

EVALUATION TECHNIQUE DE PRODUITS ET MATERIAUX N° ETPM-18/0056-A du 2 février 2022

concernant le produit de « ciment pour béton »
« H-UKR »



Première édition :
Evaluation Technique de Produits et Matériaux
ETPM-18/0056 du 30 mars 2020

Deuxième édition :
Evaluation Technique de Produits et Matériaux
ETPM-18/0056-A du 2 février 2022

Titulaire : HOFFMANN GREEN CEMENT TECHNOLOGIES
6 rue de la Bretauière
85310 CHAILLE SOUS LES ORMEAUX

Usine : HOFFMANN GREEN CEMENT TECHNOLOGIES
57 rue Archereau
85480 BOURNEZEAU

Cette Evaluation Technique comporte 58 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 pour béton : H-UKR

DEFINITION SUCCINCTE

Le ciment H-UKR est un ciment à faible empreinte carbone à base de laitier suractivé. Le ciment H-UKR est destiné à la réalisation de bétons structuraux et non structuraux à partir de sites de production type usine de préfabrication, centrale à béton BPE, centrale à béton foraine sur chantier.

Le ciment H-UKR est un premix obtenu par mélange, dont les constituants principaux sont les laitiers et des activateurs carbo-silicates.

Le ciment H-UKR est un ciment réactif (alcali-activation), qui se distingue des ciments traditionnels par sa composition, présentée dans le **Tableau 1** ci-dessous :

Tableau 1 : Composition des ciments H-UKR

Les % indiqués sont des pourcentages massiques		Ciment H-UKR E	Ciment H-UKR BAP-N	Ciment conforme NF EN 197-1	Ciment conforme NF EN 15743
Constituants	Laitier	S = 79 à 85%	S = 70 à 76%	$36 \leq S \leq 95\%$ pour les CEM III	$S \geq 75\%$
	Activateur carbo-silicate	Silicate de sodium et carbonate de sodium 10 à 18%	Silicate de sodium et carbonate de sodium 10 à 18%	Non couvert	Non couvert L'activateur utilisé est un sulfate de calcium : $5 \leq Cs \leq 20\%$
Autres constituants	Clinker	K = 0%	K = 0%	$K \geq 5\%$ minimum	$0 < K \leq 5\%$
	Constituants secondaires	A = 3 à 5% Matériaux minéraux naturels spécialement sélectionnés répondant à la norme NF EN 12620 et/ou matériaux minéraux dérivés du procédé de production de la chaux aérienne ou de la chaux hydraulique naturelle conforme à l'EN 459-1	A = 9 à 11% Matériaux minéraux naturels spécialement sélectionnés répondant à la norme NF EN 12620 et/ou matériaux minéraux dérivés du procédé de production de la chaux aérienne ou de la chaux hydraulique naturelle conforme à l'EN 459-1	A = 0 à 5%	A = 0 à 5%

NF EN 197-1 (Avril 2012) : Ciment – Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants
NF EN 15743+A1 (Juin 2015) : Ciment sursulfaté - Composition, spécifications et critères de conformité.

La présente ETPM porte sur :

- Le ciment H-UKR (dénomination associée à une seule recette dont la formulation unique a été communiquée au CSTB)
- Plusieurs formulations de béton fabriqués avec le ciment H-UKR, notamment les formulations de béton utilisées pour la caractérisation du comportement au fluage, la caractérisation de l'adhérence acier / béton ainsi que pour les essais de durabilité.

Après coulage, ces bétons peuvent subir un traitement thermique ou être conservés en condition ambiante. Le comportement des bétons à base de ciment H-UKR, vis-à-vis de l'étuvage, n'a néanmoins pas été étudié dans le cadre de la présente ETPM.

Les applications envisagées des bétons à base de ciment H-UKR sont les mêmes que celles d'un béton traditionnel. Les principales sont les suivantes :

- Superstructure : ouvrages coulés en place de type voiles, poteaux, poutres, planchers en dalle pleine, table de compression de planchers mixtes bois-béton, table de compression de planchers à bac acier collaborant...
- Infrastructures : fondations, semelles, massifs, longrines, radiers, murs enterrés...
- Dallage
- Gros béton, béton de propreté
- Eléments en béton préfabriqués : longrines, poteaux, poutres, escaliers, prémurs, candélabres, etc...

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.

Note : la gamme H-UKR se décline en deux ciments destinés à réaliser des bétons structuraux et non structuraux bas carbone :

- H-UKR E : ciment pur
- H-UKR BAP N : ciment pur + mélange de filler calcaire.

L'évaluation, ainsi que les résultats d'essais analysés pour cette ETPM, portent principalement sur le ciment pur de dénomination commerciale H-UKR E. Lorsque, dans la présente ETPM, il est fait référence au ciment H-UKR, il s'agit du ciment H-UKR E. Néanmoins, des essais ont également été effectués sur des formulations de bétons à base de H-UKR BAP N, pour plus de clarté, la formulation testée a été présentée comme mélange du ciment pur H-UKR E et son filler.

EVALUATION TECHNIQUE

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

L'évaluation est basée, lorsque cela a été possible, sur une approche comparative du ciment H-UKR avec un liant hydraulique de type ciment Portland CEM I 52,5 ou un ciment aux laitiers de type CEM III/B 42,5 N. Les bétons testés, à base de ciment H-UKR, n'ont pas été adjuvantés.

Temps de prise

L'essai normalisé, avec l'appareil Vicat, selon la norme NF EN 196-3 est non adapté à la mesure sur ciment H-UKR par la formation d'une croûte en surface de l'échantillon perturbant la mesure du temps de début de prise. Le comportement thixotropique du ciment H-UKR perturbe la mesure de l'enfoncement de l'aiguille de l'appareil de mesure.

Afin de palier à ces problématiques de mesure de temps de prise sur mortier normalisé, des essais de temps de prise sur béton ont été réalisés sur des formulations à base de ciment H-UKR. Ces essais ont été réalisés selon la norme ASTM C 403/C 403 M (janvier 2016) : « Méthode d'essais pour la détermination du temps de prise sur béton par résistance à la pénétration » sur deux formulations différentes. Cette méthode d'essai permet de déterminer le temps de prise du béton, au moyen de mesures de résistance à la pénétration sur le mortier tamisé du mélange de béton.

- Formule F1 avec un dosage en ciment H-UKR de 345 kg/m³, filler à 35 kg/m³ et un rapport E_{ff}/C de 0,46 ;
- Formule F2 avec un dosage en ciment H-UKR de 400 kg/m³, filler à 45 kg/m³ et un rapport E_{ff}/C de 0,44.

Les temps de prise obtenus en laboratoire à 20°C et une hygrométrie > 65 % sont (voir **Figure 1** ci-après) de :

- Temps de début de prise 320 et 340 minutes respectivement pour les bétons F1 et F2 ;
- Temps de fin de prise 410 et 390 minutes respectivement pour les bétons F1 et F2.

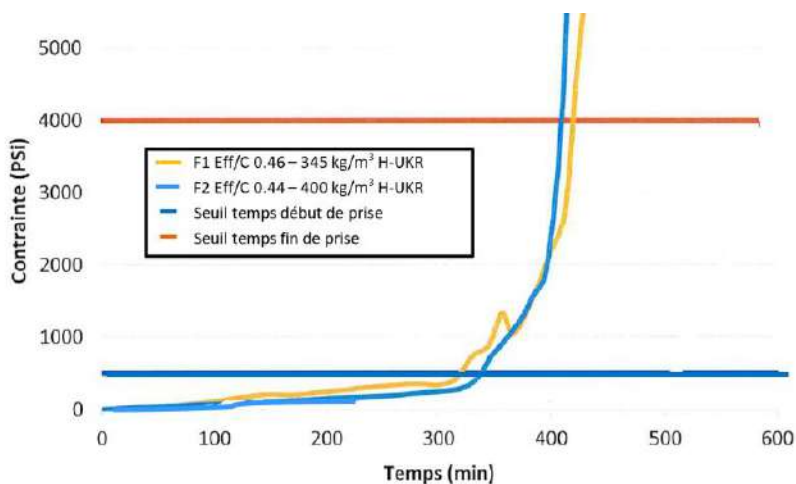


Figure 1 : Temps de prise sur béton H-UKR, mesures effectuées selon la norme ASTM C403

Ces essais permettent de justifier que le ciment H-UKR dispose d'un temps de début de prise supérieur aux 45 minutes (exigence relative aux ciments conformes à la norme NF EN 197-1, d'une classe de résistance 52,5).

Variations dimensionnelles sur mortier et sur béton

Les variations dimensionnelles ont été déterminées conformément à la norme NF P15-433 sur des éprouvettes de mortier normalisé (avec un rapport E/C ajusté à 0,45) de dimensions 40 mm x 40 mm x 160 mm et conduisent aux résultats suivants :

Tableau 2 : Retraits sur mortier

	Mortier avec ciment H-UKR
Retrait endogène (conservation 20°C)	1 020 µm/m après 28 jours 1 820 µm/m après 367 jours
Retrait total (conservation 20°C et 50%HR)	1 810 µm/m après 28 jours 3 210 µm/m après 367 jours

L'activation alcaline du laitier est connue pour provoquer un retrait plus important que celui du ciment Portland.

Les valeurs de retrait total du ciment H-UKR sont très supérieures à celles d'un ciment Portland (le retrait total d'un mortier de ciment courant est d'environ 800 à 1000 µm/m à 28 jours).

A titre de complément, des mesures comparatives de retrait endogène et de retrait total, selon la norme NF EN 12390-13, ont été effectuées sur plusieurs formulations de béton à structure granulaire équivalente et classe de résistance comparable (béton à base de ciment H-UKR, béton à base de CEM I et béton à base de CEM III). Les formulations et les mesures sont présentés dans le dossier technique [Tableau 25](#) et [Figure 10](#).

Tableau 3 : Retraits sur béton

	Béton avec ciment H-UKR	Béton avec ciment Portland	Béton avec ciment aux laitiers
Données béton	Dosage liant : 344 kg/m³ + filler 36 kg/m³ E _{eff} /C : 0,47 (soit E/C réel : 0,52 en tenant compte de l'eau présente dans l'activateur) R _{Cmoy, 28j} : 63,5 MPa	Dosage liant : 340 kg/m³ + filler 40 kg/m³ E _{eff} /C : 0,47 R _{Cmoy, 28j} : 53,2 MPa	Dosage liant : 380 kg/m³ E _{eff} /C : 0,45 R _{Cmoy, 28j} : 56,7 MPa
Retrait endogène	490 µm/m après 350 jours	100 µm/m après 350 jours	270 µm/m après 294 jours
Retrait total	800 µm/m après 350 jours	410 µm/m après 350 jours	540 µm/m après 294 jours

Ces résultats mettent également en évidence les retraits plus élevés générés par l'utilisation du ciment H-UKR, par rapport à des ciments courants relevant de la norme NF EN 197-1, comportement à prendre en compte lors du dimensionnement des ouvrages.

A résistance équivalente, il convient ainsi de prendre en compte que le retrait total d'un béton à base de ciment H-UKR est le double de celui d'un béton à base de ciment Portland de type CEM I.

Caractéristiques mécaniques sur mortiers normalisés et sur bétons

- Caractéristiques sur mortiers normalisés

Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes de mortier normalisé (avec un rapport E/C ajusté à 0,45).

Les résistances à la compression déterminées selon la norme NF EN 196-1 sur des éprouvettes de mortier normalisé avec ciment H-UKR sont données dans la Figure 4 et les tableau 7 et 8 du dossier technique. Le mode de conservation des éprouvettes est une conservation à l'air.

Les valeurs moyennes sont de l'ordre de 25,4 MPa à 24 heures, de 49 MPa à 7 jours et de l'ordre de 62 MPa à 28 jours. A long terme (420 jours), la résistance à la compression est comprise entre 69 et 77 MPa (pour ces derniers résultats, la formulation des mortiers a été effectuée avec un rapport E/C de 0,47 au lieu de 0,45).

Les résistances à la flexion déterminées selon la norme NF EN 196-1 sur des éprouvettes de mortier normalisé avec ciment H-UKR sont données dans la Figure 6 du dossier technique.

Les valeurs moyennes sont de l'ordre de 8 à 9 MPa à 28 jours et 11 MPa à 120 jours.

Ces caractéristiques sont données pour un mortier normalisé à base de H-UKR avec un rapport E/C ajusté à 0,45 pour tenir compte de l'eau incluse dans l'activateur.

- Caractéristiques mécaniques sur bétons

Des mesures comparatives de résistance en compression et de module d'élasticité à 28 jours selon les normes NF EN 12390-3 et NF EN 12390-13, ont été menées sur des bétons à base de ciment H-UKR et sur des bétons à base de ciment Portland de type CEM I. Pour chaque type de ciment, 3 formulations de béton ont été réalisées en faisant varier le rapport E/C, éprouvettes étant conservées en eau à $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Les résultats sont présentés dans le dossier technique **Tableau 24**.

Tableau 4 : Caractéristiques mécaniques sur béton

Classe de résistance	Béton avec ciment H-UKR Résistance en compression (MPa) Module d'Young (MPa)	Béton avec ciment Portland CEM I Résistance en compression (MPa) Module d'Young (MPa)
Béton type C25/30	$R_{Cmoy,28j} = 30,6$ $E_{moy,28j} = 30\ 800$	$R_{Cmoy,28j} = 32,7$ $E_{moy,28j} = 28\ 400$
Béton type C30/37	$R_{Cmoy,28j} = 38,7$ $E_{moy,28j} = 31\ 500$	$R_{Cmoy,28j} = 37,8$ $E_{moy,28j} = 31\ 600$
Béton type C35/45	$R_{Cmoy,28j} = 42,2$ $E_{moy,28j} = 30\ 400$	$R_{Cmoy,28j} = 44,3$ $E_{moy,28j} = 31\ 800$

Ces résultats indiquent que pour une même classe de résistance en compression, le module d'élasticité d'un béton fabriqué avec le ciment H-UKR est comparable à celui du béton Portland CEM I.

Comportement contrainte-déformation sur béton

Afin de vérifier si la loi de comportement des bétons à base de liant H-UKR est conforme aux prescriptions de l'Eurocode NF EN 1992-1-1 (relation contrainte-déformation pour l'analyse structurale non linéaire selon le §3.1.5 de la NF EN 1992-1-1 et modèles de calcul selon le §3.1.6 de la NF EN 1992-1-1, il a été réalisé des essais monotones de compression permettant de déterminer la courbe contrainte normale déformation des bétons.

La figure ci-dessous présente le comportement contrainte-déformation sur éprouvettes de béton H-UKR et Portland.

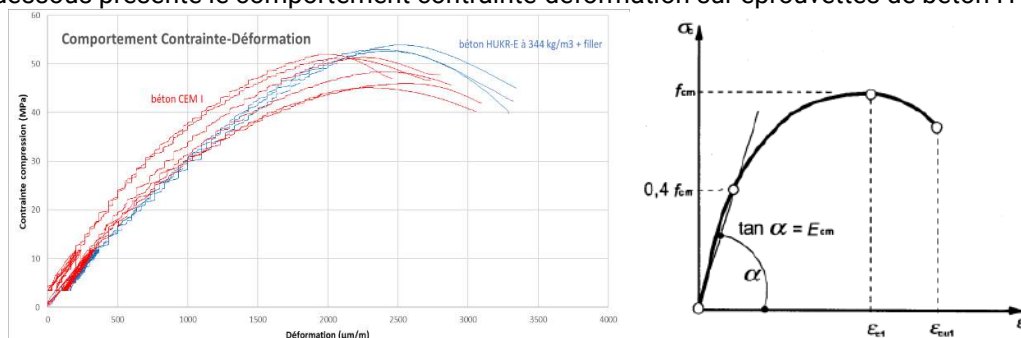


Figure 2 : Comportement contrainte-déformation sur éprouvettes de béton H-UKR et Portland

Les résultats sont présentés **Tableau 30** et **Figure 12** du dossier technique.

La relation entre σ_c et ε_c pour le chargement uni-axial de courte durée peut s'appliquer aux bétons à base de ciment H-UKR. Cette relation est vérifiée pour toute valeur de $|\varepsilon_c|$ dans l'intervalle $0 < |\varepsilon_c| < |\varepsilon_{cu1}|$, où ε_{cu1} est la valeur nominale de la déformation ultime.

Comportement au fluage en compression sur béton

Des essais de fluage en compression d'une formulation de béton avec ciment H-UKR E dosé à $344 \text{ kg/m}^3 + 36 \text{ kg/m}^3$ de filler ont été effectués. Les résultats sont présentés **Figures 8** du dossier technique.

Le fluage a été effectué à un niveau de chargement de 40% de la charge à rupture mesurée à 28 jours.

Les bétons testés ont été caractérisés. Leurs caractéristiques sont présentées dans le **Tableau 26** du dossier technique

Pour le béton H-UKR, les résultats des essais de fluage en compression montrent que la déformation totale sous chargement est la suivante :

- en mode dessiccation, après 364 jours : $8690 \mu\text{m/m}$
- en mode endogène, après 364 jours : $1580 \mu\text{m/m}$

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

- Retrait de dessiccation, après 364 jours : $700 \mu\text{m/m}$
- Retrait endogène, après 364 jours : $200 \mu\text{m/m}$.

La **Figure 3** ci-dessous présente les coefficients de fluage en compression des éprouvettes de béton.

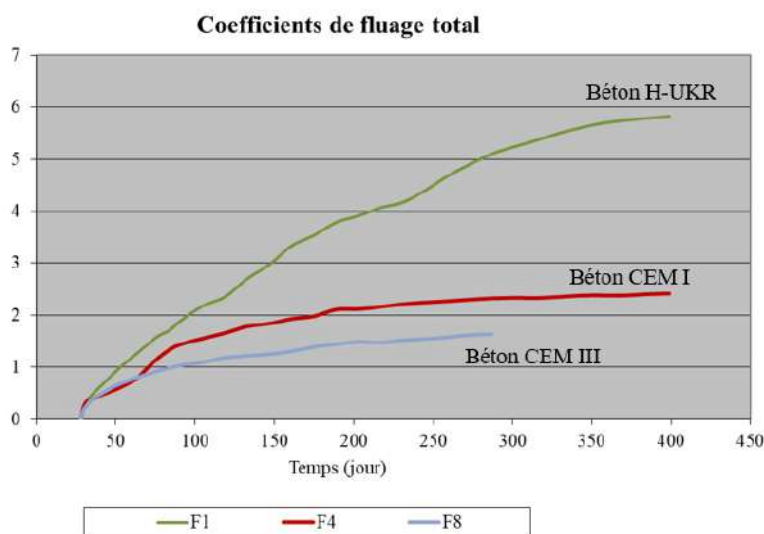


Figure 3 : Coefficients de fluage total en compression du béton H-UKR et des bétons de référence

A résistance équivalente, le coefficient de fluage d'un béton à base de ciment H-UKR est environ trois fois plus élevé que celui d'un béton à base de ciment Portland de type CEM I.

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 HA8, HA12 et HA25 et une formulation de béton avec ciment H-UKR, en comparaison avec le même béton avec un liant Portland ont été effectués. Les résultats sont présentés **Tableau 28** du dossier technique.

Tableau 5 : Adhérence entre les armatures et le béton H-UKR

Type de ciment (dosage)	Résistance le jour d'essai (MPa) (série de 3 essais)	Contrainte d'adhérence acier / béton τ (série de 5 essais)
Armature HA Ø8 mm		
Ciment H-UKR E (dosage : 320 kg/m ³) E _{eff} /C = 0,54	<u>Compression</u> f _c = 53,7 MPa à 48 j <u>Fendage</u> Pas de données	τ = 21,9 MPa
Ciment Portland (dosage : 310 kg/m ³) E _{eff} /C = 0,60	<u>Compression</u> f _c = 50,4 MPa à 27 j <u>Fendage</u> Pas de données	τ = 18,5 MPa
Armature HA Ø12 mm		
Ciment H-UKR E (dosage : 380 kg/m ³) E _{eff} /C = 0,47	<u>Compression</u> f _c = 41,3 MPa à 7 j f _c = 53,7 MPa à 28 j f _c = 60,5 MPa à 90 j <u>Fendage</u> f _{tf} = 3,15 MPa à 90 j	7 jours : τ = 31,6 MPa 28 jours : τ > 32,9 MPa* 90 jours : τ > 33,2 MPa* * : ruine par rupture acier
Ciment Portland (dosage : 344 kg/m ³ + filler) E _{eff} /C = 0,49	<u>Compression</u> f _c = 57,7 MPa à 7 j f _c = 56,4 MPa à 28 j f _c = 64,3 MPa à 90 j <u>Fendage</u> Pas de données	7 jours : τ = 31,9 MPa 28 jours : τ = 32,2 MPa 90 jours : τ = 33,4 MPa
Armature HA Ø25 mm		
Ciment H-UKR E (dosage : 320 kg/m ³) E _{eff} /C = 0,54	<u>Compression</u> f _c = 53,7 MPa à 48 j <u>Fendage</u> Pas de données	τ = 30,9 MPa
Ciment Portland (dosage : 310 kg/m ³) E _{eff} /C = 0,60	<u>Compression</u> f _c = 50,4 MPa à 27 j <u>Fendage</u> Pas de données	τ = 21,3 MPa

Pour les 3 diamètres d'armatures testés, à résistance en compression du béton comparable, les performances d'adhérence d'une armature sur un béton H-UKR sont à minima équivalentes à celles sur un béton avec un liant Portland.

