessus de 200°C.

⁶ Portland et autres ciments composés selon l'EN 197-1

⁷ Le traitement thermique des bétons Argiroc n'étant pas nécessaire pour les applications visées, des essais seront réalisés dans le cadre de nouvelles applications (préfabrication avec double rotation journalière ou encore précontrainte par exemple).

avant d'être utilisée dans le ciment d'argile MCC1®. Les caractéristiques de l'argile sont contrôlées et ont été communiquées au CSTB.

2. Fabrication

Le ciment d'argile MCC1® est fabriqué par mélange des poudres constitutives dans un mélangeur de poudres d'une capacité de 2000L. Les différents constituants sont stockés soit dans des silos soit en big-bags.

Les tolérances de mesure sur les différents composants sont indiquées dans le plan de contrôle qualité disponible en annexe (cf. Annexe 1).

3. Contrôles

Le plan de contrôle qualité sur le ciment d'argile MCC1® est détaillé en annexe (cf. Annexe 1).

Les contrôles sont réalisés sur :

- Le ciment d'argile MCC1® fabriqué via :
 - Une analyse de composition des produits finis notamment à l'aide de la fluorescence X,
 - Une analyse des performances par comparaison des performances du produit fini de référence selon la norme NF EN 197-1 (en routine mesure des résistances en compression sur mortier selon un mode opératoire découlant de la norme NF EN 196-1).
- Les matières premières selon leur nature :
 - Argile :
 - Granulométrie,
 - pH,
 - Teneur en eau.
 - Précurseur pouzzolanique complémentaire et activateur alcalin :
 - Fluorescence X,
 - Surface Blaine selon NF EN 196-6,
 - Masse volumique,
 - Teneur en eau,
 - Essais mécaniques sur mortier de référence.
 - Agent de mouture :
 - Nature chimique par spectroscopie infrarouge (FTIR),
 - Distribution des masses molaires par chromatographie à perméation de gel.

4. Conditionnement et livraisons

Le conditionnement à sec du ciment d'argile MCC1® peut être en sac, en big-bag ou en vrac. Pour le conditionnement en sac, ces derniers sont disposés sur une palette houscée stockée dans une zone couverte à l'abri de l'humidité.

Les sacs et big-bags sont transportés vers leur lieu de livraison par camion plateau. Le ciment d'argile MCC1® vrac est transporté par camion-citerne.

C. FABRICATION DU BETON MATERRUP ARGIROC®

1. Centres de fabrication

Introduction

Le ciment d'argile MCC1® est utilisé comme un ciment conventionnel dans la composition des bétons Argiroc® fabriqués à partir de centrales à béton dans des unités de :

- Préfabrication
- Bétons prêts à l'emploi

Descriptif de la centrale

La Centrale à béton doit être équipée :

- De silos de stockage à ciment ;
- De cases à granulats ;
- De pompes à adjuvants ;
- D'un malaxeur ;
- Des systèmes de transfert de la matière (vis, skip de chargement etc.)

Equipements nécessaires

La centrale à béton doit être équipée d'un automate pour gérer les ordres d'introduction des constituants, leurs pesées, le temps et l'énergie de malaxage.

2. Compositions

Le béton Argiroc® est préparé par mélange des constituants suivants :

- Ciment d'argile MCC1® ;
- Granulats ;
- Eau
- Eventuellement des adjuvants tels que : entraîneur d'air, accélérateur, retardateur, agent rhéologique...

Les dosages en ciment d'argile MCC1® pour la fabrication de béton Argiroc® peuvent varier selon les performances mécaniques et la consistance béton recherchées entre 250 kg/m³ et 400 kg/m³.

Materrup s'engage à mettre à disposition de ses clients et partenaires son service assistance technique, ses capacités d'innovation ainsi que son laboratoire qualité pour accompagner ces derniers dans la mise au point de leur formulation béton.

Pour des rapports E/C (eau sur ciment d'argile) au-delà de 0,55, la quantité d'eau ajoutée est considérée comme trop importante : cette dernière vient modifier et perturber les équilibres chimiques ainsi que les cinétiques de prises. Il n'est donc pas préconisé de travailler au-delà du seuil de 0,55 (la plage préconisée est E/C = 0,4 à 0,55).

D. APPLICATIONS VISEES

Les applications envisagées des bétons à base de ciment d'argile MCC1® sont les mêmes que celles d'un béton traditionnel.

Les principales sont les suivantes :

- Plancher
- Voile
- Dallage
- Radier
- Fondation superficielle.
- Eléments préfabriqués structuraux : parpaings, produits pressés et/ou moulés
- Eléments préfabriqués d'aménagement : éléments décoratifs intérieur et extérieur, produits pressés et/ou moulés
- Bétons de propreté et de calage

E. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Note générale :

Les résultats expérimentaux ci-dessous sont issus de plusieurs campagnes d'essais sur le ciment d'argile MCC1®, des mortiers normalisés à base de ciment d'argile MCC1® ainsi que des bétons Argiroc® à base de ciment d'argile MCC1®.

1. Caractérisation du ciment d'argile MCC1®

Les essais de caractérisation du ciment d'argile MCC1® ont été réalisés au LERM.SETEC [1] sur un échantillon représentatif de la production courante. Le liant provient d'un unique lot de fabrication de 20 kg. Les essais ont été réalisés après 4 à 5 semaines de stockage.

Bien que la composition du ciment d'argile MCC1® n'entre pas dans les spécifications de la norme EN 197-1, les essais de caractérisation ont été réalisés suivant cette norme. Le ciment conventionnel se rapprochant le plus du ciment d'argile MCC1® étant le CEM V, les exigences le concernant ont été utilisées afin d'évaluer le ciment d'argile MCC1® dans une logique d'approche performantielle. De plus, le ciment d'argile MCC1® se situe dans la classe de résistance 42,5 N et suit donc les exigences propres à cette classe de résistance. Les principales caractéristiques sont présentées dans le [Tableau 15](#) ci-dessous. Des essais supplémentaires ont été réalisés, à titre informatif, dont les résultats sont présentés dans le [Tableau 16](#).

Tableau 15 : Tableau de synthèse de la caractérisation du ciment MCC1® selon les exigences de la norme harmonisée NF EN 197-1 pour un ciment composé CEM V

Caractéristiques	Référence norme essai	Valeur pour le ciment d'argile MCC1®	Exigences norme harmonisée NF EN 197-1 pour une classe de résistance 42,5 N
Résistance à la compression à court terme (à 2 jours)	NF EN 196-1 (dérogation au référentiel d'essai : rapport E/C=0,4)	19,7 MPa	≥ 10 MPa
Résistance à la compression courante (à 28 jours)	NF EN 196-1 (dérogation au référentiel d'essai : rapport E/C=0,4)	48,2 MPa	≥ 42,5 MPa et ≤ 62,5 MPa
Temps de début de prise	NF EN 196-3	380 min	≥ 60 min
Stabilité (expansion)	NF EN 196-3	1 mm	≤ 10 mm
Teneur en sulfate	NF EN 196-2	1,74%	≤ 3,5 %
Teneur en chlorure	NF EN 196-2	0,01%	≤ 0,10 %
Chaleur d'hydratation à 41 heures	NF EN 196-9	212 J/g	≤ 270 J/g pour un ciment à faible chaleur d'hydratation

Tableau 16 : Tableau de synthèse de la caractérisation du ciment MCC1® à valeur informative

Caractéristiques	Référence norme essai	Valeur pour le ciment d'argile MCC1®
Masse volumique	NF EN 196-6	2,84 g/cm ³
Finesse (surface spécifique Blaine)	NF EN 196-6	5060 cm ² /g
Consistance normalisée	NF EN 196-3	21,5 %

2. Caractérisation d'un mortier de ciment d'argile MCC1®

2.1. Fabrication du mortier de ciment d'argile MCC1®

Le mortier est formulé à partir de ciment d'argile MCC1® et de sable normal, avec 25% de liant et 75% de sable en masse. Le E/C utilisé avec le ciment d'argile MCC1® est de 0,4 afin d'obtenir une rhéologie équivalente à celle d'un mortier normal réalisé à E/C 0,5 avec du CEM conventionnel.

Pour une gâchée pour trois éprouvettes cela correspond donc à (450 ± 2) g de ciment d'argile MCC1®, (1350 ± 5) g de sable normalisé CEN et (180 ± 1) g d'eau, en s'inspirant de la norme NF EN 196-1.

A titre indicatif, dans le cadre d'essais réalisés au sein du laboratoire R&D Materrup sur un mortier de même formulation, le diamètre d'étalement obtenu à la table à secousses selon la norme d'essai NF EN 1015-3 est de 226 mm.

2.2. Résistance à la compression sur mortier

Les essais de résistance à la compression sur mortier ont été réalisés au LERM.SETEC [1].

Les essais ont été conduit sur des mortiers confectionnés tel que décrit dans le paragraphe 2.1, en s'inspirant de la norme NF EN 196-1 avec le ciment d'argile MCC1®. A noter que le E/C utilisé a été fixé à 0,4. Les mortiers sont conditionnés avec une cure en eau à 20°C. Les résultats sont indiqués dans le [Tableau 17](#).

Tableau 17 : Résultats des essais de résistance mécanique sur mortier

Age de l'éprouvette	Résistance en compression (Série de 6 essais)		Résistance en flexion (Série de 3 essais)	
	Valeur moyenne	Ecart type	Valeur moyenne	Ecart type
2 jours	19,7 MPa	0,2 MPa	4,5 MPa	0,4 MPa
7 jours	33,9 MPa	0,3 MPa	5,4 MPa	0,2 MPa
28 jours	48,2 MPa	0,4 MPa	7,5 MPa	0,5 MPa

La résistance en compression à 2 jours étant supérieure à 10 MPa et celle à 28 jours étant comprise entre 42,5 MPa et 62,5 MPa, le ciment d'argile MCC1® remplit les exigences de la classe de résistance 42,5 N.

3. Caractérisation du béton Argiroc®

3.1. Formulation du béton Argiroc®

Le béton Argiroc® est formulé à partir de ciment d'argile MCC1®. La formulation du béton Argiroc® est la suivante :

- Dosage en ciment 300 kg/m³,
- Volume de pâte cimentaire de 31%,
- Rapport E/C 0,55 avec des granulats de Dmax 16 mm,
- Les granulats utilisés sont du sable 0/4 roulé alluvionnaire et des gravillons 4/16 roulés alluvionnaires d'absorption WA24 ≤ 2,5%
- Le G/S du squelette granulaire est de 1,57.

Les échantillons de béton Argiroc® ont été fabriqués au laboratoire de Materrup en présence du CSTB le 20 avril 2021. Sauf précision contraire, tous les résultats présentés dans ce rapport correspondent à cette formulation.

Le choix a été fait d'utiliser cette formulation, qui est une des plus pénalisantes pour le béton Argiroc®, afin de caractériser les propriétés du béton dans les conditions les moins favorables. Dans cette démarche, le rapport E/C élevé a été choisi volontairement pour correspondre au E/C maximal. De plus, les agrégats ont été choisis roulés et non concassés (adhérence plus faible à la pâte cimentaire), les granulats ayant un Los Angeles de 30. Les fiches techniques des agrégats sont présentées en Annexe 3.

Lors de la fabrication des échantillons du 20 avril 2021, des mesures ont été réalisées afin de caractériser le maintien en rhéologie du béton au cours du temps. Les résultats sont indiqués dans le [Tableau 18](#).

Tableau 18 : Résultats des contrôles effectués sur béton frais

Temps	Affaissement selon NF EN 12350-2	Classe de consistance selon NF EN 206 table 3	Température du béton
T ₀	230 mm	S5	18,9°C
T ₀ + 30 min	210 mm	S4	19,0°C
T ₀ + 60 min	200 mm	S4	19,1°C
T ₀ + 90 min	170 mm	S4	19,0°C

3.2. Masse volumique du béton

Les mesures de masse volumique sur béton durci ont été réalisées conformément aux modalités définies dans les normes NF EN 12390-7 au CSTB [2]. Des éprouvettes cylindriques Ø11x22 cm ont été fabriquées en béton Argiroc®. Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées en eau à 20 ±2 °C.

Les résultats sont présentés dans le [Tableau 19](#).

Tableau 19 : Synthèse des résultats de la détermination de la masse volumique

Date (âge)	Valeur moyenne sur 3 éprouvettes	Ecart type sur 3 éprouvettes
14 jours	2400 kg/m ³	17 kg/m ³
28 jours	2380 kg/m ³	21 kg/m ³
90 jours	2380 kg/m ³	10 kg/m ³

3.3. Résistance à la compression sur béton

Des éprouvettes cylindriques Ø11x22 cm et des éprouvettes cubiques 15x15x15 cm ont été fabriquées en béton Argiroc®. Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées en eau à (20 ± 2) °C selon la norme NF EN 12390-3.

Les essais de compression ont été réalisés conformément aux modalités définies dans la norme NF EN 12390-3 au CSTB [2] (rectifiées pour les éprouvettes cylindriques 11x22). Les résultats sont présentés dans le **Tableau 20**, une tolérance de 3% s'applique sur les valeurs indiquées.

Tableau 20 : Synthèse des résultats de résistance à la compression sur éprouvettes

Date (âge)	Type d'éprouvette	Résistance à la compression			
		Nombre essais	Valeur moyenne (MPa)	Ecart type	Valeur caractéristique (MPa)
14 jours	Cylindre 11x22 cm	3	24,5	0,7	/
28 jours	Cylindre 11x22 cm	6	29,5	0,3	32,1
28 jours	Cube 15 cm	6	33,1	0,5	28,8
90 jours	Cylindre 11x22 cm	3	31,7	1,9	/

Le béton Argiroc® avec un dosage de 300 kg/m³ de liant et un E/C de 0,55 correspond donc à une classe de résistance C25/30.

Des essais complémentaires, de résistance en compression sur des séries de 3 cylindres de dimensions Ø11 x 22 cm conservés en eau à (20 ± 2) °C, ont été menés sur béton Argiroc® avec un dosage de 300 kg/m³ de liant, en faisant varier le rapport E_{eff}/C. Les résultats sont présentés sur la **Figure 5**. Les classes de consistance sont obtenues par mesure au cône d'Abrams selon la norme NF EN 12350-2.

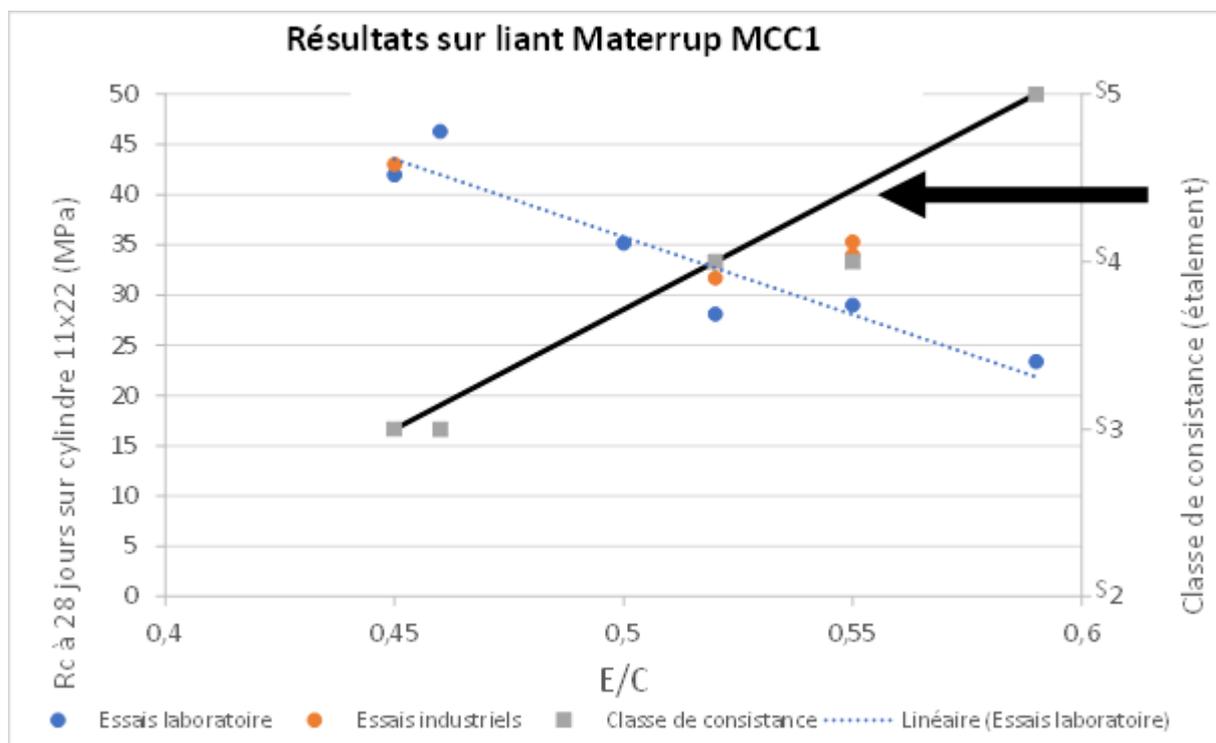


Figure 5 : Evolution de la résistance en compression sur cylindres Ø11x22 cm en fonction de l'eau efficace

3.4. Résistance à la traction par fendage sur béton

Des éprouvettes cylindriques Ø11x22 cm ont été fabriquées en béton Argiroc®. Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées en eau à 20±2 °C.

Les essais de fendage ont été réalisés conformément aux modalités définies dans la norme NF EN 12390-6 au CSTB, sur 3 éprouvettes par séries d'essais. Les résultats sont présentés dans le [Tableau 21](#).

Tableau 21 : Synthèse des résultats de résistance à la traction par fendage

Date (âge)	Résistance à la traction par fendage (série de 3 essais)	
	Valeur moyenne	Ecart type
14 jours	2,55 MPa	0,13 MPa
28 jours	2,95 MPa	0,20 MPa
90 jours	3,35 MPa	0,25 MPa

De la même façon qu'un béton conventionnel, la résistance en traction du béton Argiroc® correspond à environ 10% de sa résistance à la compression.

3.5. Module d'élasticité en compression

Des éprouvettes cylindriques Ø11x22 cm ont été fabriquées en béton Argiroc®. Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées en condition endogène à 20°C.

Les essais ont été réalisés conformément aux modalités définies dans la norme NF EN 12390-13 au LMDC [2], sur 3 éprouvettes. Les résultats sont présentés dans le [Tableau 22](#).

Tableau 22 : Synthèse des résultats de la détermination du module sécant d'élasticité en compression

Date (âge)	Module d'élasticité (série de 3 essais)	
	Valeur moyenne	Ecart type
28 jours	24000 MPa	200 MPa

3.6. Variations dimensionnelles

Les essais de variations dimensionnelles ont été réalisés au LMDC [2] selon le référentiel de la norme NF EN 12390-16. Les éprouvettes testées sont prismatiques (dimensions 7x7x28 cm) en béton Argiroc® formulé à partir de ciment d'argile MCC1®. Les éprouvettes ont été démoulées à 48 heures.

Par convention, une variation dimensionnelle positive correspond à un retrait du matériau, une variation dimensionnelle négative correspond à un gonflement du matériau.

Les essais de retrait ont été réalisés dans deux conditions différentes (3 éprouvettes pour chaque condition) :

- Mode endogène : emballage hermétique des éprouvettes après démoulage
- Mode dessiccation : cure en atmosphère contrôlée 20°C et 50% HR

Les résultats sont présentés dans le graphique en [Figure 6](#).