Durabilité

La durabilité des bétons H-UKR a été évaluée à partir d'essais en laboratoire. L'évaluation des résultats s'appuie sur le projet de norme prFD P18-480 [34] 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 6, 8 et 10** repris dans les paragraphes suivants, sont extraits du projet de norme prFD P18-480 [34]. Ils présentent les seuils de performance sur la base des résultats d'essais en fonction des classes d'exposition.

Pour l'ensemble des risques, des essais comparatifs ont été réalisés sur des formulations similaires avec des ciments CEM I et éventuellement CEM III.

Les **tableaux 7, 9 et 11** sont mis en vis-à-vis des résultats des essais déterminés sur l'ensemble des bétons.

Préambule à l'évaluation de la durabilité des bétons H-UKR par le projet de norme prFD P18-480 :

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 H-UKR 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 H-UKR 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 performancielle définie dans le projet de norme prFD P18-480 pour les classes d'exposition XC, est basée sur les résultats de l'un des deux essais suivants :

- carbonatation accélérée selon la norme NF EN 12390-12 ;
- porosité accessible à l'eau selon la norme NF P18-459.

Le **Tableau 6** ci-dessous présente les seuils de performance pour ces deux essais.

Tableau 6 : Seuils de performance (à 50 ans et 100 ans) selon prFD P18-480 pour les classes d'exposition XC

Classe d'exposition	Module selon la classe de résistivité à 90 j ($\Omega.m$)	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 7** synthétise les résultats des mesures des grandeurs après 90 jours de cure humide pour les différents bétons et comparés aux seuils du **Tableau 6**. Sur la base du critère de vitesse de carbonatation. Cette comparaison permet de définir les classes de durabilité des bétons pour le comportement vis-à-vis de la corrosion par carbonatation.

Dans l'ensemble des cas nous basons notre évaluation sur la vitesse de carbonatation et ses seuils vis-à-vis des classes d'exposition.

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 ($\Omega.m$)	Vitesse caractéristique de carbonatation accélérée $V_{acc,90j}$ (mm/(jour) ^{0.5})	Porosité caractéristique accessible à l'eau / Fraction volumique de pâte $P_{eau,90j}/fV_p$ (%)	Classe exposition justifiée pour une DUP de 50 ans	Classe d'exposition justifiée pour une DUP de 100 ans
Bétons à base de H-UKR	Dosage 380 kg/m ³ , granulats faible absorption <1%	294	1,7	44,6**	XC1, XC2, XC3 et XC4*	XC1, XC2, XC3 et XC4*
	Dosage 350 kg/m ³ , granulats faible absorption <1%	Non mesurée (hypothèse > 175)	2,0	45,5**	XC1, XC2, XC3 et XC4*	XC1, XC2, XC3 et XC4*
	Dosage 320 kg/m ³ + 60 kg/m ³ filler, granulats faible absorption <1%	Non mesurée (hypothèse > 175)	2,1	46,2**	XC1, XC2, XC3 et XC4*	XC1, XC2 et XC4*
	Dosage 380 kg/m ³ , granulats absorption 1.4 à 2.6%	197	2,2	53,0**	XC1, XC2, XC3 et XC4*	XC1, XC2 et XC4*
	Dosage 350 kg/m ³ , granulats absorption 1.4 à 2.6%	193	2,6	51,6**	XC1, XC2 et XC4*	XC1, XC2
	Dosage 320 kg/m ³ , + 60 kg/m ³ filler granulats absorption 1.4 à 2.6%	188	2,4	53,7**	XC1, XC2 et XC4*	XC1, XC2
Bétons à base de CEM I	Dosage 335 kg/m ³ , granulats faible absorption <1%	Non mesurée (hypothèse < 100)	0,3	36,4	XC1, XC2, XC3 et XC4*	XC1, XC2, XC3 et XC4*
	Dosage 335 kg/m ³ , granulats absorption 1.4 à 2.6%	46	0,7	51,0	XC1, XC2, XC3 et XC4*	XC1, XC2, XC3 et XC4*
Béton à base de CEM III	Dosage 350 kg/m ³ , granulats faible absorption <1%	Non mesurée (hypothèse > 175)	1,0	40,9	XC1, XC2, XC3 et XC4*	XC1, XC2, XC3 et XC4*
	Dosage 350 kg/m ³ , granulats absorption 1.4 à 2.6%	384	1,2	53,3	XC1, XC2, XC3 et XC4*	XC1, XC2, XC3 et XC4*

Note 1 : selon le prFD P18-480, les valeurs avec * sont liées à un enrobage supérieur à celui correspondant à la classe XC3 et à la forte résistivité du béton qui freine la propagation de la corrosion.

Note 2 : les valeurs avec ** sont données à titre indicatives et ne sont pas utilisées pour la vérification de la classe d'exposition.

Note 3 : les essais de carbonatation accélérée selon la norme NF EN 12390-12 ont été réalisés 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.

Des essais complémentaires de carbonatation accélérée comparatifs ont été réalisées sur des éprouvettes de mortier et de béton fabriqués avec le ciment H-UKR et des ciments de référence CEM I et CEM III/B. Les résultats sont présentés dans la **Figure 13** et la **Figure 14** du dossier technique. Les essais ont été réalisés en faisant varier les paramètres E/C, la durée de cure (28 ou 90 jours) et la nature de la cure (humide ou à l'air 20°C/65%HR) avant les essais de carbonatation.

Les résultats déterminés permettent de montrer que :

- Les vitesses de carbonatation d'un mortier H-UKR par rapport à celles d'un mortier CEM III sont plus faibles lorsque la cure est à l'air (cure plus sécuritaire et représentative des conditions de maturation sur chantier).
- Les vitesses de carbonatation déterminées sur les bétons à base de ciment H-UKR sont plus élevée que celles sur les bétons à base de CEM I.
- Les vitesses de carbonatation déterminées sur les bétons à base de ciment H-UKR sont proches de celles des bétons à base de CEM III/B lorsque la cure est à l'air.
- La nature des granulats (absorption d'eau) impacte la vitesse de carbonatation des bétons fabriqués avec les 3 types de ciment.

Risque de corrosion des aciers induites par les ions chlorures de l'eau de mer des bétons à base de H-UKR (classes d'exposition XS)

La justification performancielle définie dans le projet de norme prFD P18-480 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 8** ci-dessous présente les seuils de performance pour cet essai.

Tableau 8 : Seuils de performance (à 50 ans et 100 ans) selon prFD P18-480 (* $P_{\text{eau},90j} < 13,5\%$) pour les classes d'exposition XS

Classe d'exposition	Modulation selon la classe de facteur de vieillissement	Coefficient caractéristique de migration des ions chlorures $D_{\text{rcm},90j}$ ($\times 10^{-12}$ 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 9, page suivante, synthétise les résultats des mesures des grandeurs après 90 jours de cure humide pour les différents bétons et comparés aux seuils du Tableau 8. 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 9 : Grandeurs associées à la durabilité mesurées sur les différentes formulations de béton

Formulation béton		Facteur de vieillissement	Coefficient caractéristique de migration des ions chlorures $D_{cm,90j}$ ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Classe exposition justifiée pour une DUP 50 ans	Classe d'exposition justifiée pour une DUP 100 ans
Bétons à base de H-UKR	Dosage 380 kg/m ³ , granulats faible absorption <1%	0,40 à 0,49	0,4	Sera évaluée après la réalisation des essais selon la norme NF EN 12390-11	
	Dosage 350 kg/m ³ , granulats faible absorption <1%	0,40 à 0,49	1,4		
	Dosage 320 kg/m ³ , + 60 kg/m ³ filler granulats faible absorption <1%	0,40 à 0,49	1,8		
	Dosage 380 kg/m ³ , granulats absorption 1.4 à 2.6%	0,40 à 0,49	1,4		
	Dosage 350 kg/m ³ , granulats absorption 1.4 à 2.6%	0,40 à 0,49	1,9		
	Dosage 320 kg/m ³ , + 60 kg/m ³ filler granulats absorption 1.4 à 2.6%	0,40 à 0,49	1,3		
Bétons à base de CEM I	Dosage 335 kg/m ³ , granulats faible absorption <1%	0,3	20,8	XS1 (avec $P_{eau,90j} < 13,5\%$)	néant
	Dosage 335 kg/m ³ , granulats absorption 1.4 à 2.6%	0,3	29,3	néant	néant
Béton à base de CEM III	Dosage 350 kg/m ³ , granulats faible absorption <1%	0,44	2,5	XS3m	XS3m
	Dosage 350 kg/m ³ , granulats absorption 1.4 à 2.6%	0,44	1,3	XS3m	XS3m

Les mesures des grandeurs associées à la durabilité vis-à-vis de la corrosion par les chlorures de l'eau de mer, et les résultats comparatifs avec les bétons à base de ciments normés de type CEM I et CEM III/B montrent que les valeurs de coefficient de migration des ions chlorures sont équivalentes entre des bétons à base de ciment H-UKR et celui du béton de référence à base de CEM III/B.

Néanmoins, l'essai de migration des ions chlorure en régime non stationnaire selon la norme XP P 18-459 est un essai accéléré. Il pourrait ne pas reproduire de façon satisfaisante les processus de modifications physico-chimiques des bétons.

L'évaluation du risque de corrosion sera réalisée sur la base d'un essai plus proche du vieillissement naturel. **Des essais comparatifs seront menés selon la norme d'essais NF EN 12390-11 (durée des essais 6 à 7 mois). Les 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 H-UKR (classes d'environnement XD)

La justification performancielle définie dans le projet de norme prFD P18-480 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 10** ci-dessous présente les seuils de performance pour cet essai.

Tableau 10 : Seuils de performance (à 50 ans et 100 ans) selon prFD P18-480 (* $P_{\text{eau},90j} < 13,5\%$) pour les classes d'exposition XD

Classe d'exposition	Modulation selon la classe de facteur de vieillissement	Coefficient caractéristique de migration des ions chlorures $D_{\text{rcm},90j}$ ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	
		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 11** synthétise les résultats des mesures des grandeurs après 90 jours de cure humide pour les différents bétons et comparés aux seuils du **Tableau 10**. Cette comparaison permet de définir les classes de durabilité des bétons pour le comportement de la corrosion par les chlorures autres que ceux de l'eau de mer.

Tableau 11 : Grandeurs associées à la durabilité mesurées sur les différentes formulations de béton

Formulation béton		Facteur de vieillissement	Coefficient caractéristique de migration des ions chlorures $D_{\text{rcm},90j}$ ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Classe exposition justifiée pour une DUP 50 ans	Classe d'exposition justifiée pour une DUP 100 ans
Bétons à base de H-UKR	Dosage 380 kg/m ³ , granulats faible absorption <1%	0,40 à 0,49	0,4	Sera évaluée après la réalisation des essais selon la norme NF EN 12390-11	
	Dosage 350 kg/m ³ , granulats faible absorption <1%	0,40 à 0,49	1,4		
	Dosage 320 kg/m ³ , + 60 kg/m ³ filler granulats faible absorption <1%	0,40 à 0,49	1,8		
	Dosage 380 kg/m ³ , granulats absorption 1.4 à 2.6%	0,40 à 0,49	1,4		
	Dosage 350 kg/m ³ , granulats absorption 1.4 à 2.6%	0,40 à 0,49	1,9		
	Dosage 320 kg/m ³ , + 60 kg/m ³ filler granulats absorption 1.4 à 2.6%	0,40 à 0,49	1,3		
Bétons à base de CEM I	Dosage 335 kg/m ³ , granulats faible absorption <1%	0,3	20,8	XD1 (avec $P_{\text{eau},90j} < 13,5\%$)	XD1 (avec $P_{\text{eau},90j} < 13,5\%$)
	Dosage 335 kg/m ³ , granulats absorption 1.4 à 2.6%	0,3	29,3	néant	néant
Béton à base de CEM III	Dosage 350 kg/m ³ , granulats faible absorption <1%	0,44	2,5	XD3tf	XD3tf
	Dosage 350 kg/m ³ , granulats absorption 1.4 à 2.6%	0,44	1,3	XD3tf	XD3tf

Les mesures des grandeurs associées à la durabilité vis-à-vis de la corrosion par les chlorures autres que ceux de l'eau de mer, et les résultats comparatifs avec les bétons à base de ciments normés de type CEM I et CEM III/B montrent que les valeurs de coefficient de migration des ions chlorures sont équivalentes entre des bétons à base de ciment H-UKR et celui du béton de référence à base de CEM III/B.

Néanmoins, l'essai de migration des ions chlorure en régime non stationnaire selon la norme XP P 18-459 est un essai accéléré. Il pourrait ne pas reproduire de façon satisfaisante les processus de modifications physico-chimiques des bétons.

L'évaluation du risque de corrosion sera réalisée sur la base d'un essai plus proche du vieillissement naturel. **Des essais comparatifs seront menés selon la norme d'essais NF EN 12390-11 (durée des essais 6 à 7 mois). Les 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 aux cycles de gel/dégel sont présentés **Figure 15 à Figure 21** du dossier technique.

Une étude complémentaire a été menée par le Cerema [36] pour évaluer les possibilités d'emploi de plusieurs formulations bétons H-UKR pour les classes d'exposition XF1 à XF4 au sens de la norme NF EN 206/CN. Cette étude est basée sur les recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel [35] et son projet de révision (juillet 2021). Cette démarche a été étendue par le CSTB à l'ensemble des essais de gel présenté dans le dossier technique.

Tableau 12 : Vérification des bétons H-UKR vis-à-vis des classes d'environnement XF

Liant	CEM I	H-UKR E	H-UKR E	H-UKR E	H-UKR E	CEM III/A	H-UKR BAP N (entraîneur air)	H-UKR BAP N (entraîneur air)
Teneur en liant (kg/m ³)	325	317 (premix : 317 kg/m ³ ciment + 33 kg/m ³ filler)	317 (premix : 317 kg/m ³ ciment + 33 kg/m ³ filler)	344	380	360	344 (premix : 344 kg/m ³ ciment + 36 kg/m ³ filler)	344 (premix : 344 kg/m ³ ciment + 36 kg/m ³ filler)
Rapport E _{eff} /C	0,58	0,55	0,55	0,52	0,52	0,47	0,47	0,47
Dureté des gravillons	Mi-durs	Mi-durs	Tendres	Tendres	Tendres	Tendres	Durs	Durs
Absorption des granulats	sable 0/4 : 1,4% Gravier 4/11.2 : 2,8%	sable 0/4 : 1,4% Gravier 4/11.2 : 2,8%	sable 0/4 : 2,8% Gravier 4/12 : 3,7%	sable 0/4 : 2,8% Gravier 4/12 : 3,7%	sable 0/4 : 2,8% Gravier 4/12 : 3,7%	sable 0/4 : 2,8% Gravier 4/12 : 3,7%	sable 0/4 : 0,2% Gravier 6/10 : 0,7%	sable 0/4 : 0,2% Gravier 6/10 : 0,7%
Résistance en compression (en MPa)	25,3	45,9	44,2	43,3	45,7	43,2	58,1	51,3
Seuils : ≥ C30/37 pour XF3 (G)	nok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
Norme dessin	NF P18-425	NF P18-425	NF P18-425	NF P18-424	NF P18-424	NF P18-424	NF P18-424	NF P18-424
Nb de cycles appliqués (exigence : atteinte des 300 cycles)	252 nok	308 ok	224 nok	168 nok	168 nok	112 nok	308 ok	308 ok
Allongement relatif (µm/m)	425	2659	5269	7108	6966	3550	55	115
Seuils : ≤ 400 µm/m pour XF3 (G)	ok	nok	-	-	-	-	ok	ok
Rapport des carrés des fréquences de résonance (%)	75,8	27,5	3,5	10,5	2,9	65,2	93,82	94,64
Seuils : ≥ 75 % pour XF3 (G)	-	nok	-	-	-	-	ok	ok
Classe d'exposition validée	aucune	aucune	aucune	aucune	aucune	aucune	XF1 et XF3	XF1 et XF3
PV de référence	CSTB/EGIS (pv 20-26085648-A)	CSTB/EGIS (pv 20-26085648-A)	CSTB/EGIS (pv 20-26085648-A)	CSTB/EGIS (pv 20-26085648-A)	CSTB/EGIS (pv 20-26085648-A)	CSTB/EGIS (pv 20-26085648-A)	CSTB/EGIS (pv 20-26085648-B)	CSTB/EGIS (pv 20-26085648-B)

Liant	H-UKR E	CEM I	H-UKR E	H-UKR E (entraîneur air : 0,4%)	H-UKR E	H-UKR E	H-UKR E	H-UKR E	CEM III/B
Teneur en liant (kg/m ³)	317 (premix : 317 kg/m ³ ciment + 33 kg/m ³ filler)	325	407 (premix : 407 kg/m ³ ciment + 43 kg/m ³ filler)	400	360 kg/m ³ ciment + 30 kg/m ³ filler	420	317	344	360
Rapport E _{eff} /C	0,55	0,58	0,51	0,49	0,48	0,4	0,51	0,51	0,47
Dureté des gravillons	Durs	Durs	Durs	Durs	Mi-durs	Mi-durs	Mi-durs	Mi-durs	Mi-durs
Absorption des granulats	sable 0/2 : 3,9% sable 0/4 : 0,7% Gravier 4/11 : 0,9%	sable 0/2 : 3,9% sable 0/4 : 0,7% Gravier 4/11 : 0,9%	sable 0/4 : 0,8% Gravier 4/10 : 0,9% Gravier 11/22 : 0,4%	sable 0/4 : 0,7% Gravier 6.3/10 : 0,7%	sable 0/4 : 1,4% Gravier 4/11.2 : 2,8%	sable 0/4 : 1,4% Gravier 4/11.2 : 2,8%	sable 0/4 : 1,4% Gravier 4/11.2 : 2,8%	sable 0/4 : 1,4% Gravier 4/11.2 : 2,8%	sable 0/4 : 1,4% Gravier 4/11.2 : 2,8%
Résistance en compression (en MPa)	non mesurée	non mesurée	48,6	50,9	40,7	48,1	41,7	47,3	41,8
Seuils : ≥ C30/37 pour XF3 (G)	-	-	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
Norme dessin	NF P18-425	NF P18-425	NF P18-425	NF P18-425	NF P18-425	NF P18-425	NF P18-425	NF P18-425	NF P18-425
Nb de cycles appliqués (exigence : atteinte des 300 cycles)	308 ok	308 ok	300 ok	300 ok	308 ok	308 ok	308 ok	308 ok	308 ok
Allongement relatif (µm/m)	188	175	298	15	257	260	123	85	110
Seuils : ≤ 400 µm/m pour XF3 (G)	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
Rapport des carrés des fréquences de résonance (%)	99,86	99,88	92	97	95,65	98,64	99,68	99,75	99,65
Seuils : ≥ 75 % pour XF3 (G)	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
Classe d'exposition validée	XF1 et XF2	XF1 et XF2	XF1 et XF2	XF1 et XF2	XF1 et XF2	XF1 et XF2	XF1 et XF2	XF1 et XF2	XF1 et XF2
PV de référence	LD controles (PV 2081724)	LD controles (PV 2081723)	cebt (PV 026364)	cebt (PV 025601)	LD controles (PV 2082315)	LD controles (PV 2082315)	LD controles (PV 2180257)	LD controles (PV 2180258)	LD controles (PV 2180259)

Afin de garantir la satisfaction aux classes d'environnement de résistance au gel, le béton à base de ciment H-UKR devra disposer d'une formulation adaptée avec un choix de granulats disposant d'une absorption répondant aux contraintes de l'essai.

En effet, en considérant l'ensemble des campagnes d'essais de comportement au gel modéré et/ou au gel sévère, il apparait que la satisfaction à certaines classes d'environnement XF dépend principalement de la nature des granulats (leur absorption) et de la compacité de la pâte de ciment (teneur en liant, rapport E_{eff}/C)

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.

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

Alcali-réaction

A défaut de justification particulière, il convient d'utiliser uniquement des granulats non-alcali-réactif en combinaison avec le ciment H-UKR.