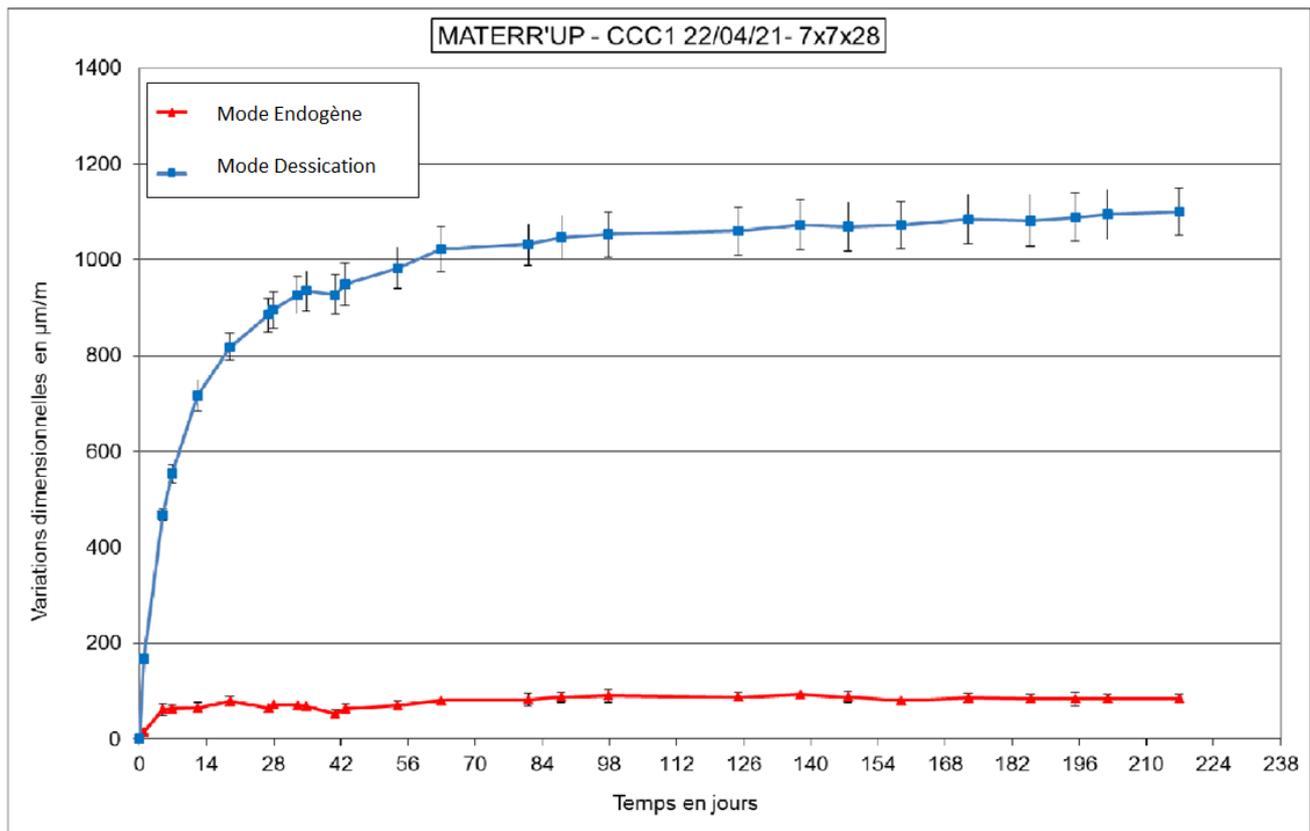


Figure 6 : Variations dimensionnelles pour les deux lots d'éprouvettes en mode retrait endogène et en mode retrait de dessication

La synthèse de ces résultats est donnée dans le Tableau 23.

Tableau 23 : Synthèse des résultats de variation dimensionnelles sur béton Argiroc®

Mode de conservation des éprouvettes de retrait	Cure	Variation dimensionnelle à 217 jours (série de 3 essais)	
		Valeur moyenne	Ecart type
Retrait endogène	Eprouvette fermée hermétiquement à 20°C	85 $\mu\text{m}/\text{m}$	50 $\mu\text{m}/\text{m}$
Retrait en dessication	20°C et 50% HR	1100 $\mu\text{m}/\text{m}$	8 $\mu\text{m}/\text{m}$

3.7. Fluage en compression

Des essais de fluage en compression ont été réalisés au LMDC [2] sur des éprouvettes cylindriques 11x22 cm, selon la norme NF EN 12390-17. Les éprouvettes ont été rectifiées mécaniquement à 3 jours. Le chargement est réalisé à l'échéance choisie de 28 jours (3 éprouvettes placées en mode dessiccation et 3 éprouvettes mises en mode endogène par formulation).

Le niveau de chargement a été choisi à 33% de la charge à la rupture, soit 9,78 MPa. Un suivi des variations dimensionnelles est également réalisé sur les mêmes types d'éprouvette à partir du jour du chargement. Les courbes de fluage sont présentées en Figure 7.

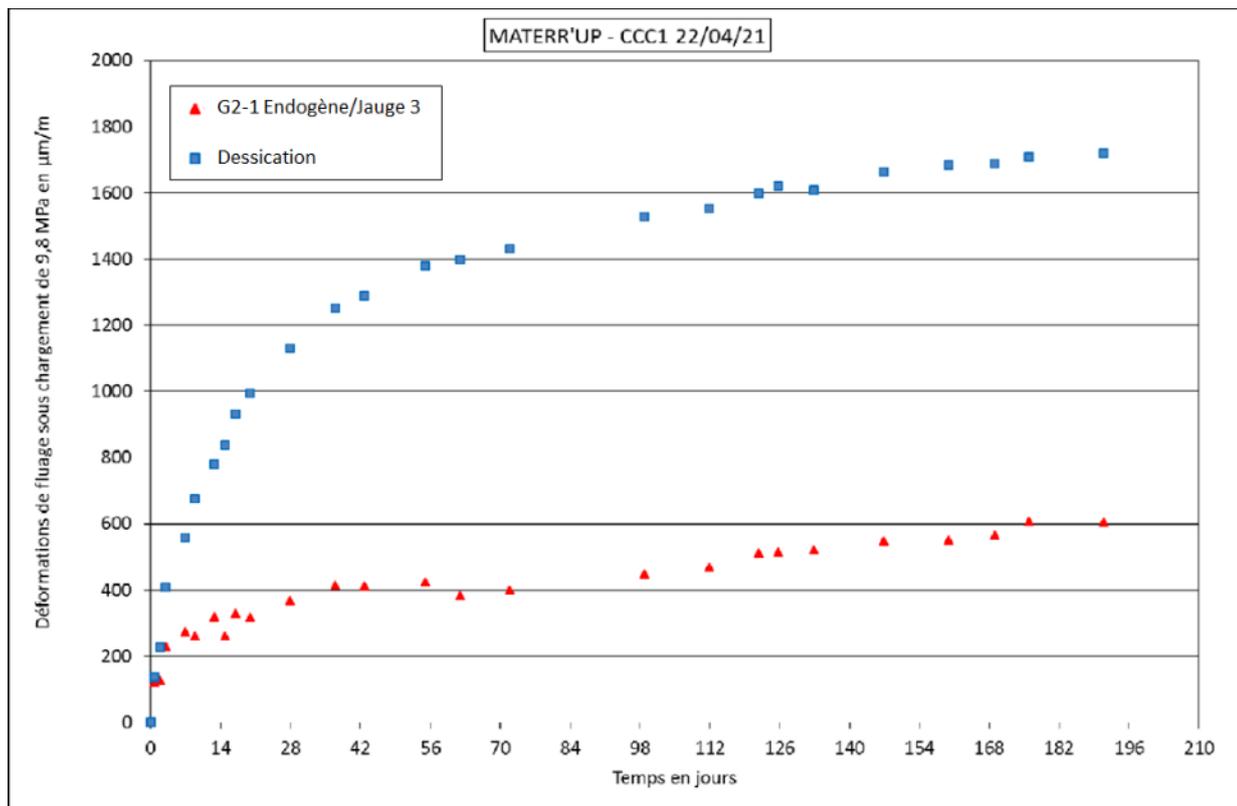


Figure 7 : Déformations de fluage sous chargement en mode endogène et en mode de dessiccation

La synthèse de ces résultats est donnée dans le Tableau 24.

Tableau 24 : Synthèse des résultats de déformations de fluage sur béton Argiroc®

Mode de conservation des éprouvettes de fluage	Cure	Déformation sous charge après 191 jours de chargement (âge du béton : 219 jours)
Mode endogène	Éprouvette fermée hermétiquement à 20°C	Valeur pour une jauge d'une éprouvette : 604 µm/m
Mode dessiccation	20°C et 50% HR	Valeur moyenne : 1721 µm/m (3 éprouvettes)

3.8. Adhérence acier/béton

Des essais d'adhérence entre armature acier HA12 et le béton Argiroc® ont été effectués au CSTB [2]. Les courbes des essais d'adhérence acier/béton sont présentées en Figure 8.

La contrainte d'adhérence moyenne est de $\tau = 21,6$ MPa.

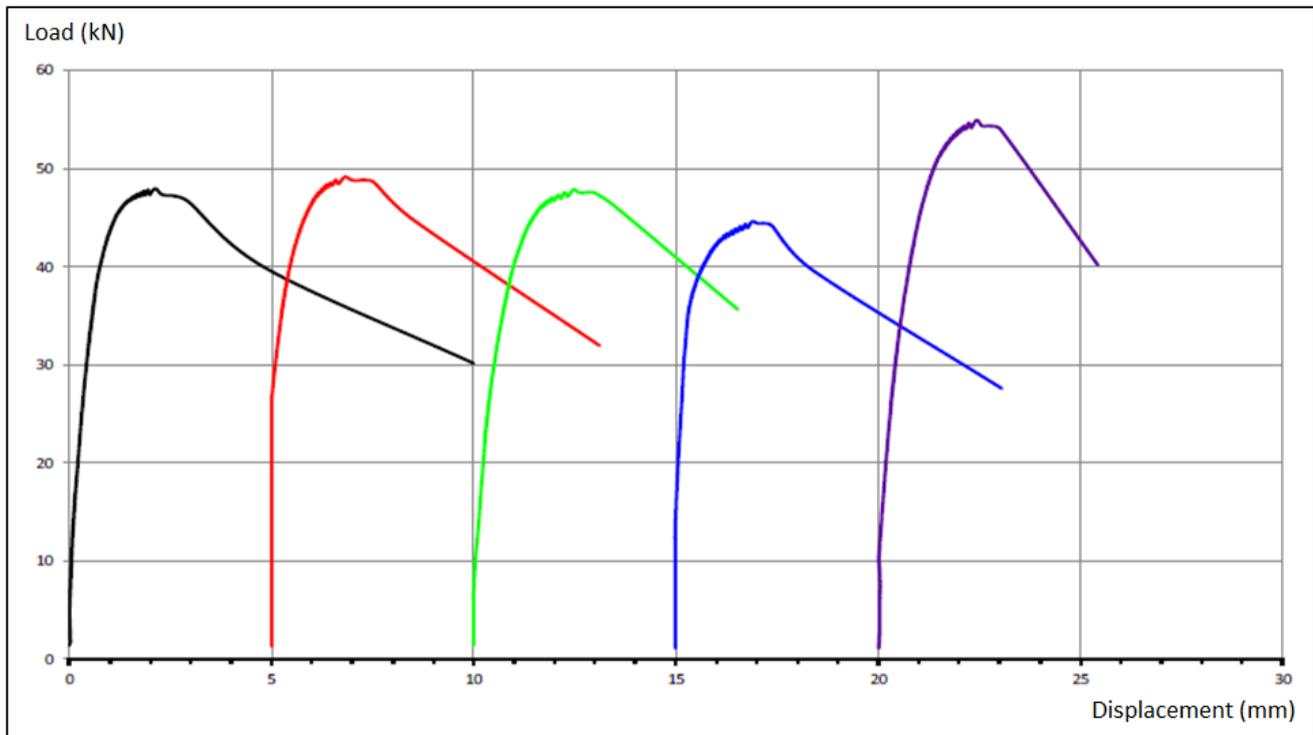


Figure 8 : courbes des essais d'adhérence acier/béton

4. Durabilité

4.1. Essais de durabilité sur mortier

Des essais complémentaires concernant des indicateurs de durabilité sont également en cours de réalisation au LERM.SETEC [3].