Résistance aux attaques acides sulfuriques et sulfatiques externes

Les essais de résistance aux attaques acides sulfuriques sont présentés **Figure 23** et **Figure 24** du dossier technique. Les essais de résistance aux attaques sulfatiques externes sont présentés **Figure 25** à **Figure 27** du dossier technique.

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

Les essais de résistance aux attaques acides sulfuriques montrent que le comportement sur mortier à base de ciment H-UKR est meilleur que celui d'un mortier à base de ciment Portland.

Tableau 13 : Résistance aux attaques acides sulfuriques

	Mortier avec ciment H-UKR	Mortier avec ciment Portland
Attaque acide (5% H ₂ SO ₄)	Après 100 jours : Augmentation massique (de l'ordre de +5%) Pas de variation vitesse ultrasonore	Après 100 jours : variation massique -80%
Attaque acide (10% H ₂ SO ₄)	Après 90 jours : variation massique -15% Variation vitesse ultrasonore -60%	Arrêt à 40 jours (dégradation importante des éprouvettes)

L'attaque acide sur mortier à base de ciment H-UKR se traduit par la formation de produits expansifs (anhydrite, gypse, héli-hydrate).

Vis-à-vis de la résistance aux attaques sulfatiques externes, des essais sont en cours. Ils compléteront les résultats donnés au paragraphe E.f.vi. du dossier technique. Les données actuelles sont jugées insuffisantes pour apporter des conclusions.

Réaction au feu

Les ciments H-UKR bénéficient d'un classement A1.

Sécurité d'utilisation

Les ciments H-UKR ne contiennent pas de substances classées comme substances extrêmement préoccupantes par l'Agence Européenne des produits chimiques (ECHA) conformément à l'article 57 du règlement REACH.

Les ciments H-UKR font l'objet d'une fiche de sécurité type FDS et bénéficient d'un classement A+ pour les émissions de polluants volatils.

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

Environnement

Le ciment H-UKR fait l'objet d'un inventaire de cycle de vie (ICV) disponible sur la base INIES.

Le béton à base de ciment H-UKR fait l'objet de fiches FDES disponibles sur la base INIES.

CONDITIONNEMENT DU CIMENT H-UKR

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

L'aptitude de conditionnement en sac du ciment H-UKR 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 H-UKR met en évidence les points suivants :

- Vis-à-vis du temps de prise : les mesures normalisées de temps de début de prise ne sont pas adaptées au ciment H-UKR du fait de la thixotropie du matériau. Néanmoins, les mesures de temps de prise effectuées selon la norme ASTM C403 ainsi les expériences chantiers présentées montrent un maintien de la rhéologie après 40 minutes de transport en toupie.
- Vis-à-vis des propriétés mécaniques : le ciment H-UKR présente une résistance mécanique (basée sur des valeurs moyennes), sur mortier normalisé, de 25 MPa à 2 jours, 49 MPa à 7 jours et de 62 MPa à 28 jours en compression (sur formulation adaptée de mortier normalisé NF EN 196-1 pour prendre en compte la présence d'eau dans l'activateur).

Sur béton, pour une même classe de résistance, le module d'élasticité d'un béton fabriqué avec le ciment H-UKR est comparable à celui du béton Portland CEM I.

Le comportement contrainte-déformation pour le chargement uni-axial instantané peut s'appliquer aux bétons à base de ciment H-UKR.

- Vis-à-vis du retrait : le ciment H-UKR présente un retrait endogène et un retrait de séchage, sur mortier normalisé et 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 H-UKR est le double de celui d'un béton à base de ciment Portland.
- Vis-à-vis du fluage : le fluage du béton à base de ciment H-UKR est plus important que celui d'un béton à base de CEM I ou à base de CEM III. Il convient de prendre en compte ce constat pour le dimensionnement des éléments de structure associés. Nous pouvons considérer que le coefficient de fluage d'un béton à base de ciment H-UKR est le triple de celui d'un béton à base de ciment Portland.
- Vis-à-vis de l'adhérence acier/béton : des essais comparatifs d'adhérence des aciers dans le béton montrent que les ratios « contrainte d'adhérence / résistance du béton » sont comparables entre un béton à base de ciment H-UKR et un béton à base de ciment Portland.
- Vis-à-vis de la porosité accessible à l'eau : la porosité accessible à l'eau et l'absorption capillaire d'un mortier normalisé à base de ciment H-UKR sont plus élevées que celles d'un mortier normalisé à base de ciment Portland. Ceci est imputé à un diamètre moyen de la porosité plus faible, facilitant l'absorption. Ce constat est également observé sur béton.

- 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 (résistivité, vitesse de carbonatation et porosité à l'eau) et approche comparative.

La vitesse de carbonatation des bétons à base de ciment H-UKR est plus élevée que celle des bétons à base de CEM I ou CEM III/B. La nature des granulats (absorption d'eau) a une incidence sur la vitesse de carbonatation et peut dégrader la classe visée, mais sur l'ensemble des formulations évaluées y compris celles de référence. 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 H-UKR répondent aux classes XC1, XC2 et XC4. Les formulations réalisées avec des granulats faiblement absorbants répondent également à la classe d'exposition XC3. Pour celles n'y répondant pas, une majoration de l'enrobage peut éventuellement être envisagée pour satisfaire cette classe d'exposition. Pour les durées d'utilisation de 100 ans, les classes d'exposition justifiées sont, de la même façon, présentées dans le [Tableau 7](#).

De plus, en comparant les résultats d'essais effectués sur bétons à base de ciments CEM I ou CEM III/B, l'impact de la cure (sa durée ainsi que sa nature : sèche ou humide) sur la profondeur de carbonatation est moins fort sur les échantillons à base de H-UKR que ceux à base de CEM I ou CEM III/B. Une cure sèche étant plus représentative de la situation réelle des éléments d'ouvrage dans le bâtiment (hormis les fondations pouvant être en contact permanent avec un milieu humide), ce constat est rassurant et pondère le constat d'une vitesse de carbonatation plus élevée pour le H-UKR.

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 H-UKR (classes d'exposition XS) : Des valeurs de coefficient de migration des ions chlorures équivalentes entre des bétons à base de ciment H-UKR et celui du béton de référence à base de CEM III/B.

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 H-UKR (classes d'environnement XD) : Des valeurs de coefficient de migration des ions chlorures équivalentes entre des bétons à base de ciment H-UKR et celui du béton de référence à base de CEM III/B.

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 H-UKR devra disposer d'une formulation adaptée.
En effet, en considérant l'ensemble des campagnes d'essais de comportement au gel modéré et/ou au gel sévère, il apparaît que la satisfaction à certaines classes d'environnement XF dépend principalement de la nature des granulats (leur absorption) et de la compacité de la pâte de ciment (teneur en liant, rapport E_{eff}/C)
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.
- Vis-à-vis de l'attaque acide (attaque acide sulfurique), les essais comparatifs montrent un comportement plus durable du mortier à base de ciment H-UKR par rapport à un ciment Portland.
- Vis-à-vis de la résistance aux attaques sulfatiques externes, des essais sont en cours qui complèteront les résultats donnés au paragraphe E.f.vi. du dossier technique. Ces données sont jugées à ce jour insuffisantes pour apporter des conclusions.

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 H-UKR ;
- L'impact du traitement thermique à jeune âge des pièces en béton H-UKR 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).

Il est à noter que les campagnes d'essais suivantes sont en cours, leurs résultats viendront compléter le dossier technique et leur évaluation :

- Approche performantielle comparative de détermination du coefficient de diffusion des ions chlorure selon la norme NF EN 12390-11 sur béton H-UKR, béton Portland (CEM I) et béton à base de ciment aux laitiers (CEM III)
- Etude de la résistance de mortiers à base d'un ciment H-UKR vis-à-vis de l'attaque sulfatique externe (ASE). Les résultats de cette étude seront comparés à ceux de 2 autres ciments : 1 ciment résistant à l'ASE (type CEM I PM ES) et un ciment à base d'additions de laitier (CEM III/B).

Validité : 5 ans

Validité jusqu'au : 02.02.2027

Direction Sécurité, Structures et Feu

La Directrice



Valérie GOURVES

DOSSIER TECHNIQUE ETABLI PAR LE DEMANDEUR

A. INTRODUCTION

La société Hoffmann Green Cement Technologies est spécialisée dans la fabrication de ciments à base de co-produits et donc à très faible émissions de CO₂.

La technologie H-UKR se distingue des ciments Portland par sa composition à base de laitier de hauts fourneaux suractivé. Ces ciments sont des prémix obtenus par mélange à froid (sans aucune cuisson dans le process) dans les usines de Bournezeau situées en Vendée. Les ciments H-UKR sont ensuite utilisés comme un ciment traditionnel dans la composition de bétons fabriqués en centrale à béton dans des unités de :

- Béton Préfabriqué de réseaux ou forains
- Béton prêt à l'emploi de réseaux ou mobiles

La technologie H-UKR se décline en deux ciments destinés à réaliser des bétons structuraux et non structuraux bas carbone :

- H-UKR E : ciment pur (anciennement H-UKR Prima)
- H-UKR BAP N : ciment pur + mélanges de filler calcaire (anciennement H-UKR Technika)

Les ciments H-UKR sont donc des matériaux qui se substituent au ciment Portland pour la fabrication de béton. Les ciments H-UKR BAP-N et H-UKR E se présentent sous la forme d'une poudre pouvant être conditionnée en sacs, en big-bag ou dans des silos, acheminée jusqu'à un malaxeur par bande transporteuse et transportée de l'usine de fabrication de Bournezeau vers les centrales à béton par camion-citerne.

La présente Evaluation Technique porte sur le ciment pur H-UKR et plusieurs bétons formulés à partir du ciment H-UKR. Après coulage, ces bétons peuvent subir un traitement thermique ou être conservés en condition ambiante. L'impact du traitement thermique sur les bétons H-UKR n'est pas évalué dans le cadre de cet ETPM.

B. FABRICATION DU CIMENT

a. Matières premières

Les matières premières constituant les ciments H-UKR BAP N et H-UKR E sont les suivantes :

- Laitiers (conformes à la norme NF EN 15167-1),
- Activateurs carbo-silicate issus de l'industrie chimique répondant à des critères bien spécifiques mais qui ne peuvent être communiqués pour des raisons de propriétés intellectuelles.

En sus, on retrouve dans le cas particulier du ciment H-UKR BAP N un ajout d'additions calcaires qui répond à la norme NF EN 12620.

Le dosage des constituants des ciments H-UKR BAP-N et H-UKR E est unique et a été communiqué au CSTB.

Ces deux ciments se présentent sous la forme d'une poudre de couleur blanche.

b. Fabrication

Les ciments H-UKR sont fabriqués par mélange de plusieurs poudres constitutives dans un mélangeur d'une capacité allant de 700 kg à 4,8T selon l'usine. Les tolérances des proportions sont indiquées dans le plan contrôle qualité sur chaque constituant (cf. annexe 1).

c. Contrôles

Les contrôles sont réalisés sur :

- Les matières premières selon leur nature, 1 fois par mois :
 - Laitiers de hauts fourneaux : fluorescence X, surface Blaine selon NF EN 196-6, mesure du taux d'amorphe.
 - Activateurs carbo-silicate ou additions calcaires : essais sur mortiers de référence sur les aspects mécaniques et rhéologiques.
- Les produits finis, à chaque fabrication :
 - Analyse de composition des produits finis à l'aide de la fluorescence X ;
 - Analyse des performances par comparaison des performances du produit fini de référence (en routine mesure des résistances en compression sur mortier selon un mode opératoire découlant de la norme NF EN 196-1).

Les spécifications des contrôles sont données dans la procédure interne (annexe 1 – Procédure plan de contrôle).

Une des usines produisant le H-UKR, produit par ailleurs, un ciment normalisé sous marquage CE.

d. Conditionnement et livraison

Le conditionnement des ciments H-UKR peut être en sac, en big-bag ou en vrac. Dans le cas de conditionnement en sac, ces derniers sont disposés sur une palette qui est houssée et stockée dans une zone couverte à l'abri de l'humidité.

Les sacs et big-bags sont transportés par camion-plateau.

Le ciment vrac est transporté par camion-citerne.

C. FABRICATION DU BETON

a. Centres de fabrication

Introduction

Les ciments de la gamme H-UKR sont utilisés comme ciment dans la composition de bétons fabriqués à partir de centrale à béton dans des unités de :

- Bétons préfabriqués en réseaux ou forains ;
- Bétons prêts à l'emploi en réseaux ou mobiles.

Descriptif de la Centrale

La Centrale à béton sera équipée

- De silos de stockage pour le ciment ;
- De cases à granulats ;
- De pompes à adjuvants ;
- D'un malaxeur.

Equipements nécessaires

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

b. Compositions

Les bétons H-UKR sont préparés par mélange des constituants suivants :

- Ciment H-UKR ;
- Additions ;
- Granulats ;
- Eau ;
- Adjuvants.

Les dosages en ciment H-UKR pour la fabrication de béton peuvent varier selon les performances mécaniques recherchées et la consistance béton recherchée entre 150 kg/m³ et 450 kg/m³.

La société Hoffmann Green Cement Technologies s'engage à mettre à disposition de ses clients son service Assistance Technique et Innovation ainsi que son Laboratoire de Recherche pour accompagner ces derniers dans la mise au point de leur formulation béton.

Les formulations sont réalisées par le laboratoire de Hoffmann Green Cement Technologies et ne prennent pas en compte l'eau contenue dans les activateurs afin de conserver les pratiques des utilisateurs.

La centrale BPE peut ajuster la valeur d'eau d'ajout pour prendre en compte l'eau contenue dans les granulats et les adjuvants de la même manière qu'elle peut le faire pour un béton Portland. Toute autre modification de la formule est interdite sauf accord du laboratoire de Hoffmann Green Cement Technologies.

D. APPLICATIONS ENVISAGEES

Les applications envisagées des bétons à base de ciment H-UKR sont les mêmes que celles d'un béton traditionnel. Les principales sont les suivantes :

- Superstructure : ouvrages coulés en place de type voiles, poteaux, poutres, planchers en dalle pleine, table de compression de planchers mixtes bois-béton, table de compression de planchers à bac acier collaborant...
- Infrastructures : fondations, semelles, massifs, longrines, radiers, murs enterrés...
- Dallage
- Gros béton, béton de propreté
- Éléments en béton préfabriqués : longrines, poteaux, poutres, escaliers, prémurs, candélabres, etc....

E. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Note générale :

- Les résultats expérimentaux ci-dessous sont issus de plusieurs campagnes d'essais sur le ciment H-UKR, des mortiers normalisés ou sur des bétons à base de ciment H-UKR ou sur ciments Portland ou aux laitiers de haut fourneau (essais comparatifs).
- Pour simplifier la lecture, les résultats d'essais dans les Figures ci-après annotés « H-UKR » font référence au ciment pur, ciment H-UKR E.
- Pour les essais comparatifs avec un ciment Portland (variations dimensionnelles, durabilité), le choix s'est porté sur un CEM I 52,5 N CE PM-ES-CP2 NF avec une teneur en clinker de 97% massique et un CEM III/B 42,5 N avec une teneur en laitier de 72% massique.

a. Caractérisation du ciment H-UKR

Les essais de caractérisation du ciment H-UKR E ont été réalisés au LERM.SETEC [1] sur un échantillon représentatif de la production courante.

Les principales caractéristiques sont présentées dans le [Tableau 14](#) ci-dessous.

Tableau 14 : Tableau de synthèse de la caractérisation du ciment H-UKR

Caractéristiques	Référence norme essai	Ciment H-UKR E Valeurs	Exigences normes harmonisées
Teneur en sulfate (SO ₃)	NF EN 196-2	0,11% en masse	hEN 197-1 : ≤ 4,0% pour les CEM III hEN 15743 : ≥5% et ≤ 12,0%
Teneur en chlorure	NF EN 196-2	0,04 % en masse	hEN 197-1 : ≤ 0,10% hEN 15743 : ≤ 0,10%
Perte au feu	NF EN 196-2	7,66% en masse à 950°C	hEN 197-1 : ≤ 5,0% hEN 15743 : ≤ 5,0%
Résidu insoluble	NF EN 196-2	0,53% en masse	hEN 197-1 : ≤ 5,0% hEN 15743 : ≤ 5,0%
Résistance en compression (sur demi-éprouvettes 4x4x16 cm)	NF EN 196-1	21,3 MPa à 2 jours 35,6 MPa à 7 jours 51,4 MPa à 28 jours (avec une formulation du mortier de conforme aux exigences de la norme NF EN 196-1, donc sans tenir compte de l'eau contenu dans l'activateur)	hEN 197-1 ou hEN 15743 selon classe de résistance visée
Temps de début de prise	NF EN 196-3	Sans objet pour H-UKR (méthode d'essai non adaptée)	hEN 197-1 : ≥ 45 min hEN 15743 : ≥ 45 min
Stabilité	NF EN 196-3	Sans objet pour H-UKR	hEN 197-1 : ≤ 10 mm hEN 15743 : ≤ 10 mm
Chaleur d'hydratation	NF EN 196-3	146 J/g à 41 h 170 J/g à 120 h	hEN 197-1 : ≤ 270 joules/g à 41 h pour les ciments type LH hEN 15743 : ≤ 220 joules/g à 41 h
Densité apparente	NF EN 196-6	2,63 g/cm ³	Néant
Finesse	NF EN 196-6	5360 cm ² /g	Néant

Notes :

- Concernant les mesures de résistance en compression, la formulation du mortier CEN a été effectuée conformément à la norme NF EN 196-1, sans tenir compte de la quantité d'eau présente dans l'activateur. Les performances données sont donc plus faibles que celles affichés dans les chapitres ci-après prenant en considération cette présence d'eau dans l'activateur, induisant une modification de la formulation type d'un mortier CEN pour sa caractérisation.
- Concernant la mesure de la perte au feu : le ciment H-UKR incorporant des activateurs carbo-silicate, la présence de ceux-ci dans le ciment induit une perte au feu plus élevée que celle des ciments ordinaires, du fait de la présence d'eau sous forme d'hydrate.
- Concernant le temps de prise : le temps de prise mesuré via l'essai normalisé avec l'appareil Vicat selon la norme NF EN 196-3 n'est pas représentatif d'une prise. En effet, cet essai n'est pas adapté à la mesure sur ciment H-UKR car les mortiers à base de ciment H-UKR présente la formation rapide d'une croûte en surface de l'échantillon perturbant la mesure du temps de début de prise. De plus, le comportement thixotropique des ciments H-UKR perturbe la mesure de l'enfoncement de l'aiguille de l'appareil de mesure.

Aussi, afin de palier à des problématiques et montrer que les ciments H-UKR présentent des rhéologies adéquates à leur utilisation, des mesures de temps de prise sur béton ont été réalisées sur des formulations à base de ciment H-UKR.

Ces essais ont été réalisés selon la norme ASTM C 403/C 403 M (janvier 2016) : « Méthode d'essais pour la détermination du temps de prise sur béton par résistance à la pénétration » sur deux formulations différentes :

- Formule F1 avec un dosage en ciment H-UKR de 345 kg/m³ + 35 kg/m³ de filler et un rapport E_{ff}/C de 0,46 ;
- Formule F2 avec un dosage en ciment H-UKR de 400 kg/m³ + 45 kg/m³ de filler et un rapport E_{ff}/C de 0,44.

Les temps de prise obtenus en laboratoire à 20°C et une hygrométrie > 65 % sont (voir [Figure 4](#) ci-après) de :

- Temps de début de prise 320 et 340 minutes respectivement pour les bétons F1 et F2 ;
- Temps de fin de prise 410 et 390 minutes respectivement pour les bétons F1 et F2.

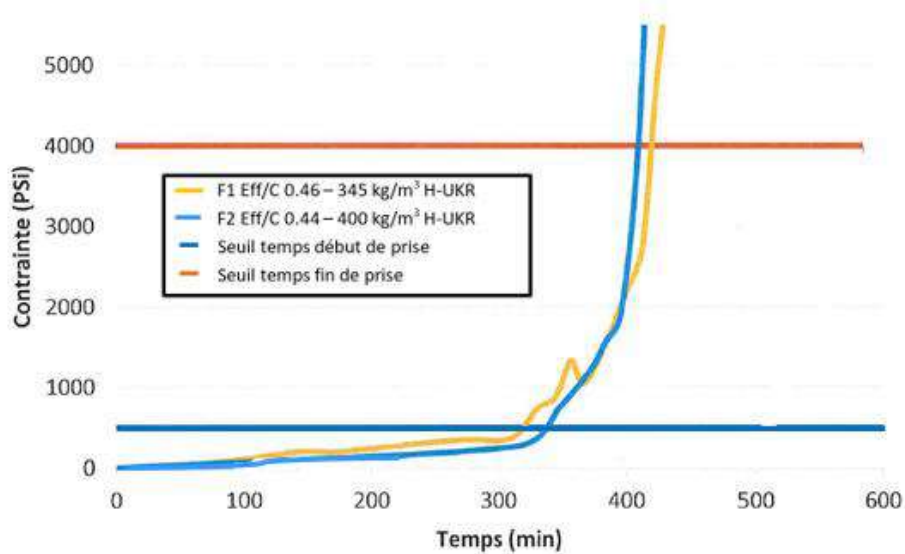


Figure 4 : Temps de prise sur béton H-UKR, mesures effectuées selon la norme ASTM C403

b. Caractérisations sur mortier normalisé à base de ciment HUKR

i. Variations dimensionnelles

Les essais de variations dimensionnelles et pondérales ont été réalisés selon la norme NF P 15-433, au LERM [2].

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

Les essais ont été conduits sur un mortier type CEN à la différence près que pour les mortiers à base de ciment H-UKR E un ajustement en eau a été réalisé de façon à prendre en compte l'eau interne déjà apportée par les activateurs carbo-silicate.

Tableau 15 : Formulation des produits testés

Mortier	Formulations
Mortier à base de H-UKR E	Adapté NF EN 196-1 ciment (450 ± 2) g, sable (1 350 ± 5) g, eau (201 ± 1) g pour tenir compte de l'eau contenu dans l'activateur soit E/C = 0,45

Essais de retrait total

Les essais ont été réalisés sur un lot de 3 éprouvettes, dont l'évolution du retrait moyen et de la perte de masse moyenne est présentée ci-dessous Figure 5.

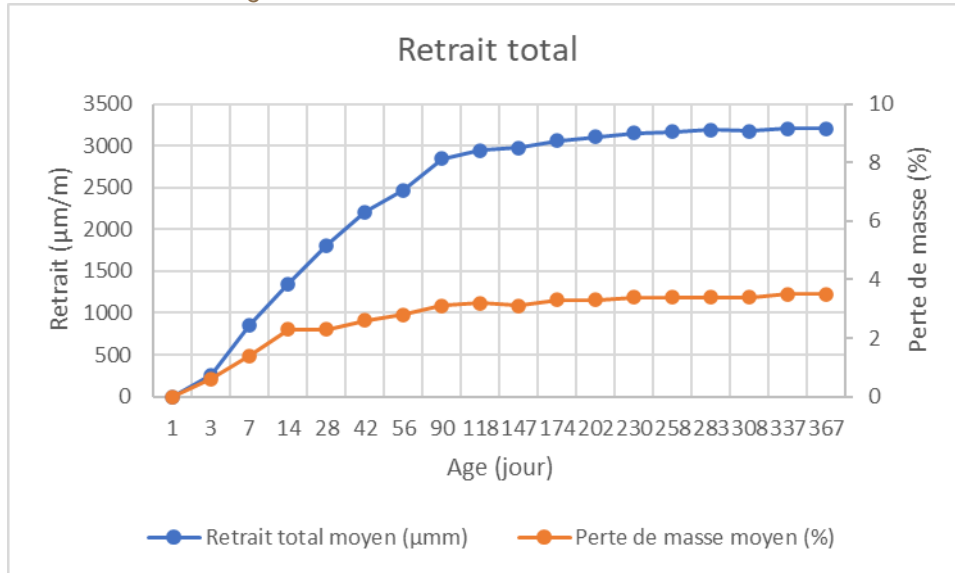


Figure 5 : Retrait de séchage et évolution de la perte de masse

Essais de retrait endogène

Les essais ont été réalisés sur un lot de 3 éprouvettes, dont l'évolution du retrait moyen et de la perte de masse moyenne est présentée ci-dessous Figure 6.

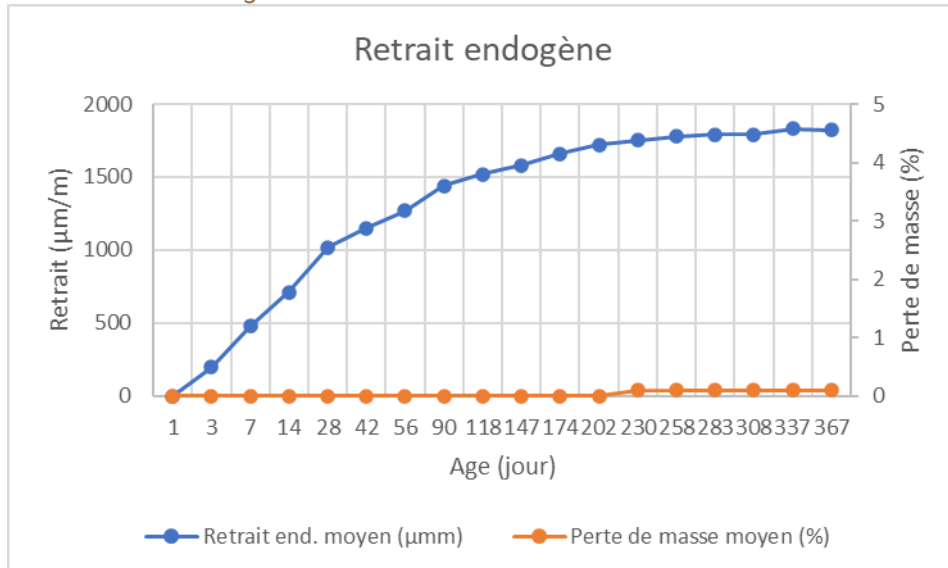


Figure 6 : Retrait endogène et évolution de la perte de masse

ii. Absorption capillaire

Les essais d'absorption capillaire ont été réalisés par le Laboratoire GCGM de l'IUT de Rennes [3].

Les essais ont été conduits sur des mortiers type CEN à la différence près que pour les mortiers à base de ciment H-UKR E un ajustement en eau a été réalisé de façon à prendre en compte l'eau interne déjà apportée par les activateurs carbo-silicate.

Tableau 16 : Formulation des produits testés

Mortier	Formulations
Mortier à base de H-UKR E	Adapté NF EN 196-1 ciment (450 ± 2) g, sable (1 350 ± 5) g, eau (216 ± 1) g soit E/C = 0,48
Mortier de référence A base de CEM I 52.5 N CE PM-ES-CP2 NF (97% clinker)	Conforme NF EN 196-1 ciment (450 ± 2) g, sable (1 350 ± 5) g, eau (225 ± 1) g soit E/C = 0,5

Les mesures ont été effectuées sur prisme 40x40x160 mm, étanché en périphérie selon une méthode interne.

La base de l'éprouvette est en contact avec de l'eau sur une hauteur de 10 mm.

Les résultats sont présentés Tableau 17.

Tableau 17 : Sorptivité (sur la plage de 1h à 8h de remontée capillaire)

Type de ciment	Sorptivité S (kg.m ² /s ^{1/2})
Ciment H-UKR E (cure 20°C et 90%HR)	0,094
Ciment H-UKR E (cure 23°C et 50%HR)	0,023 à 0,040
Ciment Portland (cure 23°C et 50%HR)	0,030

Les résultats obtenus montrent que le mortier à base de ciment H-UKR présente une sorptivité très légèrement supérieure de celle du mortier à base de ciment Portland.

Toutefois, prenant en compte les écarts de mesures sur ce type d'essais et le fait que les valeurs obtenues se situent en bas de l'échelle de mesure, il peut être considéré que les sorptivités des mortiers à base de ciment H-UKR et Portland sont quasi-équivalentes.

iii. Résistance à la compression

Les essais de compression ont été réalisés sur éprouvettes de mortier type CEN (mortier normalisé) par le Laboratoire GCGM de l'IUT de Rennes [4], conformément à la norme NF EN 196-1.

Toutefois, dans le cas des mortiers à base de ciment H-UKR E, un ajustement en eau a été réalisé de façon à prendre en compte l'eau interne déjà apportée par les activateurs carbo-silicate.

Tableau 18 : Formulation des produits testés

Mortier	Formulations
Mortier à base de H-UKR E	Adapté NF EN 196-1 ciment (450 ± 2) g, sable (1 350 ± 5) g, eau (216 ± 1) g soit E/C = 0,48
Mortier de référence A base de CEM I 52.5 N CE PM-ES-CP2 NF (97% clinker)	Conforme NF EN 196-1 ciment (450 ± 2) g, sable (1 350 ± 5) g, eau (225 ± 1) g soit E/C = 0,5

Les essais ont été réalisés avec deux conditions de cure :

- Condition 1 : 20°C et 90%HR.
- Condition 2 : 23°C et 50%HR (sauf pour le mortier de référence).

Les résultats sont présentés dans la Figure 7.

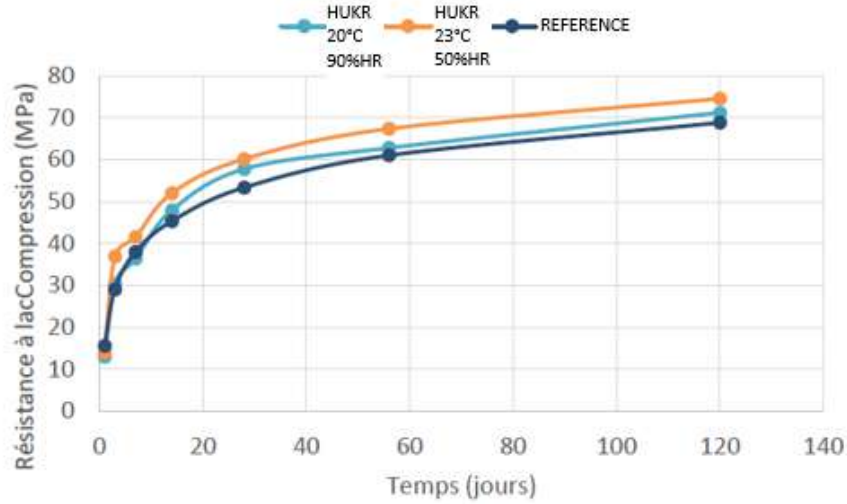


Figure 7 : Résistances en compression sur mortier normalisé

L'incidence de la quantité d'eau ajoutée sur la résistance en compression à 24 heures et à 28 jours a également été mesurée, sur des éprouvettes de mortier normalisé sur prismes 40x40x60 mm.

Pour ces essais, les mesures ont été effectuées sur des mortiers confectionnés avec des rapports E/C compris entre 0,41 et 0,56.

Les résultats sont présentés dans la Figure 8.

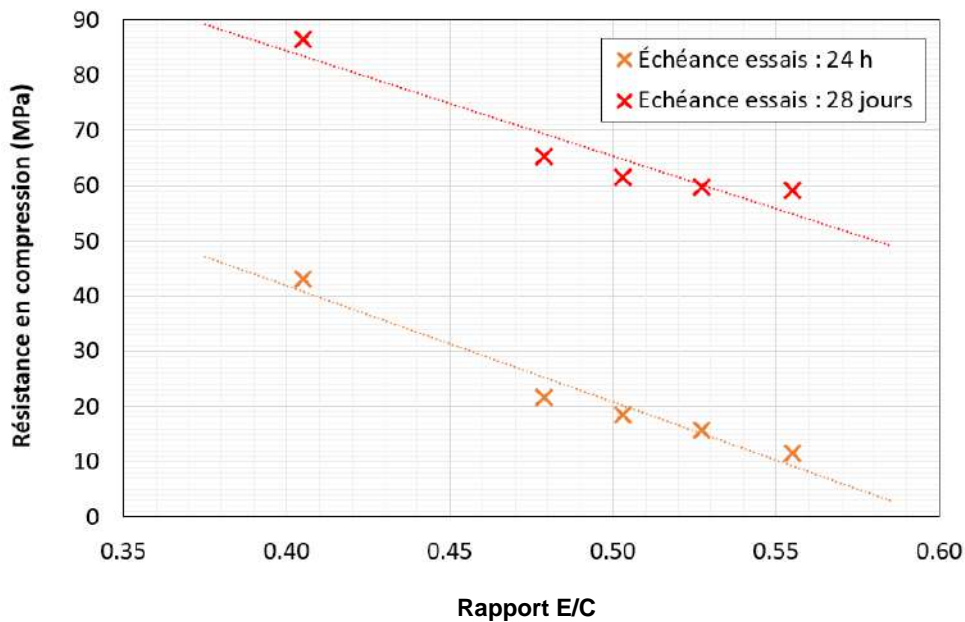


Figure 8 : Incidence du rapport E/C sur les performances mécaniques sur mortier normalisé

iv. Résistance à la flexion

Les essais de flexion ont été réalisés sur éprouvettes de mortier normalisé par le Laboratoire GCGM de l'IUT de Rennes [4], conformément à la norme NF EN 196-1.

Tableau 19 : Formulation des produits testés

Mortier	Formulations
Mortier à base de H-UKR E	Adapté NF EN 196-1 ciment (450 ± 2) g, sable (1 350 ± 5) g, eau (216 ± 1) g soit E/C = 0,48
Mortier de référence A base de CEM I 52.5 N CE PM-ES-CP2 NF (97% clinker)	Conforme NF EN 196-1 ciment (450 ± 2) g, sable (1 350 ± 5) g, eau (225 ± 1) g soit E/C = 0,5

Les essais ont été réalisés avec deux conditions de cure :

- Condition 1 : 20°C et 90%HR.
- Condition 2 : 23°C et 50%HR (sauf pour le mortier de référence).

Les résultats sont présentés dans la Figure 9.

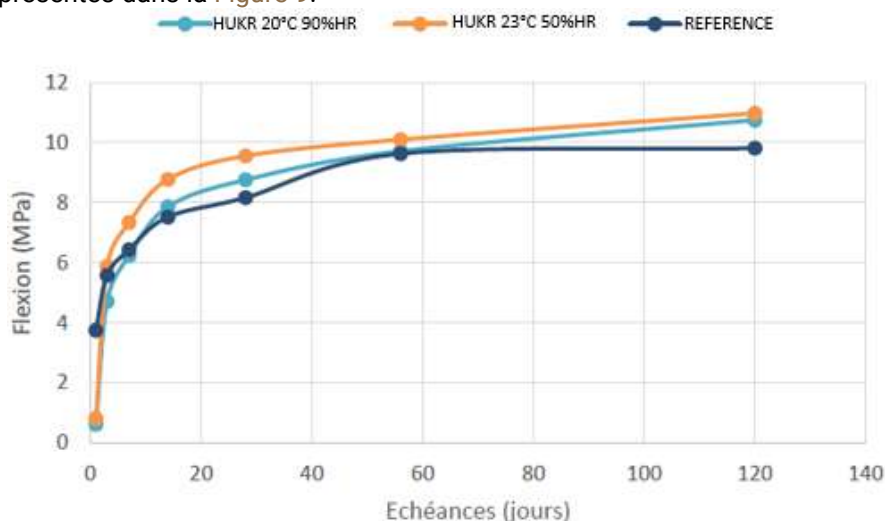


Figure 9 : Résistances à la flexion sur mortier normalisé

v. Stabilité des performances mécaniques

Des essais de stabilité de résistance dans le temps ont été conduits en interne [5], sur des mortiers type CEN à base de ciment H-UKR E avec un rapport E/C ajusté à 0,47

Les résistances en compression ont été mesurées sur des éprouvettes prismatique de type 40x40x60 mm ou demi-éprouvettes prismatique de 40x40x160 mm, conservées à l'air.

Les résultats obtenus sont présentés dans la Tableau 20.

Tableau 20 : Résistances à la compression à long terme sur mortier normalisé

Résistance en compression sur demi-prismes 40x40x160 mm ou prismes 40x40x60 mm	Valeurs obtenues (MPa)
A 28 jours	Entre 61,4 et 66,1
A 420 jours	Entre 69,4 et 76,8

Ces résultats montrent qu'il n'est pas constaté une baisse de performances ou de dégradation physique des échantillons à long terme. Au contraire, on constate plutôt une légère évolution de la résistance à la compression.

Une étude statistique sur les résultats d'essais issus des suivis de production du ciment H-UKR E a également été réalisée [6] pour justifier de la fiabilité et répétabilité des valeurs de performances mécaniques obtenues.

Cette étude statistique a été conduite sur des mortiers type CEN à base de liant H-UKR E à la différence près que le rapport E/C retenu incluant l'eau interne apportée par le liant est de 0,45 au lieu de 0,50. Les mesures de résistance en compression ont été réalisées sur des prismes 40x40x60 mm, conservés en eau à 20°C jusqu'aux essais.

Les résultats obtenus sont présentés dans la **Tableau 21**.

Tableau 21 : Etude statistique sur les performances du liant H-UKR E produit entre septembre 2020 et septembre 2021

Echéances	Moyenne (MPa)	Ecart-type (MPa)	Nombre de prélèvement
Rc 24 h	25,4	3,8	192
Rc 7 jours	49,0	3,9	191
Rc 28 jours	61,6	4,8	182

c. Caractérisations sur bétons à base de ciment HUKR

i. Résistance mécanique

Les essais de caractérisation mécanique ont été réalisés sur des séries de 3 cylindres Ø11x22 cm conservés en eau à (20±2)°C, selon les normes NF EN 12390-3 (résistance en compression) et NF EN 12390-13 (module sécant d'élasticité en compression), au CEBTP [7] [8] [9].

Les sables et graviers utilisés pour l'ensemble des formulations testées sont de même nature et dosage (sables 0/4 (mélange sable mixte et sable calcaire) et gravillon calcaire 4/12 mm).

Tableau 22 : Formulation des produits testés

Béton	Formulations
Béton à base de HUKR	Ciment H-UKR E : 344 kg/m ³ + filler 36 kg/m ³ (soit ciment H-UKR BAP N à 380 kg/m ³) E _{ff} /C = 0,47 ; Volume de pâte : 333 l/m ³
Béton de référence à base de CEM I	Ciment CEM I 52.5 N SR3 CE : 340 kg/m ³ Filler calcaire : 40 kg/m ³ E _{ff} /C = 0,47 ; Volume de pâte : 317 l/m ³
Béton de référence à base de CEM III	Ciment CEM III/A 42.5 N-LH CE : 380 kg/m ³ E _{ff} /C = 0,45 ; Volume de pâte : 344 l/m ³

Tableau 23 : Résultats des essais mécaniques sur béton

Formule	Age	Masse Vol. (kg/m ³)	Résistance compression (MPa) (moyenne/écart type)	Module d'élasticité E (MPa) (moyenne/écart type)
Béton à base de HUKR dosé à 344 kg/m ³ + filler 36 kg/m ³	7 jours	2400	51,6 0,8	35 300 300
	28 jours	2410	63,5 1,4	37 000 700
Béton à base de CEM I 52.5 N dosé à 340 kg/m ³ + 40 de kg/m ³ filler	7 jours	2400	42,8 1,4	36 200 800
	28 jours	2440	53,2 1,6	37 800 1 700
Béton à base de CEM III/A 42.5 N-LH dosé à 380 kg/m ³	7 jours (1 seul essai)	-	34,7 -	26 500 -
	28 jours	-	56,7 0,8	36 400 1 000

Des essais complémentaires de mesure de module sécant d'élasticité en compression selon la norme NF EN 12390-13 ont été effectués par GEOS Laboratoires [10] [11] [12] sur des formulations de béton à base de H-UKR E et de CEM I, en faisant varier le rapport E/C. Les essais ont été réalisés à 28 jours sur des séries de 3 éprouvettes de dimensions $\varnothing 11 \times 22$ cm après conservation en chambre humide.

Pour l'ensemble des formulations béton, les mêmes granulats ont été utilisés (sable alluvionnaire silico-calcaire et gravier 4/10 gneiss).

Tableau 24 : Résultats de l'influence du rapport eau/ciment sur la résistance en compression et le module d'élasticité

Classe de résistance	Détail formules	Résistance en compression à 28 jours (MPa)	Module d'élasticité 28 jours (MPa)
Béton de type C25	H-UKR E = 280 kg/m ³ Filler = 100 kg/m ³ G/S=0,9 E _{eff} /C = 0,63 Vol. pâte = 346 L/m ³	30,6 (Ecart type = 0,9)	30 800 (Ecart type = 1900)
	CEM I = 310 kg/m ³ G/S=0,9 E _{eff} /C = 0,60 Vol. pâte = 322 L	32,7 (Ecart type = 0,8)	28 400 (Ecart type = 500)
Béton de type C30	H-UKR E = 320 kg/m ³ G/S=0,9 E _{eff} /C = 0,52 Vol. pâte = 320 L/m ³	38,7 (Ecart type = 2,4)	31 500 (Ecart type = 400)
	CEM I = 330 kg/m ³ G/S=0,9 E _{eff} /C = 0,56 Vol. pâte = 322 L/m ³	37,8 (Ecart type = 1,9)	31 600 (Ecart type = 1200)
Béton de type C35	H-UKR E = 350 kg/m ³ G/S=0,9 E _{eff} /C = 0,50 Vol. pâte = 332 L/m ³	42,2 (Ecart type = 0,5)	30 400 (Ecart type = 900)
	CEM I = 350 kg/m ³ G/S=0,9 E _{eff} /C = 0,53 Vol. pâte = 334 L/m ³	44,3 (Ecart type = 1,8)	31 800 (Ecart type = 1800)

ii. Retraits sur béton

Les essais de retrait endogène et de retrait total ont été réalisés sur des séries de 3 éprouvettes de dimensions 7x7x28 cm selon la norme NF EN 12390-16 au CEBTP [7] [8] [9].