Absorption capillaire

Les essais d'absorption capillaire ont été réalisés au LERM.SETEC [3] en s'inspirant de la norme NF EN 480-5.

Les propriétés du mortier à base de ciment d'argile MCC1® (avec E/C = 0,4) sont comparées à celles d'un ciment Portland (CEM I à E/C 0,5). Les mortiers sont confectionnés sur des mortiers type CEN avec du sable normal.

Deux types de cure sont réalisées :

- 7 jours à 20°C et 65% HR
- 90 jours à 20°C et 65% HR

Les mesures ont été effectuées sur des séries de 3 prismes 40x40x160 cm, fabriqués au LERM.SETEC.

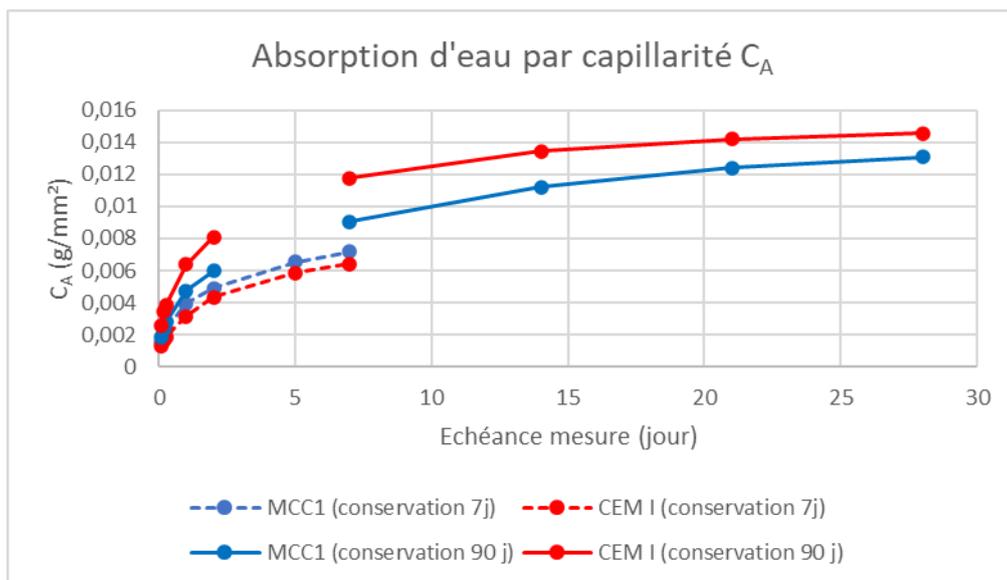


Figure 9 : courbes des essais d'absorption d'eau par capillarité

Durabilité : attaque acide

Des essais d'attaques acides ont été réalisées au LERM.SETEC [6] selon un protocole interne. Les conditions de l'essai sont les suivantes : Température de la salle d'essai (20 +/- 2°C) ; pH de la solution : 5,0 ; Type d'acide : HNO₃.

Les éprouvettes sont des prismes 4x4x16 cm (dosage à E/C 0,4). Les propriétés du mortier à base de ciment d'argile MCC1® (E/C 0,4) sont comparées à celles d'un ciment Portland (CEMI 52,5 R à E/C 0,5). Les mortiers sont confectionnés sur des mortiers type CEN avec du sable normal.

Les mesures de suivi des variations de masse, de longueur et de module d'élasticité dynamique sont réalisées à différentes échéances.

Par convention, une variation dimensionnelle négative correspond à un retrait du matériau, une variation dimensionnelle positive correspond à un gonflement du matériau.

En référence, les mêmes mesures ont été réalisées sur un lot identique d'éprouvettes conservées en eau.

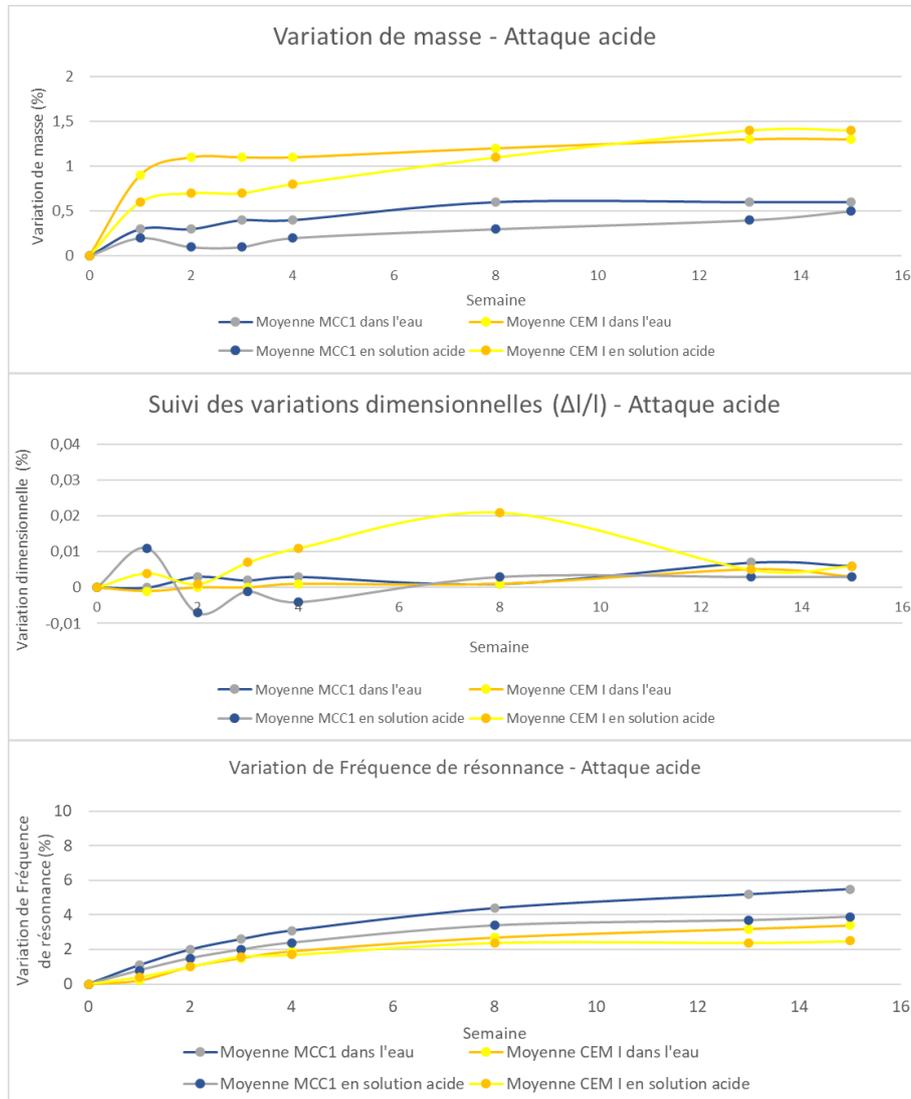


Figure 10 : courbes des essais d'attaques acide (variation de masse, variation dimensionnelle, variation de fréquence)

Durabilité : attaque sulfatique

Des essais d'attaques sulfatiques ont été réalisées au LERM.SETEC [6] en s'inspirant de la norme ASTM C 1012. Une solution de Na_2SO_4 à 50 g/l a été utilisée pour mener cet essai.

Les éprouvettes sont des prismes 4x4x16 cm (dosage à E/C 0,4). Le ciment Portland de référence est un quelle est un CEM I 52,5R de Lafarge.

Les mesures de suivi des variations de masse, de longueur et de module d'élasticité dynamique sont réalisées à différentes échéances.

Par convention, une variation dimensionnelle négative correspond à un retrait du matériau, une variation dimensionnelle positive correspond à un gonflement du matériau.

En référence, les mêmes mesures ont été réalisées sur un lot identique d'éprouvettes conservées en eau.

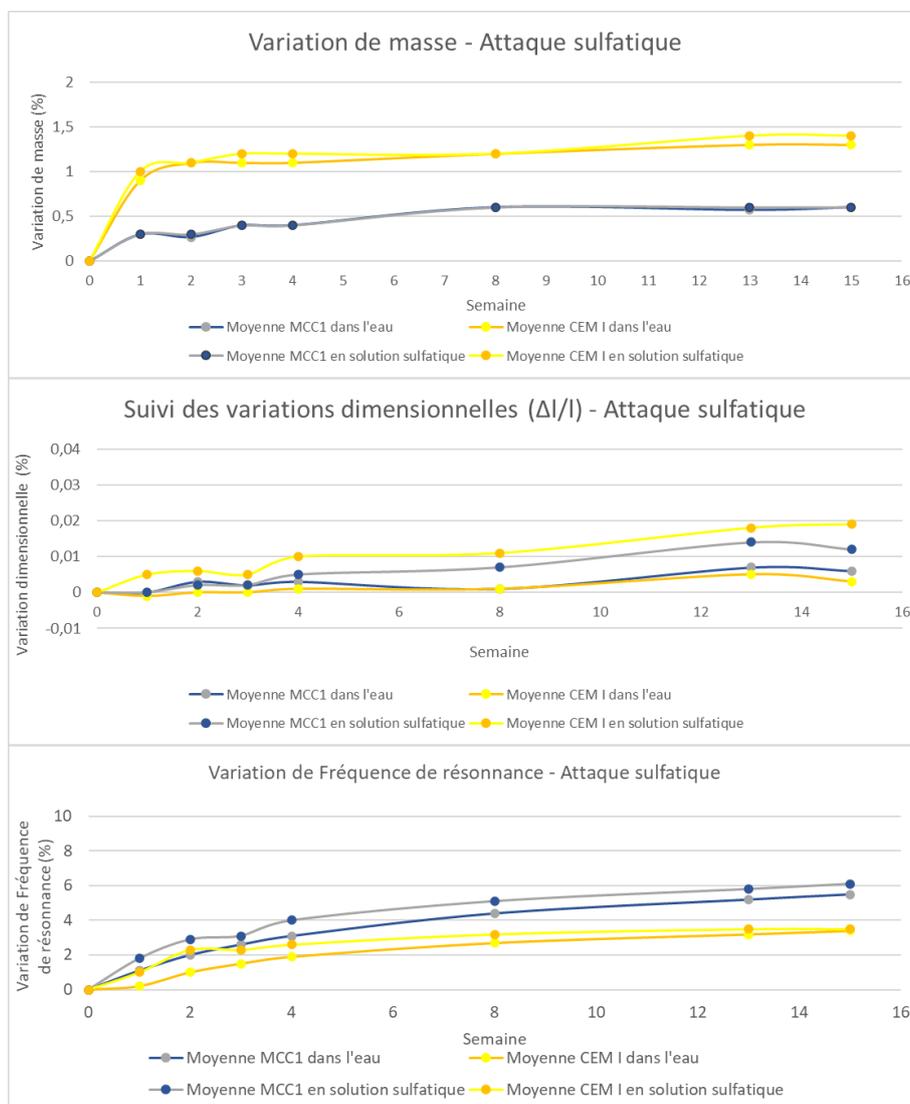


Figure 11 : courbes des essais d'attaque sulfatique (variation de masse, variation dimensionnelle, variation de fréquence de résonance)

Détermination des masses volumiques et de la porosité accessible à l'eau

Des mesures de masses volumiques et de porosité accessible à l'eau ont été réalisées au LERM.SETEC [3] selon la norme NF P 18-459, sur des séries de 3 éprouvettes de mortier normalisé.

Tableau 25 : Tableau de synthèse de la caractérisation du ciment MCC1® à valeur informative

Caractéristiques	Référence norme essai	Valeur pour le ciment d'argile MCC1®
Masse volumique réelle (kg/m³) Masse volumique absolue (kg/m³)	NF P 18-459	2290 kg/m ³ 2120 kg/m ³
Porosité (%)	NF P 18-459	16,5 %

4.2. Essais de durabilité sur béton

Les essais de durabilité sur béton Argiroc® ont été réalisés au LERM.SETEC [2]. Les essais ont tous été réalisés sur des éprouvettes ayant subi une cure à 20°C et 100% HR pendant 90 jours. Les résultats de ces essais ainsi que les normes d'essai associées sont présentés dans le [Tableau 26](#).

Ces essais sont généralement réalisés sur des bétons se conformant à la norme NF EN 206. Même si le béton Argiroc® ne rentre pas dans le cadre de cette norme, ces indicateurs ont été mesurés afin de caractériser la durabilité du béton Argiroc® dans une démarche d'approche performantielle. Pour cela, le fascicule FD P18-480:2022 [4] a été utilisé comme référence afin de déterminer les indicateurs de durabilité pertinents pour cette approche performantielle. Ces indicateurs sont présentés dans le [Tableau 26](#).

Tableau 26 : Synthèse des résultats des essais de durabilité sur béton Argiroc®

Mesure	Norme d'essai	Conditions d'essai	Résultat
Front de carbonatation à 70 jours	NF EN 12390-12	1% de CO ₂ (20 ± 2) °C et (57 ± 3) % H.R.	Moyenne (sur 12 points) : 9 mm
Perméabilité apparente aux gaz à 90 jours	XP P18-463	26 jours à 80°C puis séchage à 105°C	Moyenne (sur 3 points) : 41.10 ⁻¹⁸ m ²
Porosité accessible à l'eau à 90 jours	NF P18-459	Séchage à 105°C	Moyenne (sur 3 points) : 13,3%
Coefficient de diffusion apparent des ions chlorure à 90 jours	XP P18-462	Migration sous champ électrique en régime non-stationnaire	Moyenne (sur 3 points) : 7,9.10 ⁻¹² m ² /s
Résistance au gel/dégel	NF P18-425	Gel modéré : gel dans l'air et dégel dans l'eau	Médiane (sur 3 points) : 30 cycles en dessous des critères*

*Note : Le rapport E/C élevé de 0,55 utilisé pour la formulation du béton Argiroc® ne permet pas d'obtenir une résistance au gel suffisante. Des essais supplémentaires ont été réalisés au LERM.SETEC [5]. Ces essais ont été

réalisés avec un rapport E/C plus faible de 0,45 ainsi qu'avec un pourcentage d'air entrainé de 6%. La formulation correspondante est la suivante :

- Dosage en ciment MCC1® 300 kg/m³,
- Volume de pâte cimentaire de 25%,
- Adjuvantation avec un entraîneur d'air,
- Rapport E/C 0,45 avec des granulats de D_{max} 22 mm,
- Les granulats utilisés sont du sable 0/4 roulé alluvionnaire et des gravillons 6/10 et 11/22 concassés calcaires (FTP en annexe 3),
- Le G/S du squelette granulaire est de 1,44.

Les résultats de ces essais (présentés en Figure 12) démontrent que le béton Argiroc®, avec le rapport E/C et l'adjuvantation adaptée, présente une résistance suffisante au gel/dégel modéré.

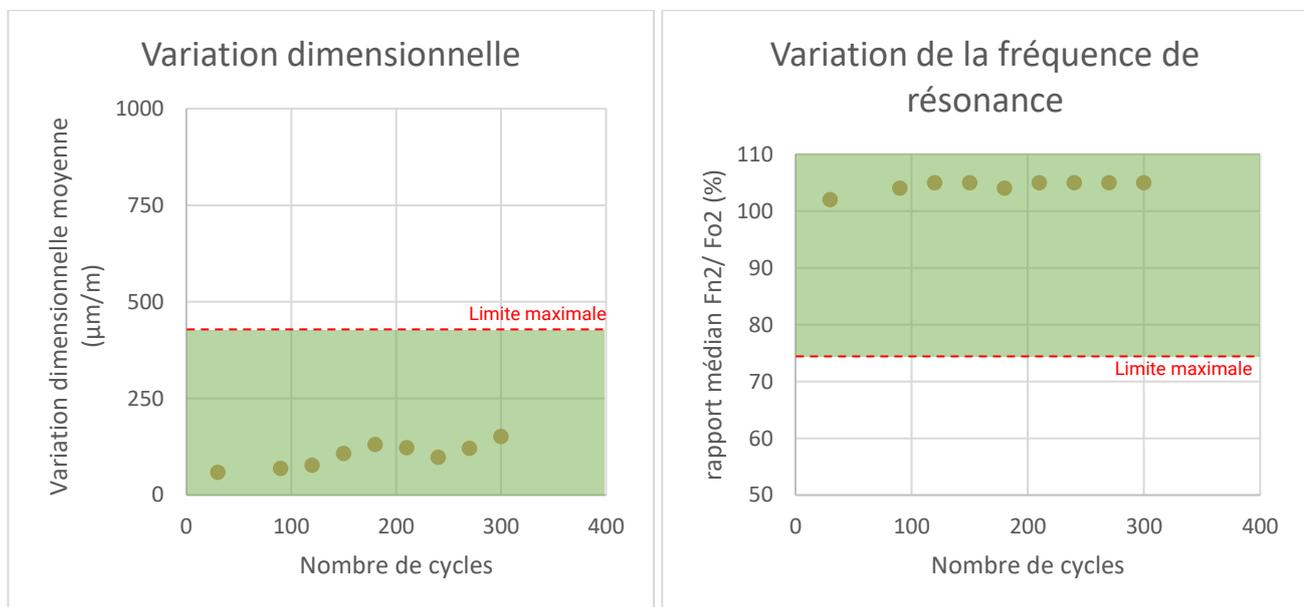


Figure 12 : Résultats des essais de gel/dégel réalisés au LERM.SETEC [5]

Tableau 27 : Indicateurs de durabilité du béton Argiroc

Indicateur	Valeur associée au béton Argiroc®	
Vitesse de carbonatation accélérée	$V_{acc,90j}$	1,1 mm/(jour) ^{0,5}
Vitesse de carbonatation naturelle	V_{app}	2,7 mm/(an) ^{0,5}
Coefficient de diffusion apparent des ions chlorures	$D_{app,90j}$	$7,9 \cdot 10^{-12}$ m ² /s
Porosité accessible à l'eau	$P_{eau,90j}$	13,3%
	$P_{eau,90j}/fV_p$	44%
Perméabilité aux gaz à 105°C	$K_{105°C}$	$41 \cdot 10^{-18}$ m ²

4.3. Réaction au feu

Le ciment d'argile MCC1® bénéficie d'un classement au feu A1 selon l'Arrêté du 21 novembre 2002 relatif à la réaction au feu des produits de construction et d'aménagement⁸. Ceci dit, étant donnée le caractère innovant de ce ciment, des essais de caractérisation sur poudre sont prévus avec la division « feu » du CSTB et feront l'objet d'un complément dans le présent document.

5. Sécurité d'utilisation

Le ciment d'argile MCC1® fait l'objet d'une fiche de sécurité type FDS.

De la même façon qu'un ciment Portland, il est nécessaire lorsque l'on manipule les ciments d'argile MCC1® ou mortiers/bétons à base de ciments d'argile MCC1® de porter les EPI adéquates :

- Protection des mains avec des gants imperméables résistant à l'abrasion et aux produits alcalins ;
- Protection de la peau avec le port de vêtements à manches longues, port de bottes et d'un pantalon éventuellement imperméable notamment dans le cas de bétonnage au sol ;
- Protection des yeux avec le port de lunettes de sécurité homologuées afin d'éviter tout contact avec les yeux

F. CHANTIERS DE REFERENCE

- Dallage 5 m x 4 m le 02/07/2021 (3,3 m³)
- Voile béton le 6/07/2021 (1,2 m³)
- Dallage 1 m x 5 m le 28/10/2021 (0,8 m³)
- Dallage 1 m x 5 m le 10/11/2021 (0,8 m³)
- Dallage 1 m x 5 m le 19/11/2021 (0,8 m³)
- Bloc plein 1 m x 0.6 m le 10/12/2021 (0,4 m³)
- Pièces préfabriquées : en béton coulé (plus de 1000 pièces) et en béton pressé (plus de 1000 pièces)

Les résultats associés à ces chantiers de référence (par prélèvement d'éprouvettes et mesure au scléromètre) sont présentés en Annexe 3.

G. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] LERM SETEC, Bulletin d'analyse n°50883-1, du 23 décembre 2021

[2] CSTB, Rapport d'essais n° DSSF 21-02835/A-1

[3] LERM.SETEC, PV d'essais n°50883/7736.LP « Caractérisation physique d'un mortier de liant d'argile crue », du 5 avril 2022

[4] FD P18-480 : « Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle », version 2022

[5] LERM.SETEC, PV d'essais n°50883/771.LP « Essais de gel/Dégel sur béton durci », du 3 mars 2022

[6] LERM.SETEC, Rapport n°50883.01.01.D « Résistance aux attaques acide et sulfatiques d'un mortier à base de ciment d'argile crue », du 18 juillet 2022

⁸ <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGITEXT000020397555/>

ANNEXES

Annexe 1 : Plan de contrôle qualité (usine et produits finis)

PLAN DE CONTRÔLE QUALITE ARGILE

Paramètre	Méthode d'essai	Norme d'essai	Fréquence	Réalisation	Spécifications
Granulométrie	Granulomètre laser voie humide et voie sèche	NF EN ISO 17892-4	chaque livraison toutes les 15 tonnes chaque changement de process	Sous-traitance	Fuseau liant
Teneur en eau	Etuvage	NF EN ISO 17892-1	chaque campagne de broyage	interne	Limite sup 5%
pH	Dissolution dans l'eau	Protocole interne	chaque campagne de broyage	interne	Spécification interne

PLAN DE CONTRÔLE QUALITE PRODUIT FINI

Paramètre	Méthode d'essai	Norme d'essai	Fréquence	Réalisation	Spécifications
Résistance Meca 24h, 7j et 28j	Résistance en compression mortier	NF EN 196-1	4/semaine	interne	Variation par rapport à la référence Limite inf : 8,0 MPa à 2 j 40,0 MPa à 28 j (Tableau 10 NF EN 197-1)
Temps de début de prise	Aiguille Vicat sur pâte	NF EN 196-3	4/semaine	interne	Variation par rapport à la référence Limite inf : 50 min (Tableau 10 NF EN 197-1)
Stabilité (expansion)	Essai Le Chatelier sur pâte	NF EN 196-3	4/semaine	interne	≤ 10 mm
Teneur en sulfate	Dosage chimique ou spectrométrie	NF EN 196-2	1/semaine	Sous-traitance	≤ 3,5% (Tableau 4 NF EN 197-1 pour un 42,5 N)
Teneur en chlorure	Dosage chimique ou spectrométrie	NF EN 196-2	1/semaine	Sous-traitance	≤ 0,10% (Tableau 4 NF EN 197-1)
Composition chimique	Fluo X	NF EN 196-2	1/mois	Sous-traitance	Spécification interne
Chaleur d'hydratation	Calorimètre	NF EN 196-8 ou -9	1/semaine	Sous-traitance	Limite sup : 300 J/g (Tableau 10 NF EN 197-1)
Finesse	Blaine	NF EN 196-6	1/semaine	interne	Variation par rapport à la référence indication : 3000 à 4000 cm ² /g pour les ciments
Masse volumique / densité	Masse volumique apparente dans pot de 1L Densité réelle avec volumétrie	NF EN 196-6	chaque jour	interne	Variation par rapport à la référence
Teneur en Soufre (%)	Dosage chimique ou spectrométrie	Protocole interne	1/mois	Sous-traitance	Spécification interne
Rhéologie	Étalement table à choc	1015-3	1/mois et à chaque nouvelle livraison	interne	Variation par rapport à la référence
Résistance à la flexion	Résistance en flexion mortier	NF EN 196-1	1/semaine	interne	Variation par rapport à la référence
Variations dimensionnelles	Retrait sur mortier	NF P15-433	1/semaine	interne	Variation par rapport à la référence

Principe du plan de contrôle qualité produits finis

Ciment d'argile MCC1®

1. Cadre général

Le système de contrôle qualité du ciment d'argile MCC1® fabriqué par l'usine Materrup située à Saint-Geours de Marenne (40) est basé sur 3 axes :

- L'analyse des matières premières, qui constitue une méthode rapide d'évaluation de la conformité des lots reçus
- L'analyse des compositions des produits finis, qui constitue rapide d'évaluation de la conformité des lots produits
- L'analyse des performances des produits finis, qui vient compléter les analyses de compositions effectuées

L'analyse des compositions est faite par comparaison de la composition du produit fini avec la composition théorique de la version de référence issue des essais du laboratoire R&D. Le ciment d'argile MCC1® étant obtenu par mélange de poudres de compositions connues, la composition théorique du produit fini est connue aisément.

L'analyse des performances est faite par comparaison des performances du produit fini avec la version de référence. La version de référence est issue des essais effectués au laboratoire R&D. La production vise à obtenir des produits présentant des performances équivalentes à celles de la version de référence.

Chaque production et chaque matière première réceptionnées font l'objet d'un échantillonnage qui conduit à l'obtention d'un échantillon moyen. L'échantillonnage est réalisé en plusieurs points comme le décrit le protocole de la partie 5 « Echantillonnage ».

2. Analyse des matières premières entrant dans la composition du ciment d'argile MCC1®

Le ciment d'argile MCC1® est obtenu par mélange de matières premières. L'origine des matières premières rentrant dans la composition des produits finis peut être de deux sortes et appartiennent donc à deux catégories différentes :

- MPM : Matières premières produites par Materrup en interne
- MPI : Matières premières produites par des industriels tiers.

Ces deux groupes font l'objet de tests différents.

Les fréquences d'analyse sur les différentes matières premières ainsi que la nature des essais réalisés sont fixées selon la catégorie auxquelles les matières premières appartiennent.

a. MPM

La matière première produite en interne par Materrup est l'argile broyée. Les paramètres contrôlés sur cette MPM sont les suivants :

- Granulométrie : par tamisage et granulométrie laser en voie sèche selon la norme NF EN ISO 17892-4
- Teneur en eau : par étuvage selon la norme NF EN ISO 17892-1
- Composition chimique par fluorescence X.

Des contrôles concernant la composition chimique, minéralogique ainsi que la réactivité sont réalisés en amont, lors de la caractérisation du gisement exploité.

b. MPI

Dans le cas d'une nouvelle matière première, la compatibilité avec le ciment d'argile MCC1® est tout d'abord vérifiée initialement sur au moins deux échantillons. Elle est faite par remplacement de la matière première de référence par la matière première à valider dans le ciment d'argile MCC1®, dont les performances sont testées et comparées.

L'analyse de la compatibilité de la matière première est réalisée à l'aide de différentes méthodes, qui sont fonctions de la nature de la matière première :

- Fluorescence X ou spectroscopie infrarouge (composition chimique)
- Surface spécifique Blaine (finesse)
- Masse volumique réelle et apparente
- Teneur en eau
- Essais sur mortier de référence (performance mécanique et rhéologique)

Dans la mesure du possible, ces analyses sont réalisées en interne par le laboratoire R&D. Une analyse complète des matières premières utilisées est réalisée à minima une fois par trimestre. En dehors de ces contrôles annuels, la qualité des MPI est garantie par des systèmes qualité des producteurs (fiche d'autocontrôle de production envoyée à chaque lot reçu).

3. Analyse de composition du ciment d'argile MCC1®

Les analyses de composition du ciment d'argile MCC1® sont basées sur les préconisations de la norme NF EN 197-1. Cela comporte les analyses suivantes :

- Fluorescence X (composition chimique)
- Dosage chimique ou spectrométrie (teneur en sulfates, chlorures et soufre)

La conformité du produit est fixée avec des fourchettes définies sur différents paramètres choisis de manière à garantir des performances physico-mécaniques du ciment d'argile MCC1® fabriqué. L'analyse par composition permet d'obtenir une réponse plus rapide que l'approche performantielle, les deux systèmes étant complémentaires.

4. Analyse des performances du ciment d'argile MCC1®

Les analyses de performance du ciment d'argile MCC1® sont basées sur les préconisations de la norme NF EN 197-1, pour un CEM V 42,5 N.

Les essais de performance sont réalisés sur des mortiers normaux, à l'exception du taux E/C fixé à 0,4.

Cela comporte les analyses suivantes, dont les fréquences sont spécifiées dans la norme NF EN 197-1 :

- Résistance à court terme et résistance courante sur mortier
- Temps de début de prise
- Stabilité⁹ (expansion)

⁹ La mesure de stabilité ne présage pas du gonflement du matériau. Le gonflement peut apparaître en cas de RAG (réaction alcali granulats) ou RSI (réaction sulfatique interne). Ce paramètre est évalué au travers d'essais complémentaires à la présente ETPM :

- Pour la RAG sur béton (prismes 7x7x28 cm) : essai de performance selon la NF P18-454 (gonflement dans l'eau à 60°C pendant 5 mois) avec les seuils donnés dans le FD P18-456 (critère de seuil à 5 mois et de pente entre 3 et 5 mois).
- RSI sur béton (cylindres 11x22 ou prismes 7x7x28) : Méthode d'essai LPC durée 12 à 15 mois (étuvage pour simuler l'échauffement à cœur d'une pièce massive puis cycles séchage/eau puis gonflement dans l'eau) et deux critères (seuil maximum de gonflement et pente).

- Chaleur d'hydratation

Les lots de liant fabriqués sont jugés conformes une fois la résistance en compression à 24h connue et supérieur à la cible fixée.

Des analyses supplémentaires correspondant aux propriétés de la déclaration de performances sont également effectuées, avec une fréquence mensuelle :

- Surface spécifique Blaine
- Masse volumique réelle et apparente
- Etalement à la table à choc sur mortier
- Résistance à la flexion sur mortier
- Variations dimensionnelles sur mortier

Une éprouvette de mortier 4x4x16 cm est conservée à minima un an pour chaque lot de liant fabriqué.

5. Traitement des non-conformités observées sur le ciment d'argile MCC1®

L'analyse des matières premières réalisée par Materrup en cas de non-conformité d'une production est effectuée de manière incrémentale. Selon le paramètre affecté, certaines matières premières sont plus susceptibles d'en être responsable.

Cette méthode permet d'éviter des analyses inutiles et d'augmenter l'efficacité de la détection de la source de non-conformité. En effet il est nécessaire de détecter rapidement l'origine d'une non-conformité afin d'en limiter les conséquences.

6. Echantillonnage

L'échantillonnage concerne les produits finis et les matières premières reçues. Les échantillons de produits finis font l'objet d'analyses systématiques, ils sont archivés et conservés au moins un an.

Les échantillons de matière première sont analysés à chaque changement. Des analyses supplémentaires peuvent être effectuées en cas de non-conformité du produit fini, dans ce cas ils sont également conservés durant un an.

Les échantillons sont réalisés selon le protocole suivant :

- Par canne en profondeur et/ou sur plusieurs points
- Moyennisation
- Homogénéisation

On distingue différents types d'échantillonnage selon la nature du conditionnement des MP à réception ou du produit fini avant expédition :

- Stockage en silo ou citerne : prélèvement de 2,5L par canne
- Stockage en big-bag (protocole renforcé) : prélèvement d'1 échantillon d'environ 1L par big-bag. La totalité des sous-échantillons sont mélangés et mis dans 2 flacons de 2,5L.
- Stockage en sac : prélèvement de 2,5L.