Les sables et graviers utilisés pour l'ensemble des formulations testées sont de même nature et dosage (sables 0/4 (mélange sable mixte et sable calcaire) et gravillon calcaire 4/12 mm).

Tableau 25 : Formulation des produits testés

Béton	Formulations
Béton à base de HUKR (noté F1)	Ciment H-UKR E : 344 kg/m ³ + filler 36 kg/m ³ (soit ciment H-UKR BAP N à 380 kg/m ³) E _{ff} /C = 0,47 ; Volume de pâte : 333 l/m ³
Béton de référence à base de CEM I (noté F4)	Ciment CEM I 52.5 N SR3 CE : 340 kg/m ³ Filler calcaire : 40 kg/m ³ E _{ff} /C = 0,47 ; Volume de pâte : 317 l/m ³
Béton de référence à base de CEM III (noté F8)	Ciment CEM III/A 42.5 N-LH CE : 380 kg/m ³ E _{ff} /C = 0,45 ; Volume de pâte : 344 l/m ³

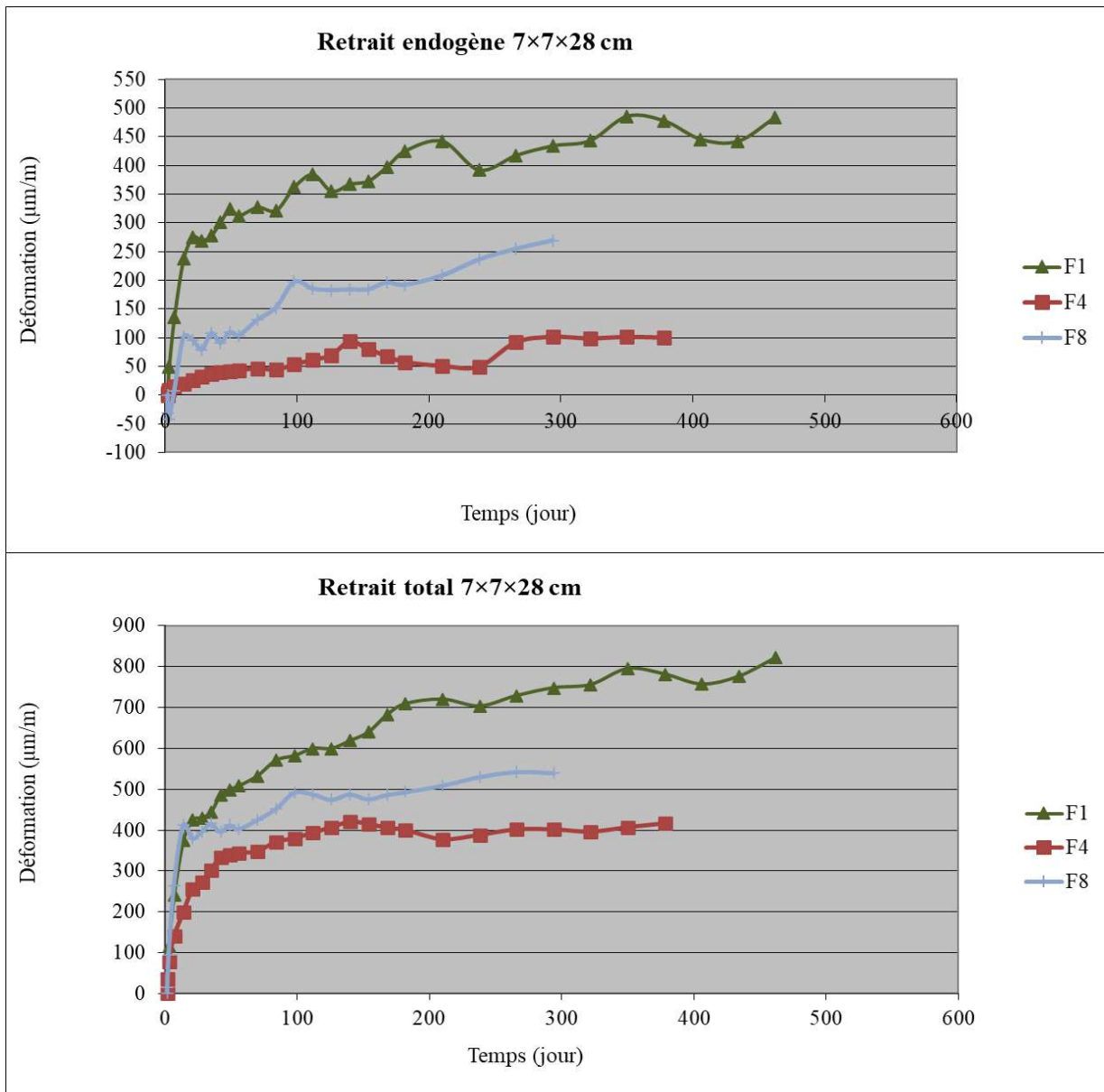


Figure 10 : Courbes de retrait endogène et de retrait total selon la norme NF EN 12390-13

iii. Comportement au fluage en compression

Les essais de comportement en fluage en compression ont été réalisés sur des séries de 3 éprouvettes de dimensions Ø9 x 28 cm selon la norme NF EN 12390-17 au CEBTP [7] [8] [9].

Le chargement a été effectué à 28 jours à hauteur de 40% de la résistance en compression.

A réception (à l'âge de 24 h), les éprouvettes sont mises en salle humide à $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ et à humidité relative supérieure à 95%. A partir de l'échéance de 28 jours, les éprouvettes sont sorties de cure en salle humide et placées en ambiance dessiccative $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ et $(50 \pm 5)\% \text{HR}$.

Les sables et graviers utilisés pour l'ensemble des formulations testées sont de même nature et dosage (sables 0/4 (mélange sable mixte et sable calcaire) et gravillon calcaire 4/12 mm.

Tableau 26 : Formulation des produits testés

Béton	Formulations	Performances mécaniques
Béton à base de HUKR (noté F1)	Ciment H-UKR E : 344 kg/m^3 + filler 36 kg/m^3 (soit ciment H-UKR BAP N à 380 kg/m^3) $E_{ff}/C = 0,47$; Volume de pâte : 333 l/m^3	$R_{Cm\ 28j} = 63,5 \text{ MPa}$ $E_{m\ 28j} = 37\ 000 \text{ MPa}$ Chargement : $25,4 \text{ MPa}$
Béton de référence à base de CEM I (noté F4)	Ciment CEM I 52.5 N SR3 CE : 340 kg/m^3 Filler calcaire : 40 kg/m^3 $E_{ff}/C = 0,47$; Volume de pâte : 317 l/m^3	$R_{Cm\ 28j} = 53,2 \text{ MPa}$ $E_{m\ 28j} = 37\ 800 \text{ MPa}$ Chargement : $21,3 \text{ MPa}$
Béton de référence à base de CEM III (noté F8)	Ciment CEM III/A 42.5 N-LH CE : 380 kg/m^3 $E_{ff}/C = 0,45$; Volume de pâte : 344 l/m^3	$R_{Cm\ 28j} = 56,7 \text{ MPa}$ $E_{m\ 28j} = 36\ 400 \text{ MPa}$ Chargement : $22,7 \text{ MPa}$

Pour rappel :

- La déformation viscoélastique propre est la somme de la déformation instantanée et du fluage d'une éprouvette sans échange hydrique avec le milieu environnant. Cela correspond à la déformation propre mesurée à laquelle est retiré le retrait endogène.
- La déformation viscoélastique totale est la somme de la déformation instantanée et du fluage d'une éprouvette avec échange hydrique avec le milieu environnant. Cela correspond à la déformation totale mesurée à laquelle est retiré le retrait total.

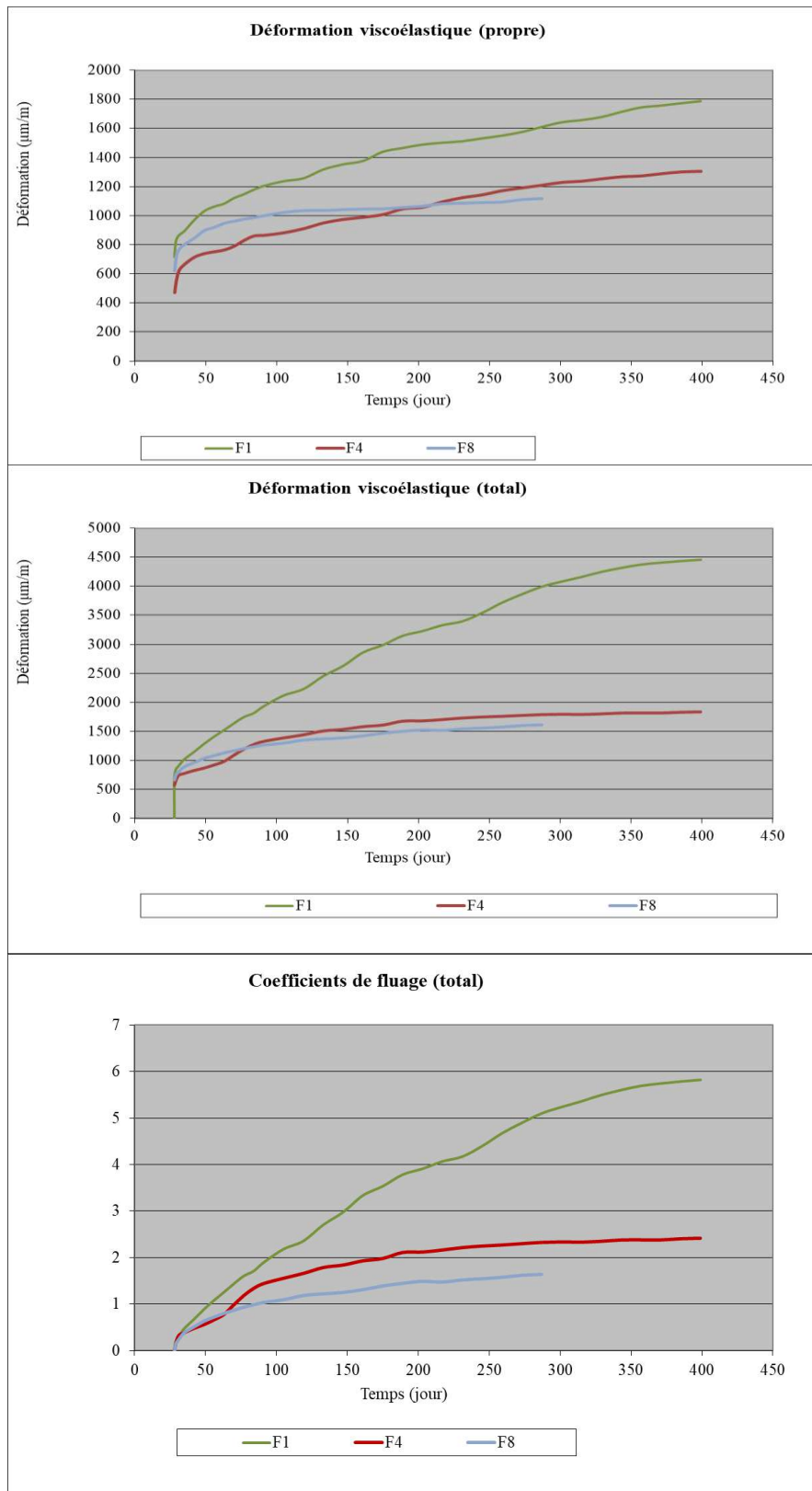


Figure 11 : Courbes des déformations de fluage en compression selon la norme NF EN 12390-17

d. Caractérisation de l'adhérence armature / béton

Des essais d'adhérence d'armatures acier HA Ø8 mm, HA Ø12 mm et HA Ø25 mm sur deux formules de béton avec le ciment H-UKR ont été effectués par le CSTB [13] et [14] en comparaison avec une formulation d'un béton avec ciment Portland.

Les sables et graviers utilisés pour l'ensemble des formulations testées sont de même nature et dosage (sables 0/4 (mélange sable mixte et sable calcaire) et gravillon calcaire 4/12 mm).

Tableau 27 : Formulation des produits testés

Béton	Formulations
Béton à base de HUKR (pour essais avec armature HA12)	Ciment H-UKR E : 344 kg/m ³ + filler 36 kg/m ³ (soit ciment H-UKR BAP N à 380 kg/m ³) E _{ff} /C = 0,47
Béton à base de HUKR (pour essais avec armature HA8 et HA25)	Ciment H-UKR E : 320 kg/m ³ E _{ff} /C = 0,49
Béton de référence à base de CEM I (pour essais avec armature HA12)	Ciment CEM I 52.5 N SR3 CE : 344 kg/m ³ + Filler calcaire : 36 kg/m ³ E _{ff} /C = 0,45
Béton de référence à base de CEM I (pour essais avec armature HA8 et HA25)	Ciment CEM I 52.5 N SR3 CE : 310 kg/m ³ E _{ff} /C = 0,58

L'ensemble des éprouvettes bétons confectionnées a été conservé de la même manière : à l'air dans les mêmes conditions.

Les squelettes granulaires des bétons confectionnés sont identiques : à base d'un sable 0/4 ainsi et d'un gravillon 11/22.

Le Tableau 28 page suivante synthétise les résultats.

Tableau 28 : Tableau de synthèse des essais d'adhérence armature / béton

Type de ciment (dosage)	Résistance le jour d'essai (MPa) (série de 3 essais)	Contrainte d'adhérence acier / béton τ (série de 5 essais)
Armature HA Ø8 mm		
Ciment H-UKR E (dosage : 320 kg/m ³)	<u>Compression</u> f _c = 53,7 MPa à 48 j <u>Fendage</u> : Pas de données	τ = 21,9 MPa
Ciment Portland (dosage : 310 kg/m ³)	<u>Compression</u> f _c = 50,4 MPa à 27 j <u>Fendage</u> : Pas de données	τ = 18,5 MPa
Armature HA Ø12 mm		
Ciment H-UKR E (dosage : 380 kg/m ³)	<u>Compression</u> f _c = 41,3 MPa à 7 j f _c = 53,7 MPa à 28 j f _c = 60,5 MPa à 90 j <u>Fendage</u> f _{tf} = 3,15 MPa à 90 j	7 jours : τ = 31,6 MPa 28 jours : τ > 32,9 MPa* 90 jours : τ > 33,2 MPa* * : ruine par rupture acier
Ciment Portland (dosage : 344 kg/m ³ + filler 36 kg/m ³)	<u>Compression</u> f _c = 57,7 MPa à 7 j f _c = 56,4 MPa à 28 j f _c = 64,3 MPa à 90 j <u>Fendage</u> : Pas de données	7 jours : τ = 31,9 MPa 28 jours : τ = 32,2 MPa 90 jours : τ = 33,4 MPa
Armature HA Ø25 mm		
Ciment H-UKR E (dosage : 320 kg/m ³)	<u>Compression</u> f _c = 53,7 MPa à 48 j <u>Fendage</u> : Pas de données	τ = 30,9 MPa
Ciment Portland (dosage : 310 kg/m ³)	<u>Compression</u> f _c = 50,4 MPa à 27 j <u>Fendage</u> : Pas de données	τ = 21,3 MPa

e. Comportement post-pic en compression

Des essais de compression, avec un pilotage en déplacement, ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques Ø11 x 22 cm sur plusieurs formules de béton avec le ciment H-UKR ont été effectués par le CSTB [15] en comparaison avec une formulation d'un béton avec ciment Portland.

Les sables et graviers utilisés pour l'ensemble des formulations testées sont de même nature et dosage (sables 0/4 (mélange sable mixte et sable calcaire) et gravillon calcaire 4/12 mm).

Ces essais visent à déterminer la loi de comportement post-pic en compression.

Tableau 29 : Formulation des produits testés

Béton	Formulations
Béton à base de HUKR	Ciment H-UKR E : 344 kg/m ³ + filler 36 kg/m ³ (soit ciment H-UKR BAP N à 380 kg/m ³) E _{ff} /C = 0,45
Béton à base de HUKR	Ciment H-UKR E : 320 kg/m ³ et Filler calcaire : 60 kg/m ³ E _{ff} /C = 0,49
Béton de référence à base de CEM I	Ciment CEM I 52.5 N SR3 CE : 344 kg/m ³ et Filler calcaire : 36 kg/m ³ E _{ff} /C = 0,45

L'ensemble des éprouvettes bétons confectionnées a été conservé de la même manière : à l'air dans les mêmes conditions de température et d'humidité. Les squelettes granulaires des bétons confectionnés sont identiques : à base d'un sable 0/4 ainsi et d'un gravillon 11/22.

Le Tableau 30 ci-après synthétise les résultats.

Tableau 30 : Tableau de synthèse des essais de comportement post-pic

Type de ciment	Module instantané (MPa) (moyenne/écart type)	Contrainte maximale (MPa) (moyenne/écart type)	Déformation associée à la contrainte maximale (µm/m) (moyenne/écart type)	Contrainte à rupture post pic (MPa) (moyenne/écart type)	Déformation maximale à rupture (µm/m) (moyenne/écart type)
Ciment H-UKR E Dosage 344 kg/m ³ + filler 36 kg/m ³	37 200 1 510	53,2 0,7	2438 68	42,5 2,5	3319 27
Ciment H-UKR E Dosage 320 kg/m ³ + filler 60 kg/m ³	42 300 6 863	49,8 4,0	1876 241	42,4 9,3	2552 488
Ciment Portland Dosage 344 kg/m ³ + filler 36 kg/m ³	42 800 2 411	49,0 3,0	2255 215	44,9 3,2	2828 251

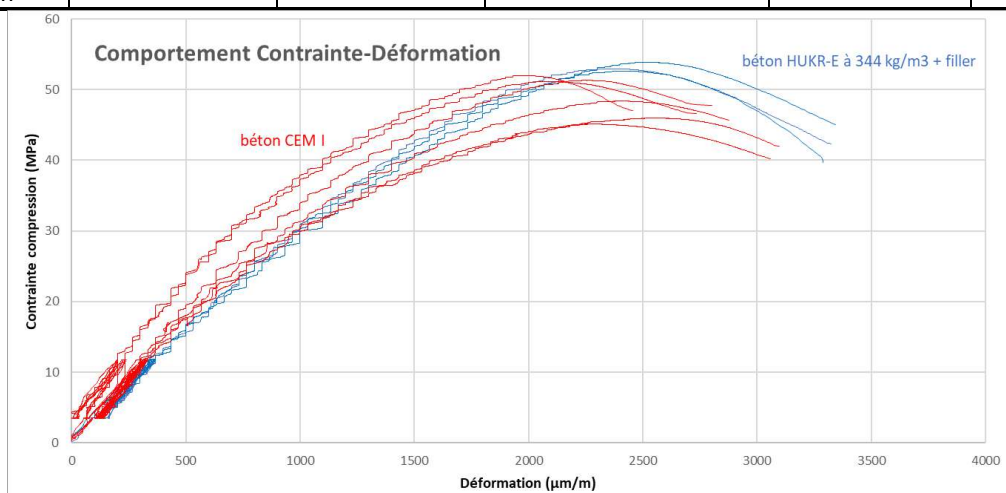


Figure 12 : Courbes « contrainte/déformation » sur béton à base de ciment HUKR

f. Durabilité

Des essais de durabilité et des mesures d'indicateurs de durabilité ont été effectués sur des formulations de bétons à base de ciment HUKR, comparativement à des formulations de béton à base de ciment Portland ou de ciment aux laitiers de haut fourneau.

i. Porosité accessible à l'eau

Des essais de porosité accessibles à l'eau ont été menés sur mortier normalisé et sur bétons.

Mesure de la porosité accessible à l'eau sur mortier normalisé :

Les essais de porosité accessible à l'eau ont été réalisés par le Laboratoire GCGM de l'IUT de Rennes [16].

Les essais ont été conduits sur des mortiers type CEN à la différence près que pour les mortiers à base de ciment H-UKR BAP N un ajustement en eau a été réalisé de façon à prendre en compte l'eau interne déjà apportée par les activateurs carbo-silicate.