ANNEXES

Annexe 2 : Prototypages & chantiers

Dallage 5 x 4 m, malaxage en camion toupie le 02/07/2021

Formulation :

- $D_{\max} = 14 \text{ mm}$
- $G/S = 1,6$
- $E/C = 0,43$
- Dosage liant : 300 kg/m^3

Caractéristiques béton frais et béton durci

- Conditions climatiques : 25°C , ensoleillé et vent soutenu
- Classe de consistance : S5
- R_c à 28 jours (prélèvement d'éprouvettes $11 \times 22 \text{ cm}$) = $28,5 \text{ MPa}$

Photos :



Mise en œuvre du béton de dallage



Aspect durci du dallage

Voile 2 x 2,5 m, malaxage en camion toupie le 06/07/2021

Formulation :

- $D_{\max} = 22 \text{ mm}$
- $G/S = 1,3$
- $E/C = 0,55$
- Dosage liant : 350 kg/m^3

Caractéristiques béton frais et béton durci

- Conditions climatiques : 20°C et léger vent
- Classe de consistance : S5
- R_c à 28 jours (prélèvement d'éprouvettes $11 \times 22 \text{ cm}$) = $28,4 \text{ MPa}$

Photos (coulé sur le dallage du 02/07/2021) :



Mise en œuvre du béton pour le coulage d'un voile



Aspect durci du voile

Dallage 5x1m, gâchage à la bétonnière, le 28/10/2021

Formulation :

- $D_{\max} = 16 \text{ mm}$
- $G/S = 1,4$
- $E/C 0,55$
- Dosage liant : 300 kg/m^3

Remarques

- Conditions climatiques : 30°C et $35\%HR$
- Classe de consistance : S5

Photo :



Dallage 5x1m, gâchage à la bétonnière, le 10/11/2021

Formulation :

- $D_{\max} = 16 \text{ mm}$
- $G/S = 1,4$
- $E/C 0,45$
- Dosage liant : 300 kg/m^3

Remarques

- Conditions climatiques : 20°C et 72%HR
- Classe de consistance : S4

Photo :



Dallage 5x1m, gâchage à la bétonnière, le 19/11/2021

Formulation :

- $D_{\max} = 16 \text{ mm}$
- $G/S = 1,4$
- $E/C 0,45$
- Dosage liant : 300 kg/m^3

Remarques :

- Conditions climatiques : 15°C et $70\%HR$
- Classe de consistance : S4

Photo :



Bloc 0,6x1m, gâchage à la bétonnière, le 10/12/2021

Formulation :

- $D_{\max} = 22 \text{ mm}$
- $G/S = 1,4$
- $E/C 0,31$
- Dosage liant : 400 kg/m^3

Remarques :

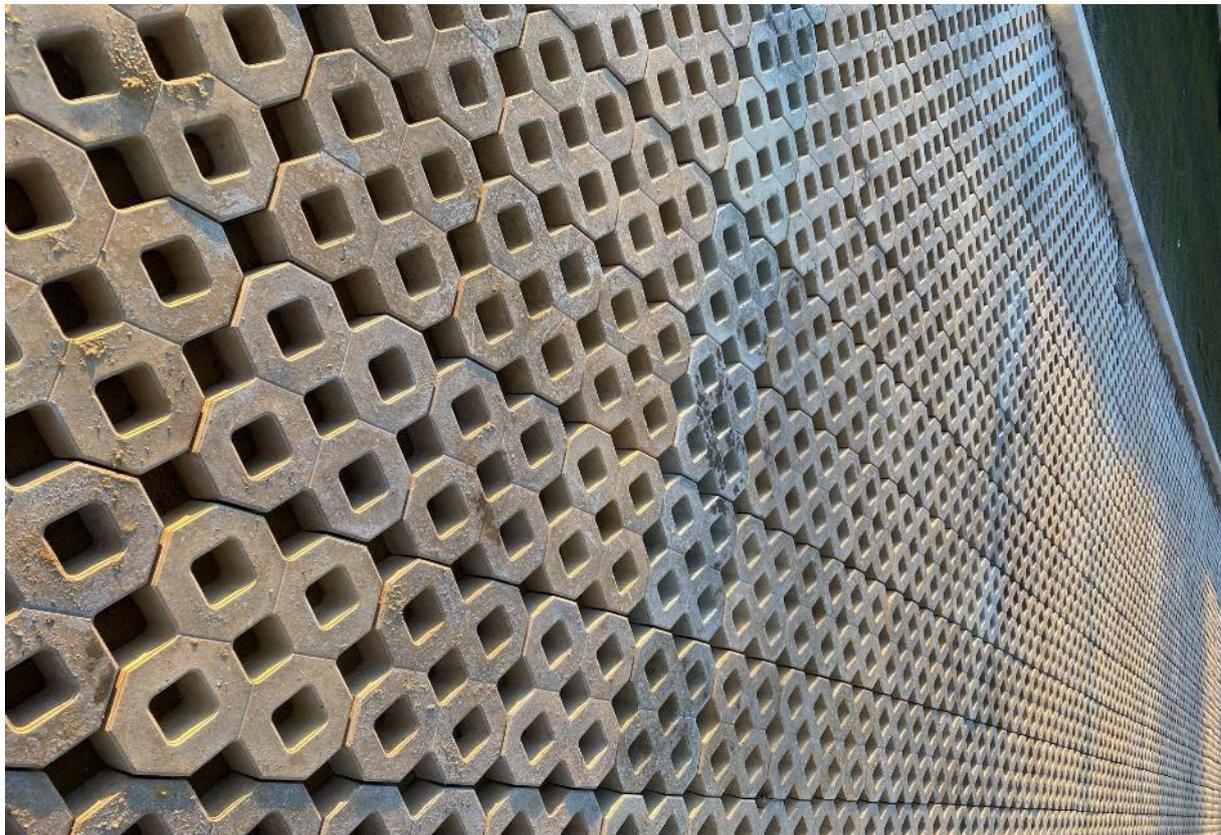
- Conditions climatiques : 5°C

Photos :



Pièces préfabriquées :

- en béton coulé (plus de 1000 pièces)



- en béton pressé (plus de 1000 pièces)



ANNEXES

Annexe 3 : Informations sur les agrégats utilisés pour les essais de béton Argiroc ®