Tableau 31 : Formulation des produits testés

Mortier	Formulations
Mortier à base de HUKR-E	Adapté NF EN 196-1 ciment (450 ± 2) g, sable (1 350 ± 5) g, eau (216 ± 1) g soit E/C = 0,48
Mortier de référence A base de CEM I 52.5 N CE PM-ES-CP2 NF (97% clinker)	Conforme NF EN 196-1 ciment (450 ± 2) g, sable (1 350 ± 5) g, eau (225 ± 1) g soit E/C = 0,5

Les mesures ont été effectuées conformément à la norme NF P 18-459, sur des éprouvettes de mortier normalisé âgées de 90 jours.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 32.

Tableau 32 : Porosité accessible à l'eau

Type de ciment	Porosité à l'eau (%) après cure à 20°C et 90%HR
Ciment H-UKR E	16,9
Ciment Portland	14,6

Mesure de la porosité accessible à l'eau sur béton :

Les essais comparatifs de mesure de la porosité accessible à l'eau ont été réalisés selon la norme NF P 18-459 au CSTB et LERM Setec [17].

Les essais ont été réalisés après 90 jours de cure en eau à 20°C.

Les formulations des différents bétons testés sont communes pour la mesure de la porosité accessible à l'eau, le coefficient de diffusion des chlorures et la profondeur de pénétration des chlorures et sont présentés **Tableau 33** ci-dessous.

Tableau 33 : Formulations des produits testés

Béton	Formulations
Bétons à base de HUKR	Ciment H-UKR E : 380 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,45 Gravillons D _{max} 12 mm (calcaire, LA 23%, Absorption <1%)
	Ciment H-UKR E : 350 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,50 Gravillons D _{max} 12 mm (calcaire, LA 23%, Absorption <1%)
	Ciment H-UKR E : 320 kg/m ³ ; Filler 60 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,53 Gravillons D _{max} 12 mm (calcaire, LA 23%, Absorption <1%)
	Ciment H-UKR E : 380 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,43 Gravillons D _{max} 12 mm (alluvionnaire, LA 25%, Absorption 1,4 à 2,5%)
	Ciment H-UKR E : 380 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,48 Gravillons D _{max} 12 mm (alluvionnaire, LA 25%, Absorption 1,4 à 2,5%)
	Ciment H-UKR E : 320 kg/m ³ ; Filler 60 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,53 Gravillons D _{max} 12 mm (alluvionnaire, LA 25%, Absorption 1,4 à 2,5%)
Bétons de référence à base de CEM I	Ciment CEM I 52.5 N SR3 CE : 335 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,54 Gravillons D _{max} 12 mm (calcaire, LA 23%, Absorption <1%)
	Ciment CEM I 52.5 N SR3 CE : 335 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,54 Gravillons D _{max} 12 mm (alluvionnaire, LA 25%, Absorption 1,4 à 2,5%)
	Ciment CEM III/B 42.5 N LH-SR : 350 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,50 Gravillons D _{max} 12 mm (calcaire, LA 23%, Absorption <1%)
Bétons de référence à base de CEM III	Ciment CEM III/B 42.5 N LH-SR : 350 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,50 Gravillons D _{max} 12 mm (alluvionnaire, LA 25%, Absorption 1,4 à 2,5%)
	Ciment CEM III/B 42.5 N LH-SR : 350 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,50 Gravillons D _{max} 12 mm (alluvionnaire, LA 25%, Absorption 1,4 à 2,5%)

Tableau 34 : Résultats des mesures de porosité accessible à l'eau

Liant	Formule	Porosité accessible à l'eau (%) (moyenne sur 3 essais)	Porosité accessible à l'eau par fraction de volume de pâte (%)
Bétons à base de HUKR E	C : 380 kg/m ³ , Granulats calcaire	15,4	44,6
	C : 350 kg/m ³ , Granulats calcaire	16,1	45,7
	C : 320 kg/m ³ + filler 60 kg/m ³ , Granulats calcaire	15,6	46,2
	C : 380 kg/m ³ , Granulats alluvionnaires	17,0	53,0
	C : 350 kg/m ³ , Granulats alluvionnaires	17,8	51,6
	C : 320 kg/m ³ + filler 60 kg/m ³ , Granulats alluvionnaires	18,1	53,7
Bétons à base de CEM I 52.5 N	C : 335 kg/m ³ , Granulats calcaire	11,7	36,4
	C : 335 kg/m ³ , Granulats alluvionnaires	14,6	51,0
Bétons à base de CEM III/B 42.5 N	C : 350 kg/m ³ , Granulats calcaire	14,0	40,9
	C : 350 kg/m ³ , Granulats alluvionnaires	15,9	53,3

ii. Mesure du coefficient de diffusion des chlorures sur béton

Des mesures comparatives de détermination du coefficient de diffusion apparent des ions chlorures ont été réalisées selon la norme NF P 18-462 au CSTB et LERM Setec [17].

Les essais ont été réalisés après 90 jours de cure en eau à 20°C.

Les formulations des différents bétons testés sont communes pour la mesure de la porosité accessible à l'eau, le coefficient de diffusion des chlorures et la profondeur de pénétration des chlorures et sont présentés **Tableau 33**.

Tableau 35 : Résultats des mesures de coefficient de diffusion apparent des ions chlorures

Liant	Formule	coefficient de diffusion apparent des ions chlorures D_{app} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) (moyenne sur 3 essais)
Béton à base de HUKR E	C : 380 kg/m ³ , Granulats calcaire	0,4
	C : 350 kg/m ³ , Granulats calcaire	1,4
	C : 320 kg/m ³ + filler 60 kg/m ³ , Granulats calcaire	1,8
	C : 380 kg/m ³ , Granulats alluvionnaires	1,4
	C : 350 kg/m ³ , Granulats alluvionnaires	1,9
	C : 320 kg/m ³ + filler 60 kg/m ³ , Granulats alluvionnaires	1,3
Béton à base de CEM I 52.5 N	C : 335 kg/m ³ , Granulats calcaire	20,8
	C : 335 kg/m ³ , Granulats alluvionnaires	29,3
Béton à base de CEM III/B 42.5 N	C : 350 kg/m ³ , Granulats calcaire	2,5
	C : 350 kg/m ³ , Granulats alluvionnaires	1,3

iii. Mesure de la profondeur de carbonatation sur béton

Des essais comparatifs de carbonatation accélérée ont été réalisés selon la norme NF EN 12390-10 au CSTB et LERM Setec [17].

Les essais ont été réalisés après 90 jours de cure en eau à 20°C. Le mode opératoire de la norme a été modifié avec un taux de CO₂ ramené à 1% au lieu de 3% comme requis par la norme NF EN 12390-10, du fait des retours d'expérience Rilem sur l'incidence que peut avoir le taux de CO₂ sur la nature des hydrates transformés.

Après cure, une période de séchage et de mise en équilibre thermo-hydrigue à 20 ± 2 °C et 65 ± 5 % d'HR, a été réalisée pendant 14 jours. Les mesures de profondeur de carbonatation ont été effectuées selon 3 échéances de mesures ont été réalisées : 28, 42, et 70 jours. Par ailleurs, des mesures initiales de profondeur de carbonatation ont également été réalisées.

Les formulations des différents bétons testés sont communes pour la mesure de la porosité accessible à l'eau, le coefficient de diffusion des chlorures et la profondeur de pénétration des chlorures et sont présentés **Tableau 33**.

Tableau 36 : Résultats des mesures de carbonatation accélérée NF EN 12390-10

Liant	Formule	Profondeur de carbonatation après 70 jours (mm) (moyenne sur 3 essais)	Vitesse de carbonatation (mm/ \sqrt{t} en jour)
Béton à base de HUKR E	C : 380 kg/m ³ , Granulats calcaire	13	1,7
	C : 350 kg/m ³ , Granulats calcaire	12	2,0
	C : 320 kg/m ³ + filler 60 kg/m ³ , Granulats calcaire	16	2,1
	C : 380 kg/m ³ , Granulats alluvionnaires	18	2,2
	C : 350 kg/m ³ , Granulats alluvionnaires	22	2,6
	C : 320 kg/m ³ + filler 60 kg/m ³ , Granulats alluvionnaires	18	2,4
Béton à base de CEM I 52.5 N	C : 335 kg/m ³ , Granulats calcaire	2	0,3
	C : 335 kg/m ³ , Granulats alluvionnaires	5	0,7
Béton à base de CEM III/B 42.5 N	C : 350 kg/m ³ , Granulats calcaire	8	1,0
	C : 350 kg/m ³ , Granulats alluvionnaires	9	1,2

En complément, deux campagnes d'essais de carbonatation accélérée ont été réalisées, avec comparaison sur des références à base de CEM I et CEM III/B, l'une sur mortiers (CSTB et LERM Setec [17]) et l'autre sur bétons (CSTB et UGE [37]).

Ces essais permettent d'apprécier l'impact de la cure (de sa durée : 28 ou 90 jours et de sa nature : cure humide ou cure à l'air 20°C/65%HR) sur la profondeur de carbonatation.

Les principaux résultats sont présentés ci-dessous :

Comparaison entre les formules C1, C2 et C3 après 90 jours de cure

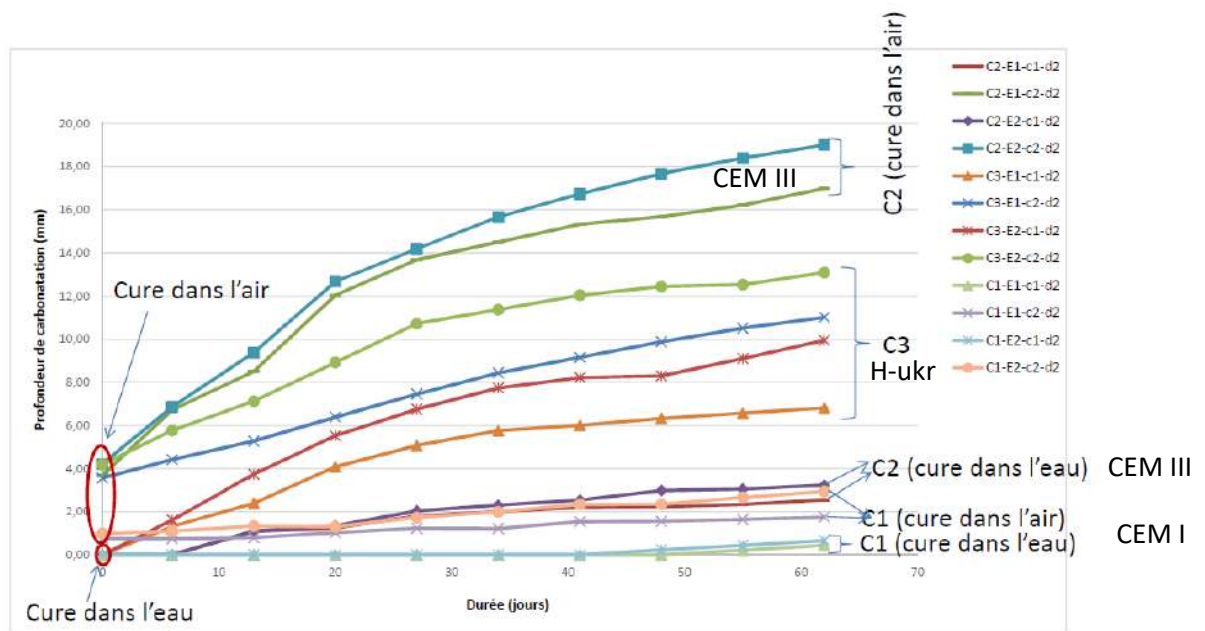


Figure 13 : mesure de profondeur de carbonatation sur mortier (carbonatation accélérée à CO₂ = 3 % et HR = 63 %)

Effet de la cure sur la carbonatation

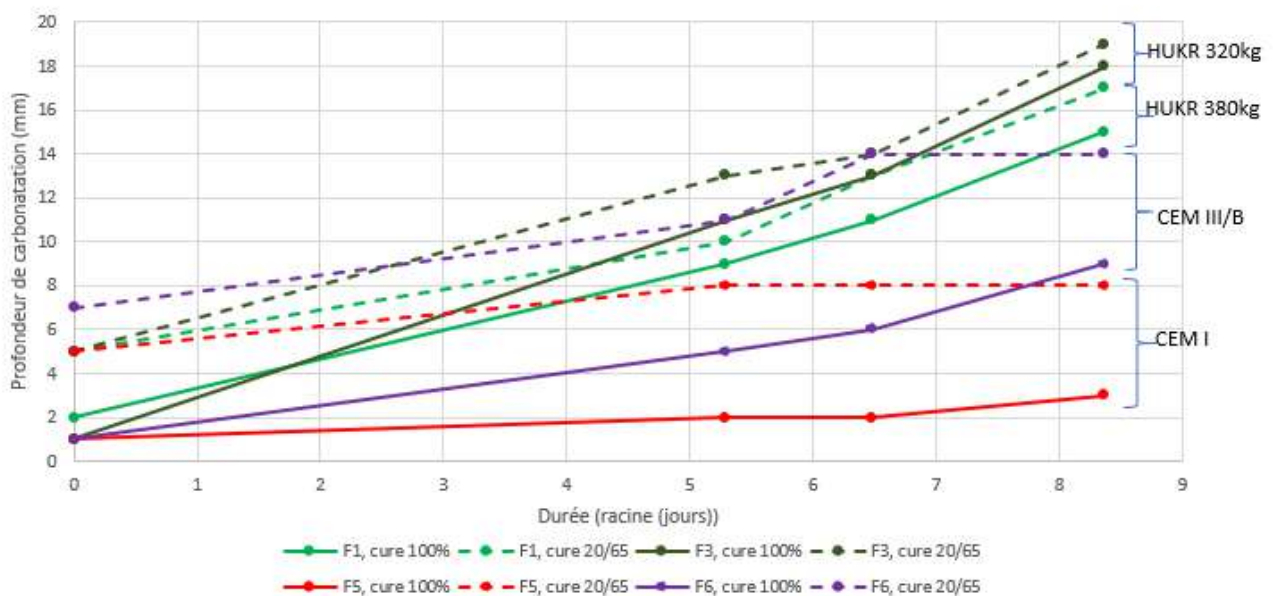


Figure 14 : Mesure de la profondeur de carbonatation sur bétons à base de granulats calcaires (carbonatation accélérée à CO₂ = 1 % et HR = 57 %)

iv. Résistance au gel-dégel

Des essais comparatifs de gel-dégel ont été réalisés par LD Controles [20] [21] [24] [25] [26] [27] [28], le CERIB [22] [23] et CSTB/EGIS Structures [18] et [19].

Deux protocoles ont été menés :

- Essais de gel modéré sur béton durci - Gel dans l'air - Dégel dans l'eau selon la norme NF P18-425
- Essais de gel sévère sur béton durci - Gel dans l'eau - Dégel dans l'eau selon la norme NF P18-424, associé à des essais d'écaillage selon la norme XP P18-420 et des mesures du facteur d'espacement L barre selon la norme ASTM C457.

Essais de gel modéré

Les essais ont été réalisés sur les plusieurs formules de béton présentées dans le **Tableau 37** ci-dessous. La résistance en compression, selon la norme NF EN 12390-3 (conservation en eau à 20°C, basé sur des séries de 3 essais) est également présentée.

Tableau 37 : Formulation des produits testés (granulats peu absorbants région Ouest, absorption 0,9%)

Béton	Formulations	Résistance en compression
Béton à base de HUKR (courbe PV20B1724)	Ciment H-UKR E : 317 kg/m ³ + filler 33 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,55 Sable 0/2 (région Ouest), absorption 3,9% Sable 0/4 alluvionnaire, absorption 0,7% Gravillons 4/10 (région Ouest), absorption 0,9%	Non mesurée
Bétons de référence à base de CEM I (courbe PV20B1723)	Ciment CEM I 52.5 R : 325 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,58 Sable 0/2 (région Ouest), absorption 3,9% Sable 0/4 alluvionnaire, absorption 0,7% Gravillons 4/10 (région Ouest), absorption 0,9%	Non mesurée

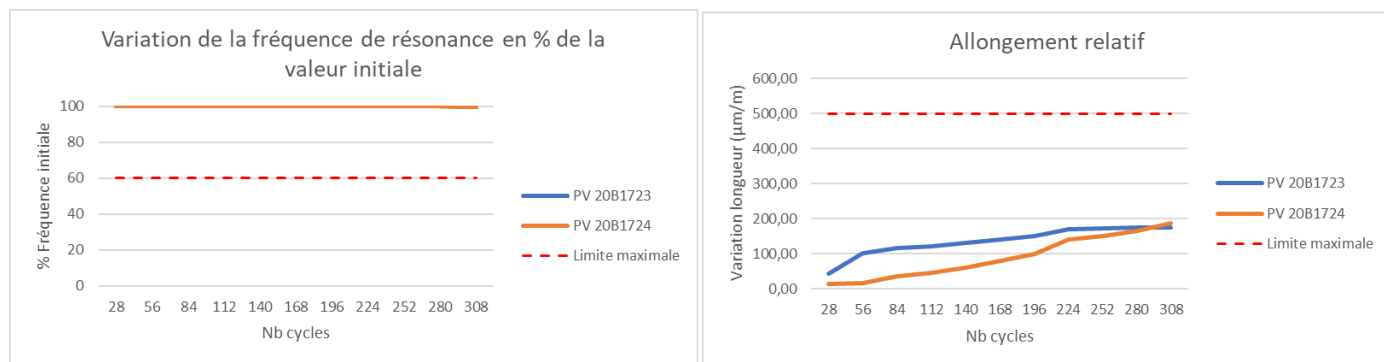


Figure 15 : Résultats des mesures de gel modéré selon la norme NF P18-425 (essais LD Controles [20] [21]) (note : pour le suivi de la fréquence de résonance, les deux courbes sont superposées)

Tableau 38 : Formulation des produits testés (granulats peu absorbants région Ouest, absorption 0,9%)

Béton	Formulations	Résistance en compression
Béton à base de HUKR	Ciment H-UKR E : 408 kg/m ³ + filler 42 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,51 Sable 0/4 alluvionnaire, absorption 0,8% Gravillons 4/10 (roche granitique, gneiss), absorption 0,9% Gravillons 11/22 (roche granitique gneiss), absorption 0,4% Béton étuvé	R _{Cm 28j} = 48,6 MPa (E.T. : non communiqué)
	Ciment H-UKR E : 400 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,49 Sable 0/4 alluvionnaire, absorption 0,8% Gravillons 6,3/10 (roche granitique, granite), absorption 0,7% Béton avec entraineur d'air (teneur en air mesurée : 4,2%)	R _{Cm 28j} = 50,9 MPa (E.T. : non communiqué)

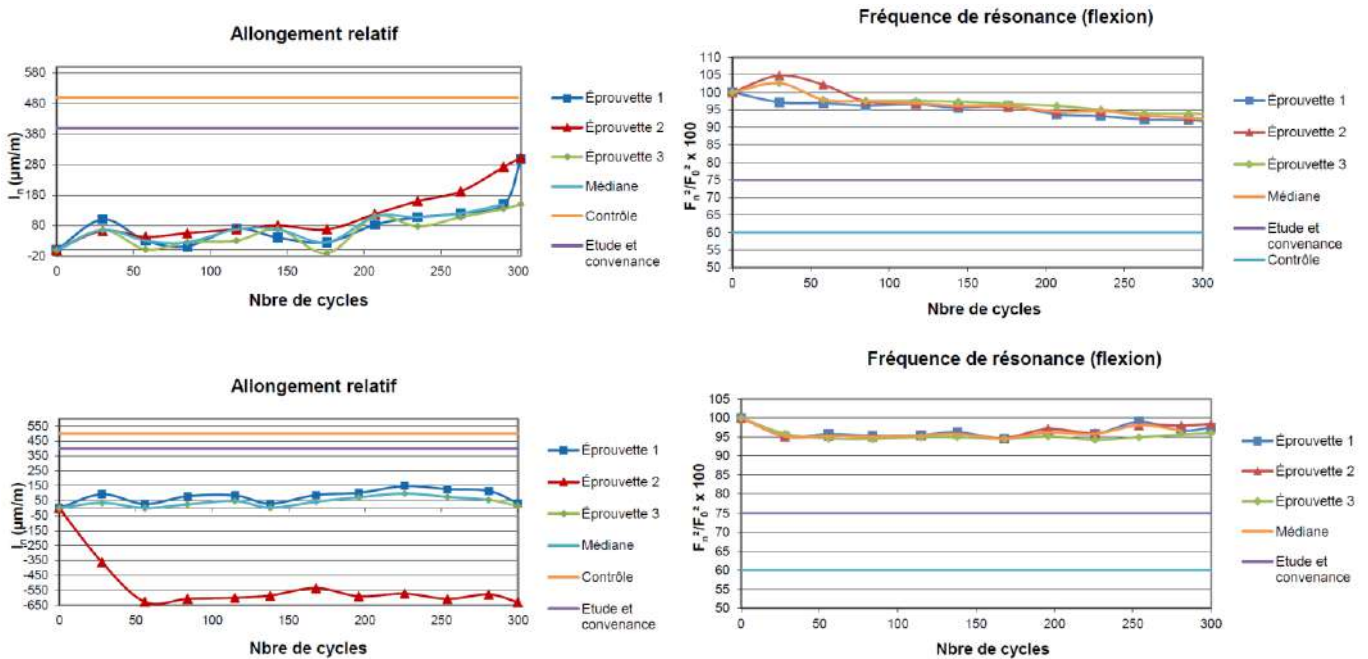


Figure 16 : Résultats des mesures de gel modéré selon la norme NF P18-425 (essais Cerib [22] [23])

Tableau 39 : Formulation des produits testés (granulats silico calcaire, absorption 1,4 à 2,8%)

Béton	Formulations	Résistance en compression
Bétons à base de HUKR	Ciment H-UKR E : 360 kg/m ³ + filler 30 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,48 Sable 0/4 recomposé silico calcaire, absorption 1,4% Gravillons 4/11,2 alluvionnaire, absorption 2,8%	R _{Cm 28j} = 40,7 MPa (E.T. : non communiqué)
	Ciment H-UKR E : 420 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,40 Sable 0/4 recomposé silico calcaire, absorption 1,4% Gravillon 4/11,2 alluvionnaire, absorption 2,8%	R _{Cm 28j} = 48,1 MPa (E.T. : non communiqué)

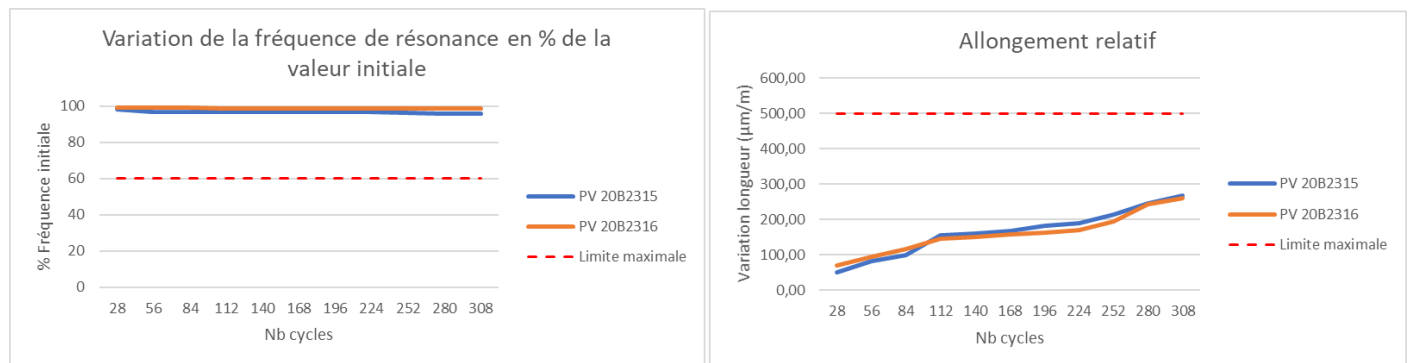


Figure 17 : Résultats des mesures de gel modéré selon la norme NF P18-425 (essais LD Contrôles [24] [25])

Tableau 40 : Formulation des produits testés (granulats silico calcaire, absorption 1,4 à 2,8%)

Béton	Formulations	Résistance en compression
Bétons à base de HUKR (réciproquement courbes PV21B0259 et PV21B0257)	Ciment H-UKR E : 317 kg/m ³ + filler 33 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,51 Sable 0/4 silico calcaire, absorption 1,4% Gravillons 4/11,2 silico-calcaire, absorption 2,8%	R _{Cm 28j} = 41,7 MPa (E.T. : non communiqué)
	Ciment H-UKR E : 344 kg/m ³ + filler 36 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,51 Sable 0/4 recomposé silico calcaire, absorption 1,4% Gravillon 4/11,2 silico-calcaire, absorption 2,8%	R _{Cm 28j} = 47,3 MPa (E.T. : non communiqué)
Béton à base de CEM III/B (courbe PV21B0258)	Ciment CEM III/B : 360 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,47 Sable 0/4 recomposé silico calcaire, absorption 1,4% Gravillon 4/11,2 silico-calcaire, absorption 2,8%	R _{Cm 28j} = 41,8 MPa (E.T. : non communiqué)

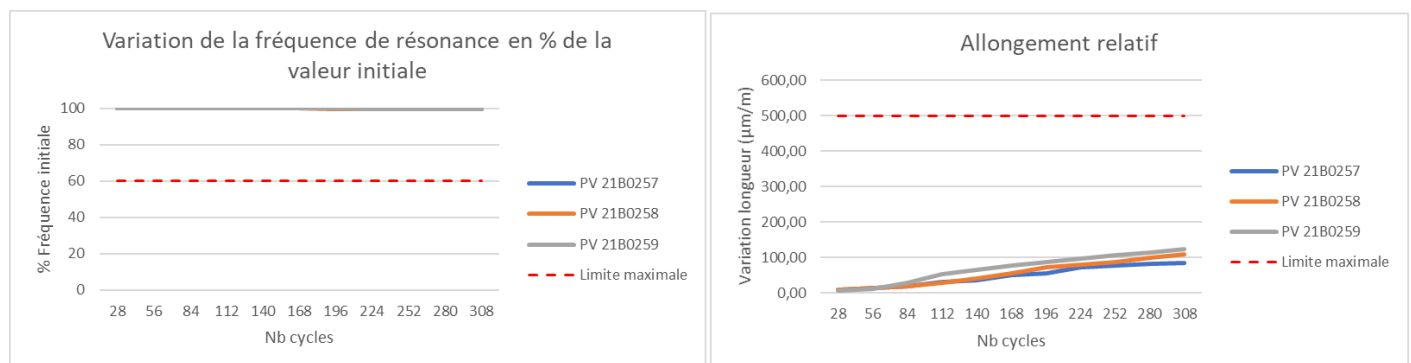


Figure 18 : Résultats des mesures de gel modéré selon la norme NF P18-425 (essais LD Contrôles [26] [27] [28])

Tableau 41 : Formulation des produits testés (granulats silico calcaire, absorption 2,8%)

Béton	Formulations	Résistance en compression
Bétons à base de HUKR (Notés F2, F4)	Ciment H-UKR E : 317 kg/m ³ + filler 33 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,55 Gravillons 4/11,2 mm (calcaire, Absorption 2,8%)	R _{Cm 28j} = 45,9 MPa (E.T. : 0,5 MPa)
	Ciment -UKR E : 317 kg/m ³ + filler 33 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,55 Gravillons 4/12 mm (silico-calcaire, Absorption 3,7%)	R _{Cm 28j} = 44,2 MPa (E.T. : 0,1 MPa)
Bétons de référence à base de CEM I (Noté F1)	Ciment CEM I 52.5 N SR3 CE : 325 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,58 Gravillons 4/12 mm (calcaire, Absorption 2,8%)	R _{Cm 28j} = 25,3 MPa (E.T. : 0,5 MPa)

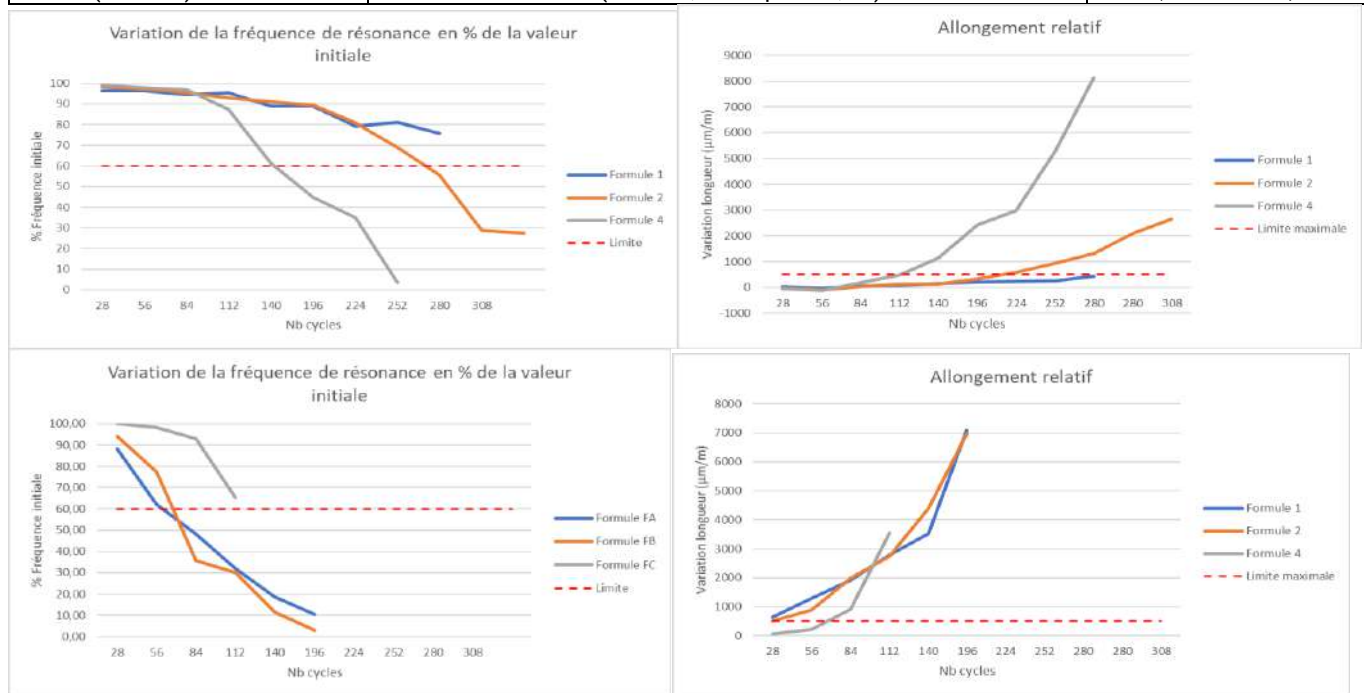


Figure 19 : Résultats des mesures de gel modéré selon la norme NF P18-425 (essais CSTB/EGIS [18])

Tableau 42 : Formulation des produits testés (granulats calcaires, absorption 3,5%)

Béton	Formulations	Résistance en compression
Bétons à base de HUKR (Notés FA et FB)	Ciment H-UKR E : 344 kg/m ³ + filler 60 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,452 Gravillons 4/12 mm (calcaire, Absorption 3,5%)	R _{Cm 28j} = 43,3 MPa (E.T. : 0,6 MPa)
	Ciment H-UKR E : 380 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,52 Gravillons 4/12 mm (calcaire, Absorption 3,5%)	R _{Cm 28j} = 45,7 MPa (E.T. : 0,6 MPa)
Bétons de référence à base de CEM III (Noté FC)	Ciment CEM III/A 42.5 N LH : 360 kg/m ³ ; E _{ff} /C = 0,47 Gravillons 4/12 mm (calcaire, Absorption 3,5%)	R _{Cm 28j} = 43,2 MPa (E.T. : 1,4 MPa)

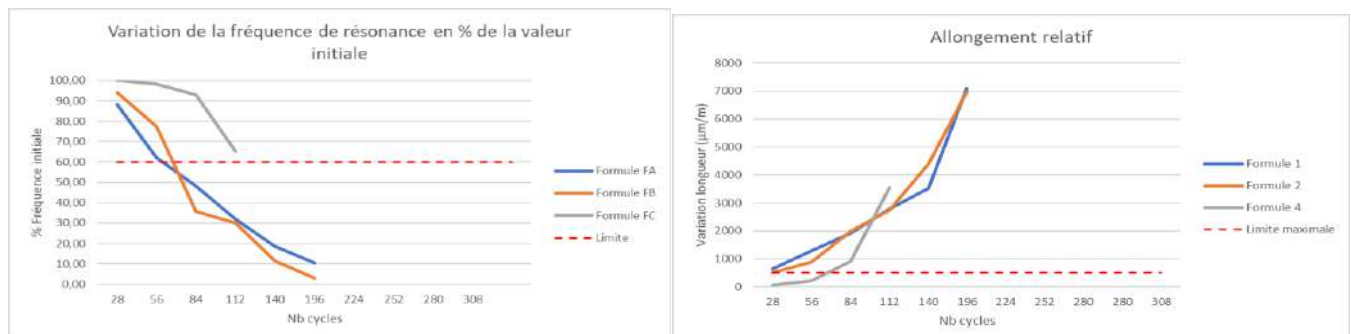


Figure 20 : Résultats des mesures de gel modéré selon la norme NF P18-425 (essais CSTB/EGIS [18])

Essais de gel sévère

Les essais ont été réalisés sur les 4 formules de béton présentées **Tableau 43** ci-dessous. La formulation et les mesures de consistance (NF EN 12350-2), teneur en air (NF EN 12350-7) et la résistance en compression (NF EN 12390-3 avec conservation en eau à 20°C, basé sur des séries de 3 essais) sont également présentées.

Tableau 43 : Formulation des produits testés

Béton	Formulations	Propriétés bétons
Bétons à base de HUKR	Ciment H-UKR E : 344 kg/m ³ + filler 36 kg/m ³ avec entraîneur air Gravillons Dmax 12 mm (granite, Absorption 0,7%) Ouvrabilité S4 et teneur en air attendue : 4,5% Notée F5	Consistance NF EN 12350-3 A t ₀ , t ₀ +45min, t ₀ +1h30 : 22,5 ; 10 et 3 cm Teneur en air NF EN 12350-7 A t ₀ et t ₀ +1h30 : 4,1% -> 3,1% Rc _{m 28j} = 58,1 MPa (E.T. : 3,3 MPa)
	Ciment H-UKR BAP N : 380 kg/m ³ avec entraîneur air Apport en eau +10 l/m ³ Gravillons Dmax 12 mm (granite, Absorption 0,7%) Ouvrabilité S4 et teneur en air attendue : 4,5% Notée F6	Consistance NF EN 12350-3 A t ₀ , t ₀ +45min, t ₀ +1h30 : 22,5 ; 4,5 et 2 cm Teneur en air NF EN 12350-7 A t ₀ et t ₀ +1h30 : 4,2% -> 3,2% Rc _{m 28j} = 54,9 MPa (E.T. : 1,8 MPa)
	Ciment H-UKR BAP N : 380 kg/m ³ avec entraîneur air Gravillons Dmax 12 mm (granite, Absorption 0,7%) Ouvrabilité S4 et teneur en air attendue : 5,5 à 6% Notée F7	Consistance NF EN 12350-3 A t ₀ , t ₀ +45min, t ₀ +1h30 : 23 ; 12 et 6 cm Teneur en air NF EN 12350-7 A t ₀ et t ₀ +1h30 : 2,6% -> 2,7% Rc _{m 28j} = 51,3 MPa (E.T. : 2,7 MPa)
	Ciment H-UKR BAP N : 380 kg/m ³ avec entraîneur air Apport en eau +10 l/m ³ Gravillons Dmax 12 mm (granite, Absorption 0,7%) Ouvrabilité S4 et teneur en air attendue : 5,5 à 6% Notée F8	Consistance NF EN 12350-3 A t ₀ , t ₀ +45min, t ₀ +1h30 : 22 ; 8,5 et 2,5 cm Teneur en air NF EN 12350-7 A t ₀ et t ₀ +1h30 : 2,7% -> 3,1% Rc _{m 28j} = 53,8 MPa (E.T. : 2,3 MPa)

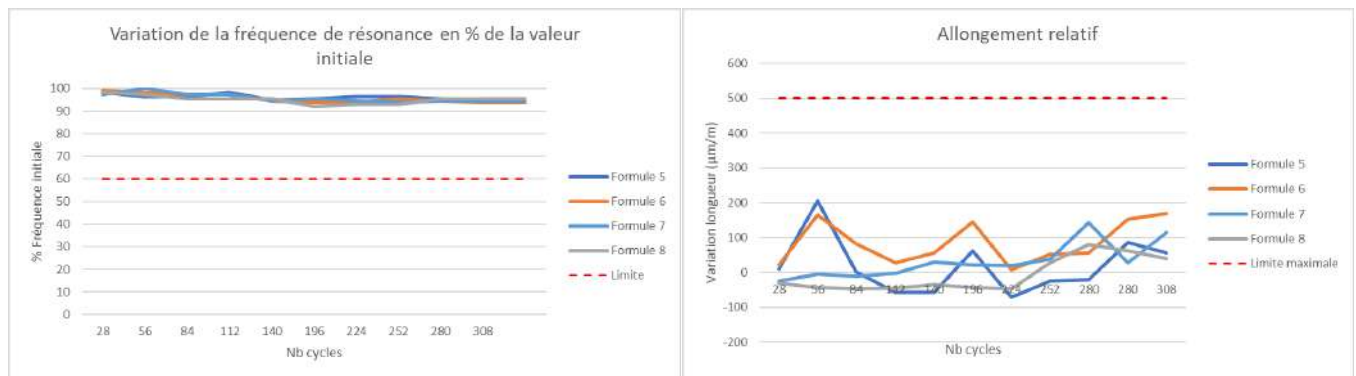


Figure 21 : Résultats des mesures de gel sévère selon la norme NF P18-424 (essais CSTB/EGIS [19])

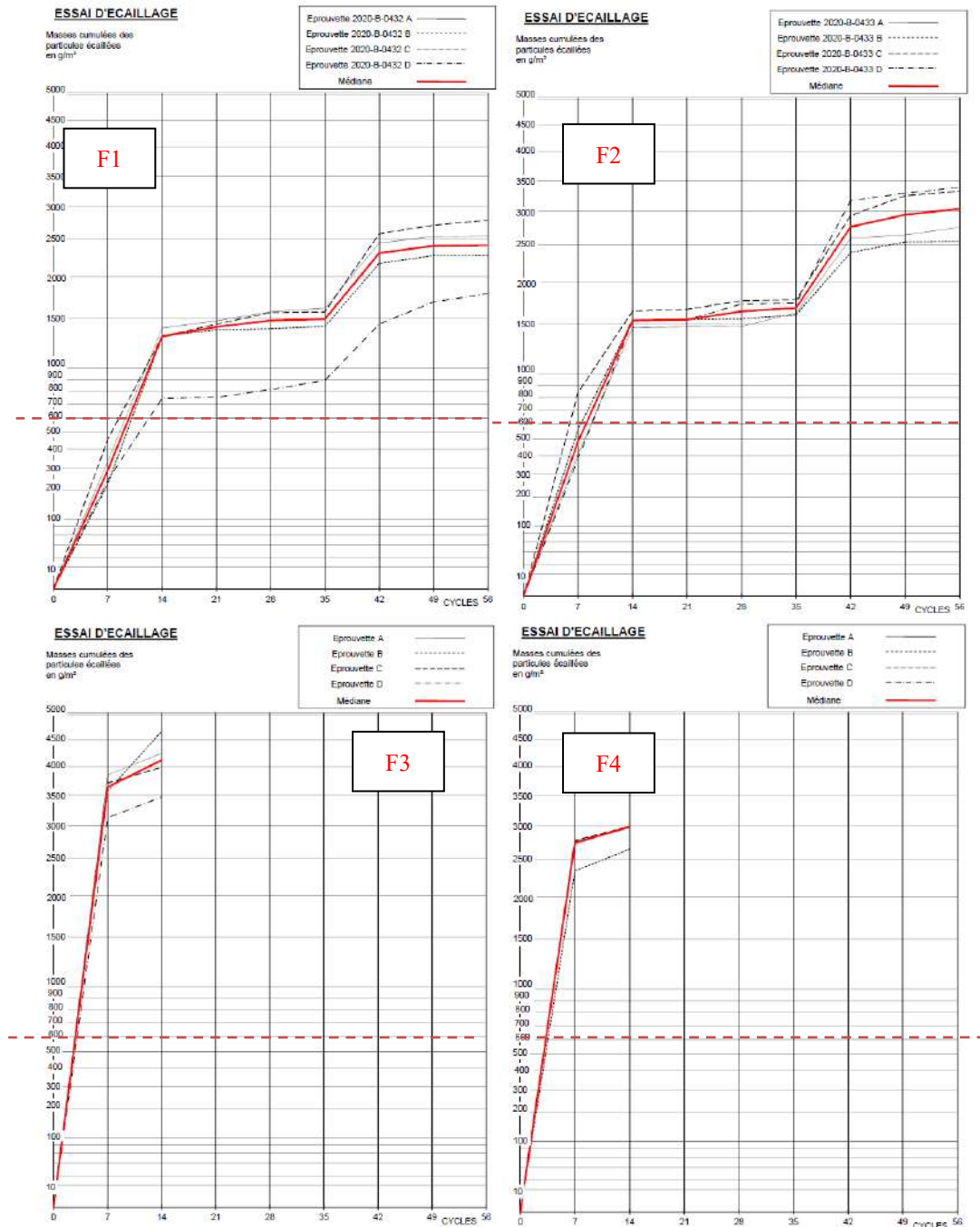


Figure 22 : Résultats des mesures d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence d'une solution saline selon la norme XP P18-420 (essais CSTB/EGIS [19])

Tableau 44 : Résultats des mesures du L_{barre} selon la norme ASTM C457 (essais CSTB/EGIS [19])

Liant	Formule	Volume d'air (%)	Volume pâte (%)	Espacement moyen L (µm)
Béton à base de HUKR E	F5	4,2	36,5	477
	F6	3,9	33,1	569
	F7	5,0	37,0	417
	F8	6,0	33,1	472

v. Résistance aux attaques acides

Des essais d'attaques acides ont été réalisés par le Laboratoire GCGM de l'IUT de Rennes [29], selon une méthode interne au laboratoire. Deux dosages d'attaque acide sulfurique H₂SO₄ ont été réalisés : 5% et 10%.