Figure 13 : Fiche technique gravillon 4/16R

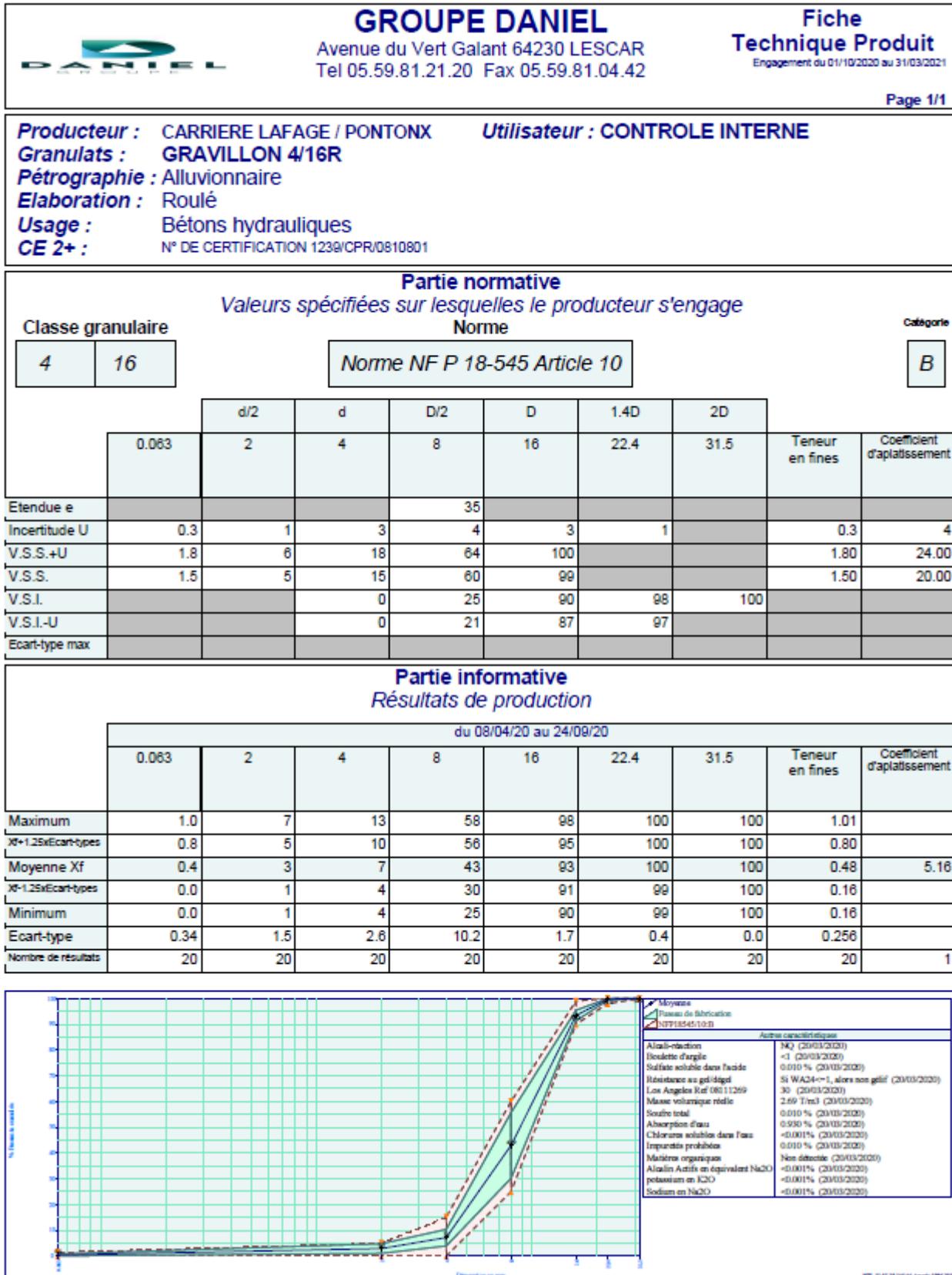


Figure 14 : Fiche technique sable 0/4R

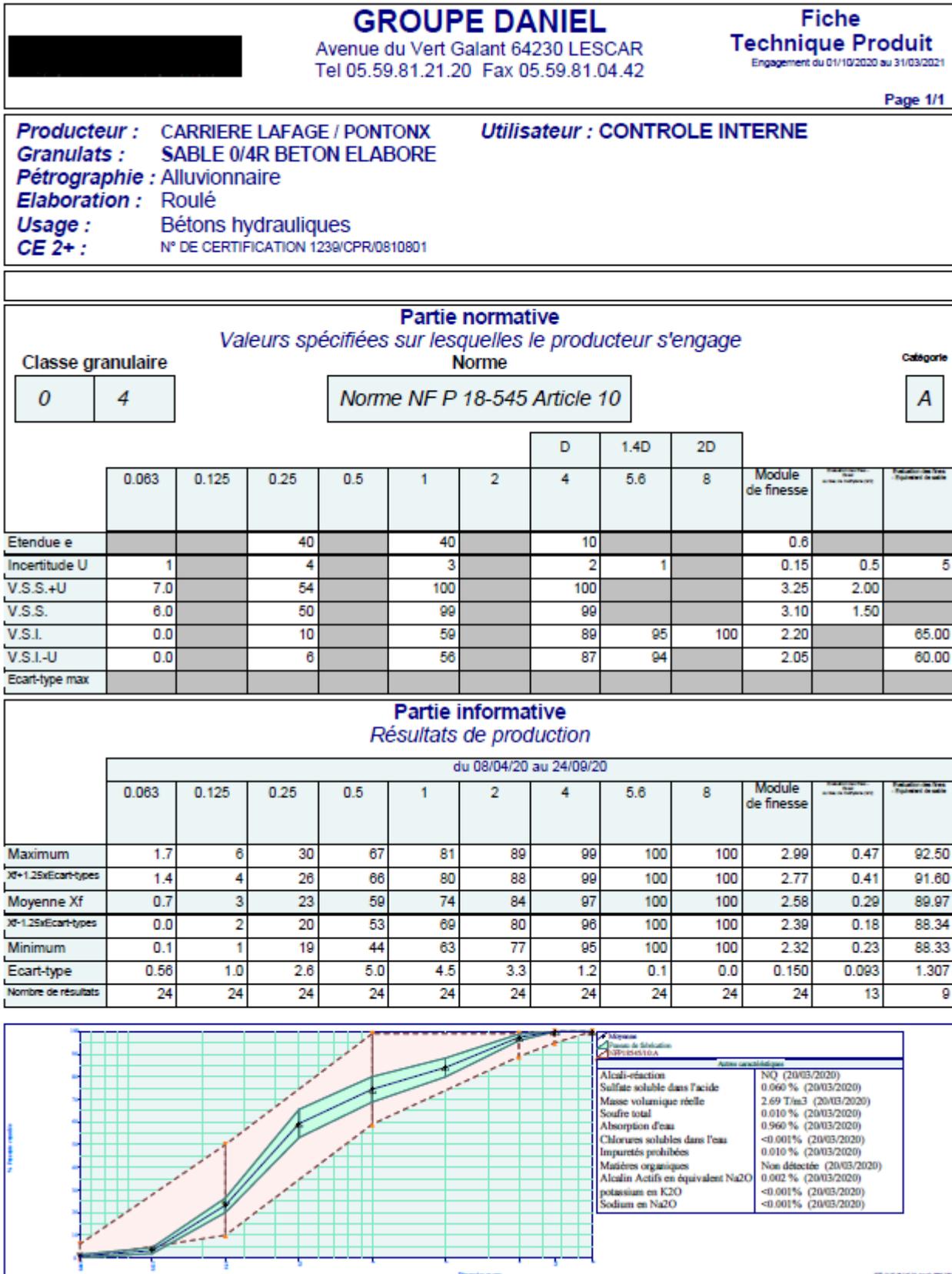


Figure 15 : Fiche technique gravillon 6/10C

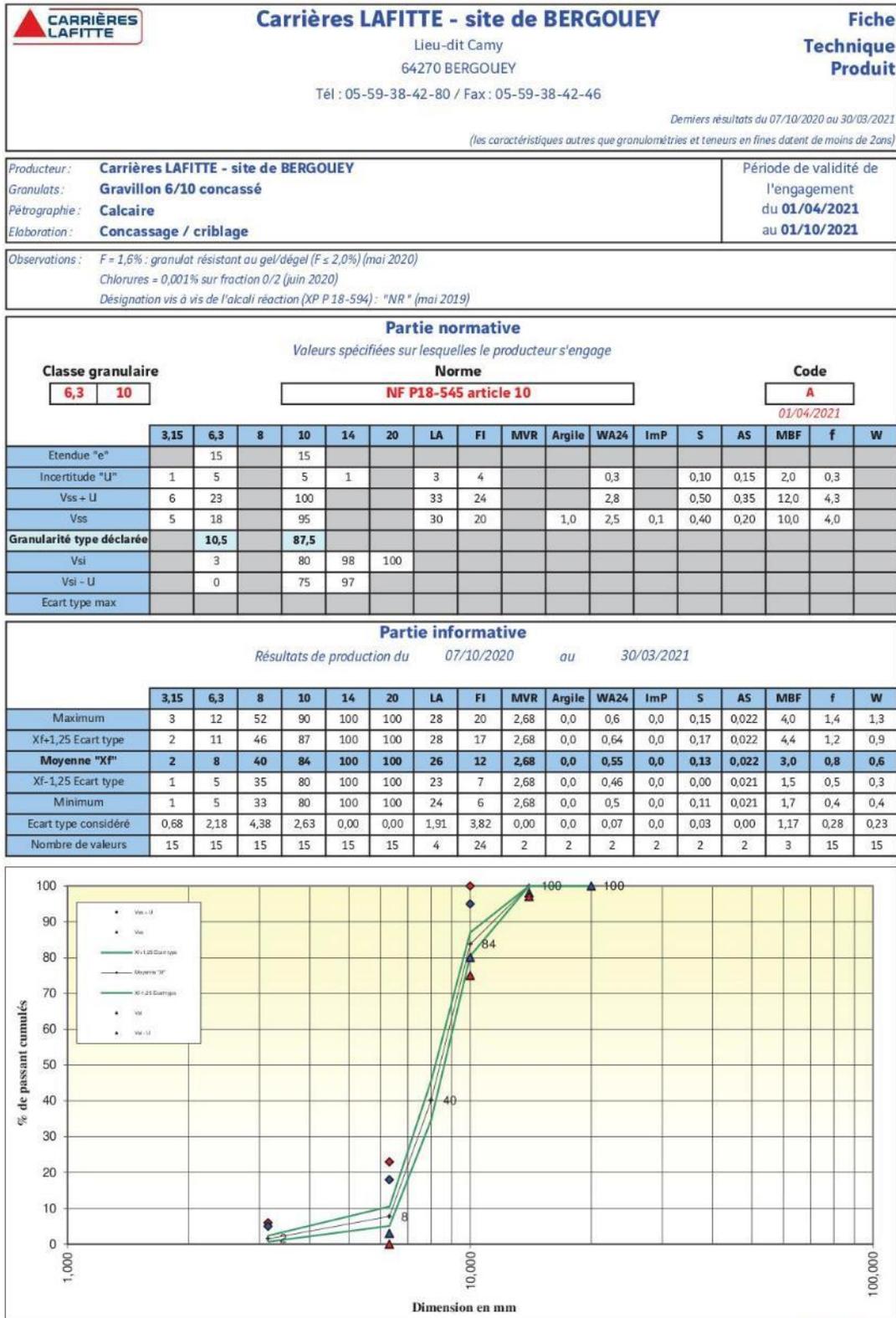
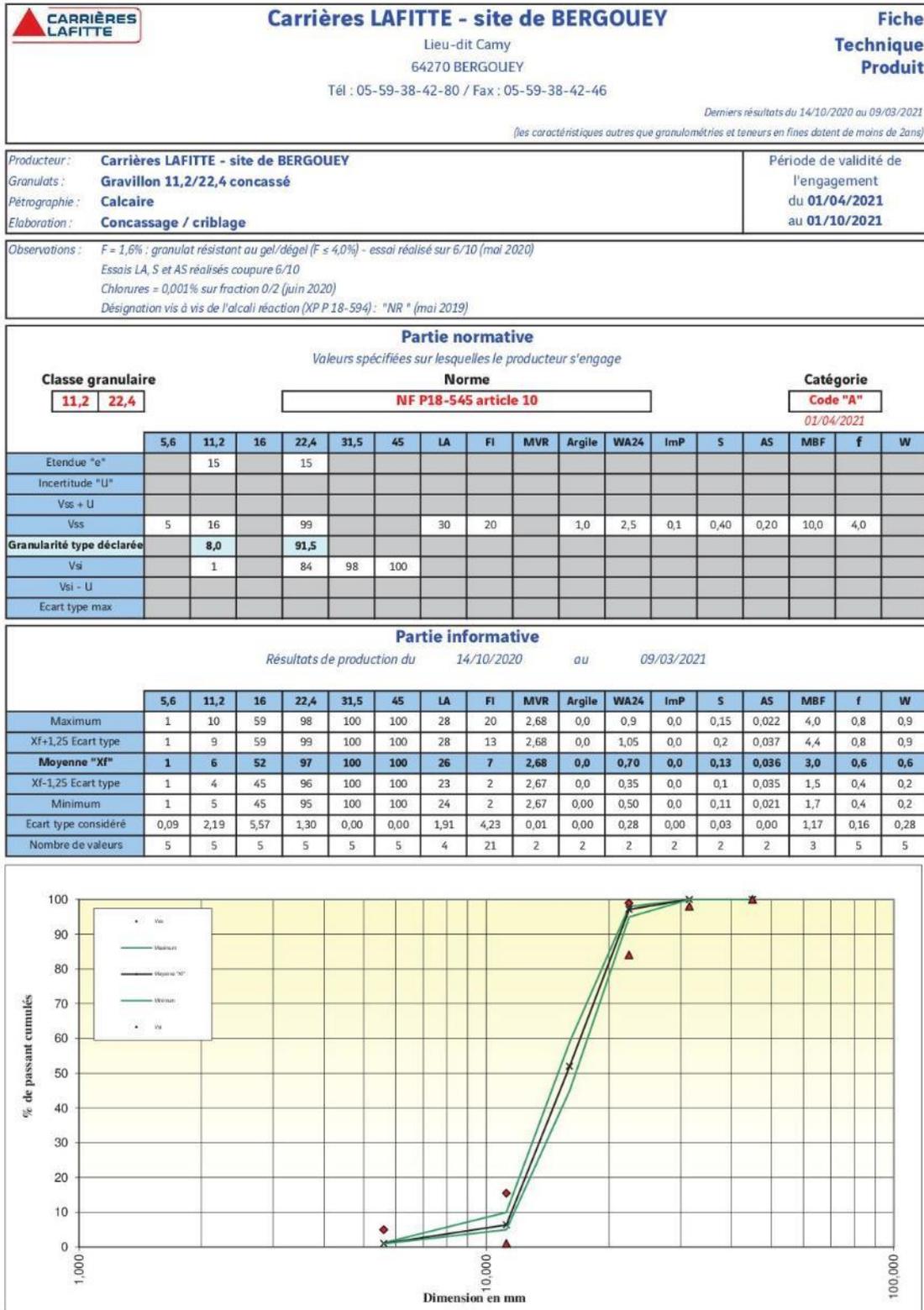


Figure 16 : Fiche technique gravillon 11/22C



Fiche Technique Produit établie par DTE Sud-Ouest