Les éprouvettes sont des prismes de mortier normalisé 40x40x160 mm à base du ciment H-UKR (dosage à E/C = 0,48) sont comparées à celles d'un ciment Portland (dosage E/C = 0,50). Le ciment Portland de référence est un CEM I 52.5 N CE PM-ES-CP2 NF à 97% de clinker.

A différentes échéances, des mesures de masse, de vitesse ultrasonore (selon la norme NF EN 12504-2) et de variations dimensionnelles et de pH de la matrice sont suivies.

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.

Les résultats sont présentés dans les Figure 23 et Figure 24.

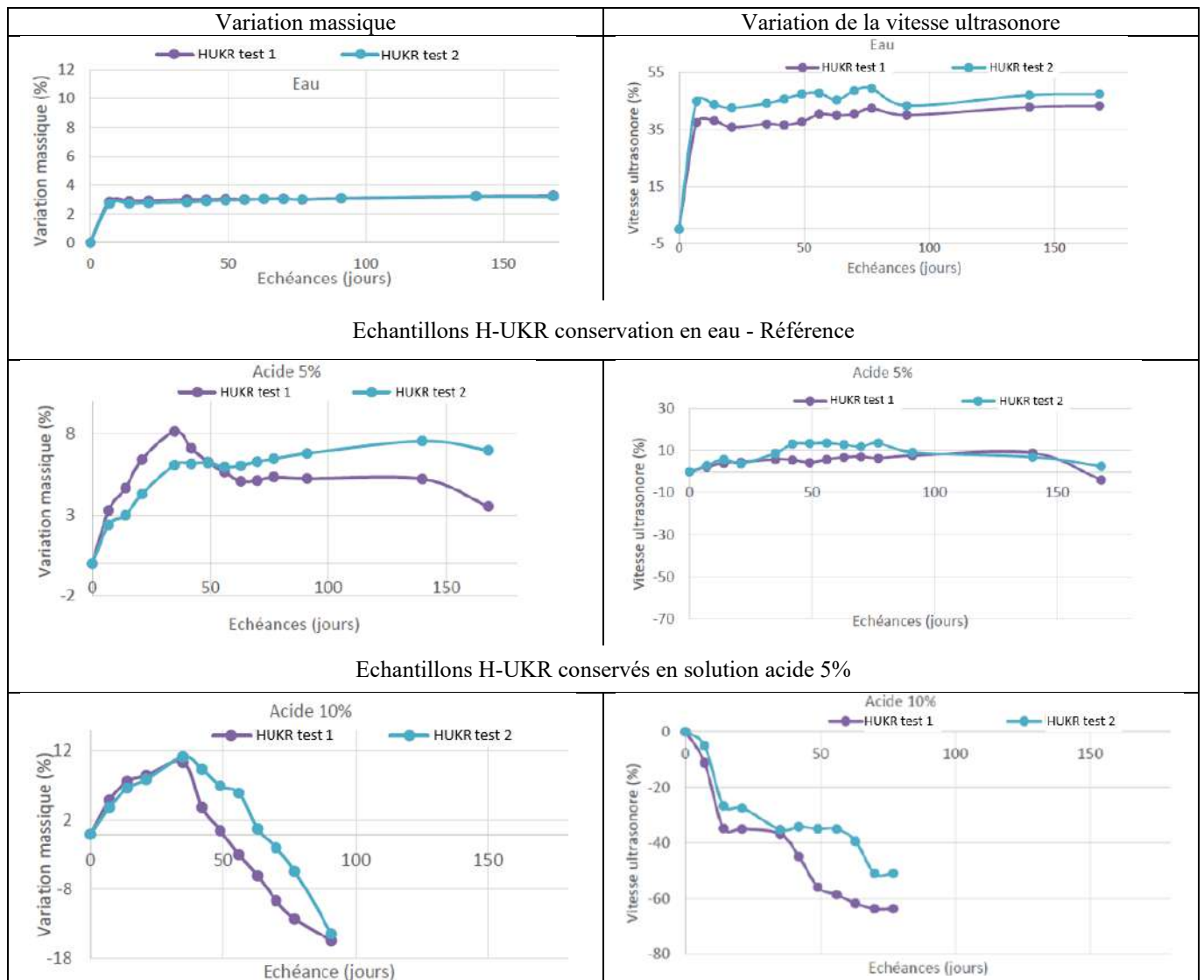


Figure 23 : Résultats du suivi massique et vitesse ultra sonore en fonction du dosage en acide (acide sulfurique H₂SO₄)

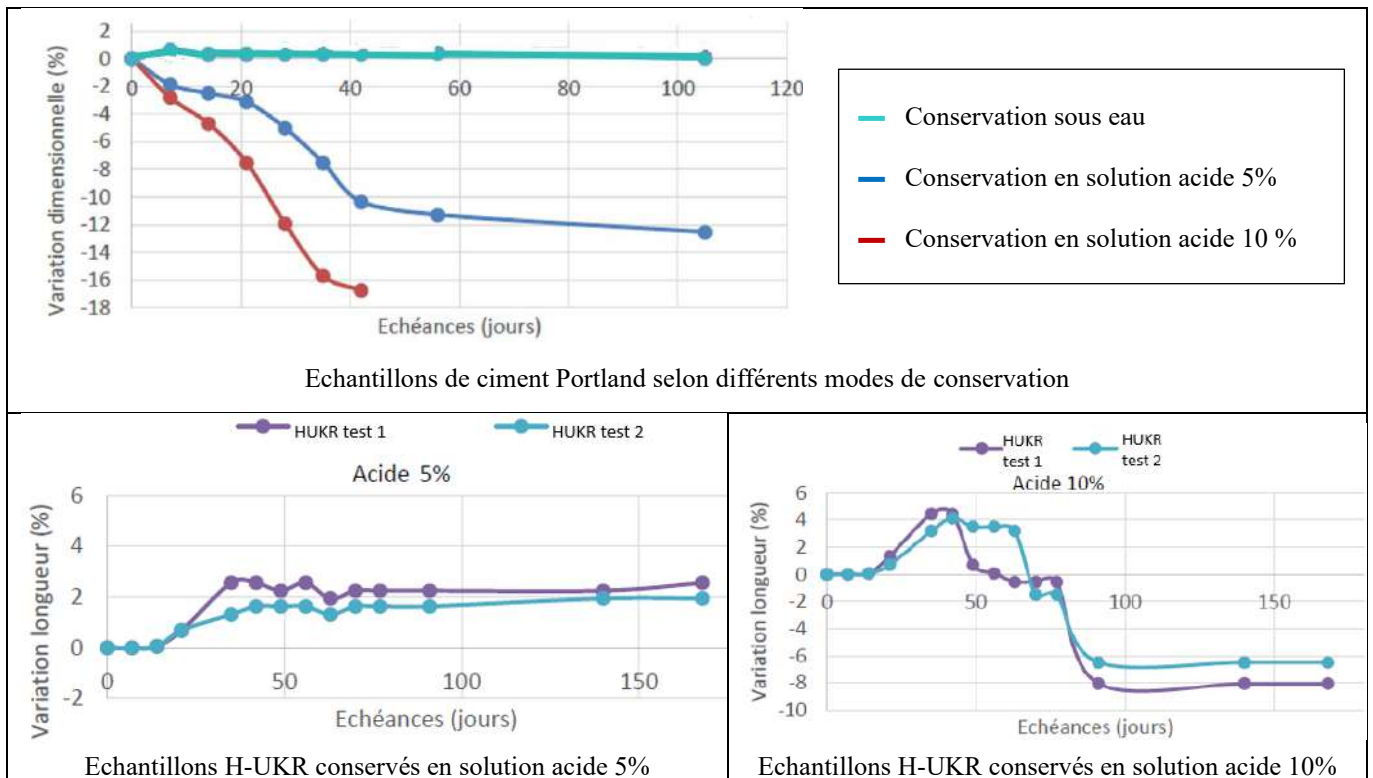


Figure 24 : Résultats du suivi de la variation de longueur lors de l'essai d'attaque acide (acide sulfurique H₂SO₄)

vi. Résistance à l'attaque sulfatique externe

Des essais d'attaque sulfatique externe ont été réalisés par le Laboratoire GCGM de l'IUT de Rennes [30], selon une méthode interne au laboratoire.

Deux dosages d'attaque sulfatique (sulfates d'aluminium Al₂(SO₄)₃) ont été utilisés : 5% et 10%.

Les éprouvettes sont des prismes de mortier normalisé 40x40x160 mm à base du ciment H-UKR (dosage à E/C = 0,48). Ces mortiers sont comparés à des éprouvettes de mortier à base d'un ciment Portland (dosage E/C = 0,50). Le ciment Portland de référence est un CEM I 52.5 N CE PM-ES-CP2 NF à 97% de clinker.

A différentes échéances, des mesures de masse, de vitesse ultrasonore (selon la norme NF EN 12504-2) et de variations dimensionnelles et de pH des matrices sont suivies.

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.

Les résultats sont présentés dans Figure 25 à Figure 27, pages suivantes.

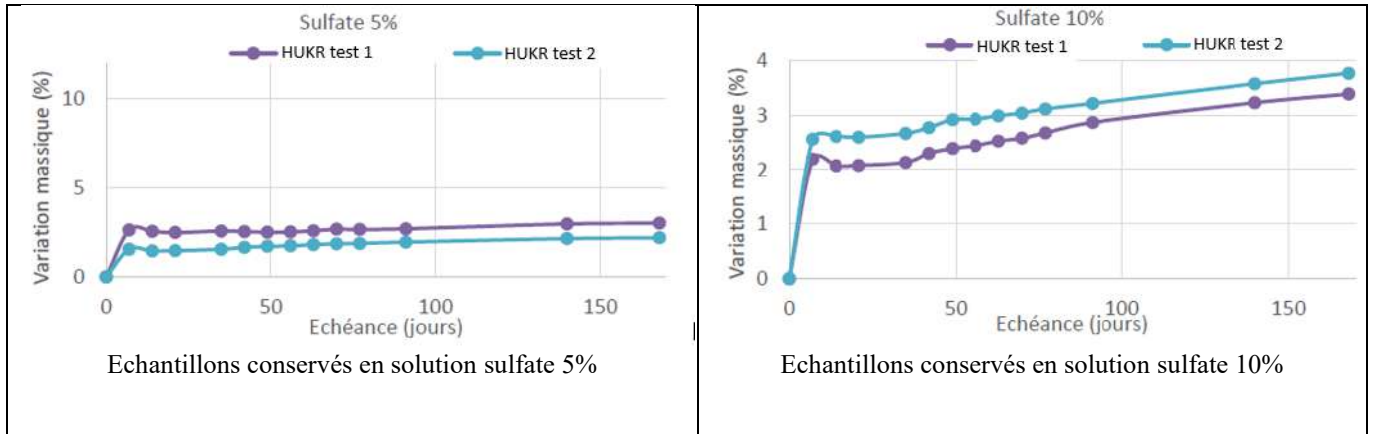


Figure 25 : Résultats du suivi de masse lors de l'essai d'attaque sulfatique externe (Sulfate d'aluminium $Al_2(SO_4)_3$)

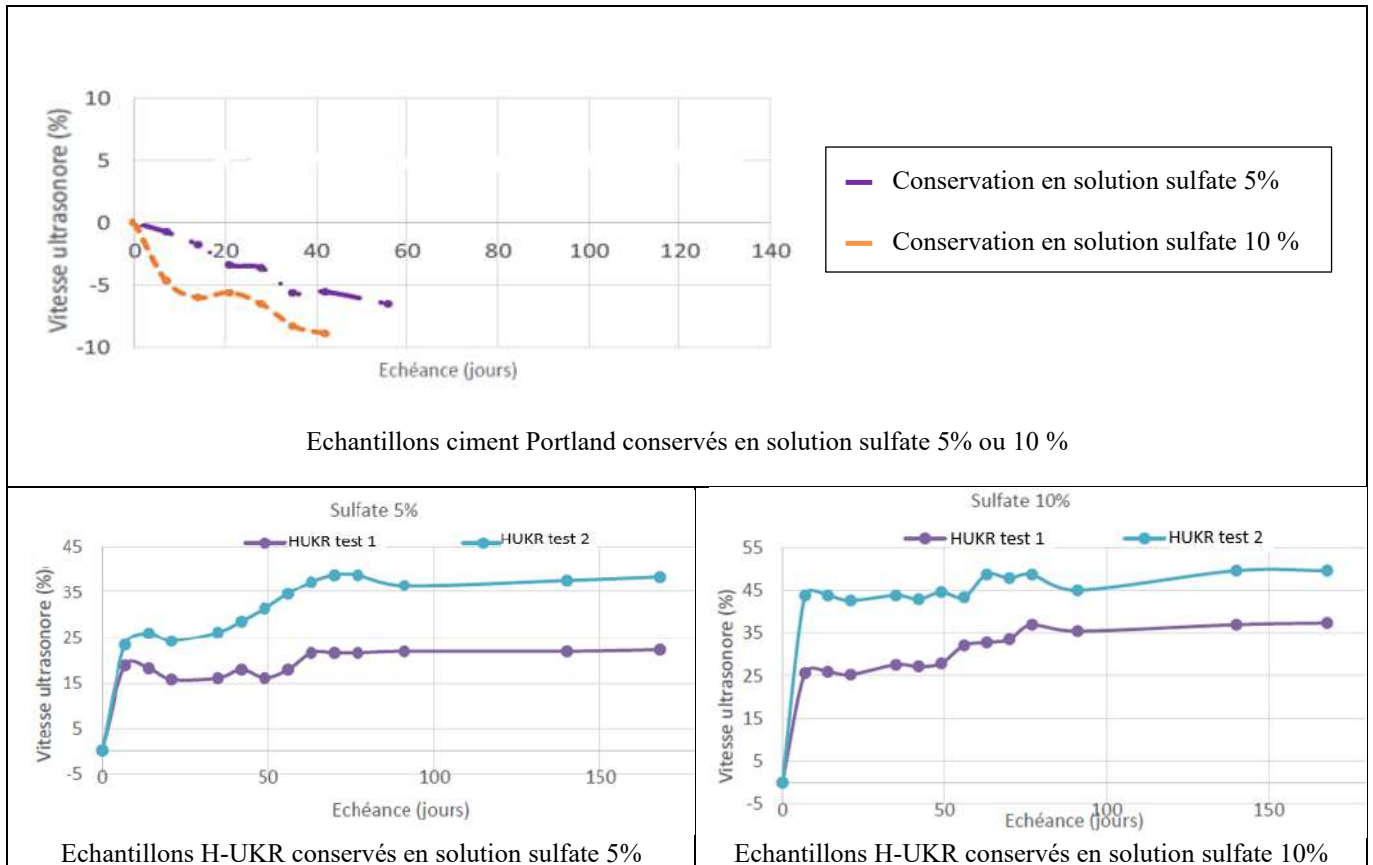


Figure 26 : Résultats du suivi de vitesse ultrasonore lors de l'essai d'attaque sulfatique externe (Sulfate d'aluminium $Al_2(SO_4)_3$)

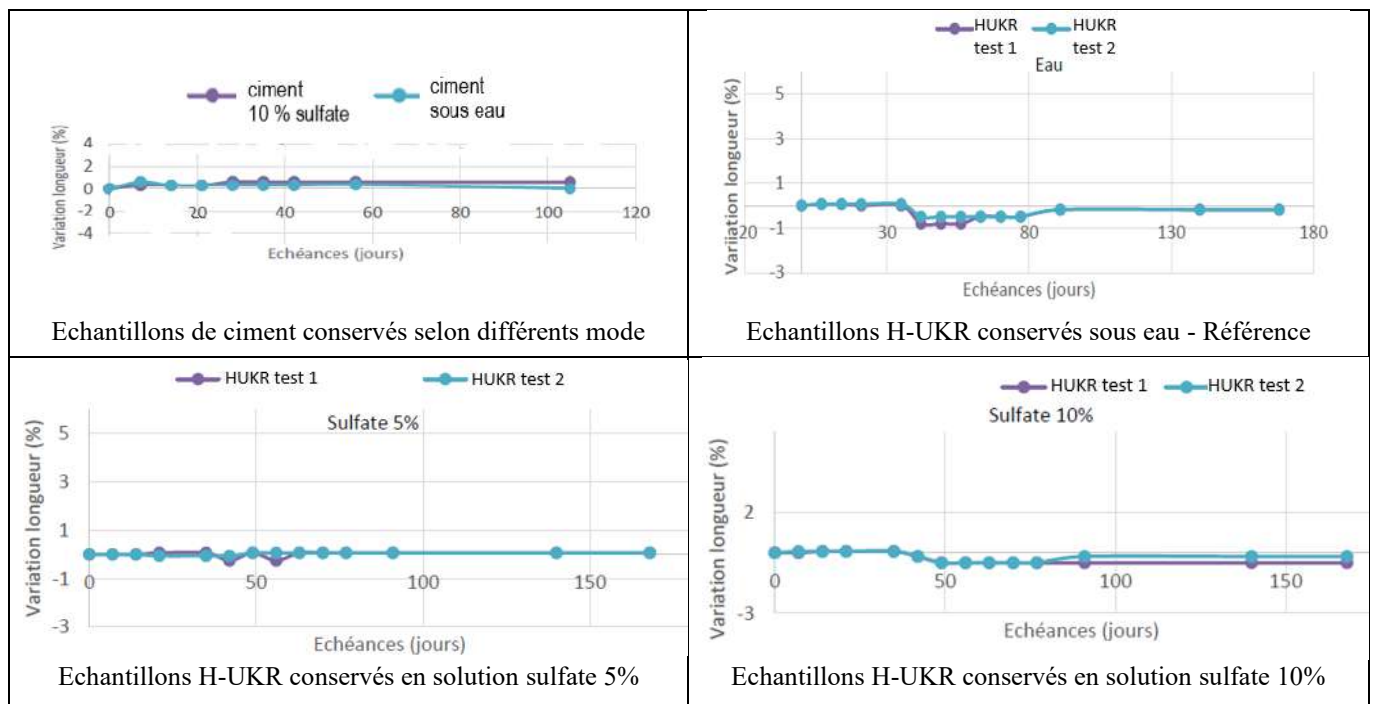


Figure 27 : Résultats du suivi de la variation de longueur lors de l'essai d'attaque sulfatique (Sulfate d'aluminium $Al_2(SO_4)_3$)

g. Réaction au feu

Le ciment H-UKR E bénéficie d'un classement au feu A1 [31].

Le ciment H-UKR BAP N bénéficie d'un classement au feu A1 [32].

h. Sécurité d'utilisation

Les ciments H-UKR font l'objet d'une fiche de sécurité type FDS et bénéficient d'un classement A+ pour les émissions de polluants volatils [33].

Le ciment H-UKR ne contient pas de substances classées comme substances extrêmement préoccupantes par l'Agence Européenne des produits chimiques (ECHA) conformément à l'article 57 du règlement REACH.

Le Fiche de Donnée de Sécurité du H-UKR est disponible sur le site internet d'Hoffmann Green Cement Technologies.

De la même façon qu'un ciment Portland, il est nécessaire lorsque l'on manipule les ciments H-UKR ou mortiers/bétons à base de ciments H-UKR 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

i. Environnement

Le ciment H-UKR fait l'objet d'un inventaire de cycle de vie (ICV) disponible sur la base INIES.

Le béton à base de ciment H-UKR fait l'objet de fiches FDES disponibles sur la base INIES. Un configurateur de FDES, certifié INIES, est disponible à l'adresse <https://calculateurco2.ciments-hoffmann.fr/login>.

F. CHANTIERS DE REFERENCE

Fondations / Dallage	Bournezeau	2018	H-UKR BAP N	200 m ³	Chantier expérimental / Usine HOFFMANN
Voiles + poteaux	Bagnolet	Mars 2021	H-UKR E	15 m ²	Chantier expérimental
Planchers	Pantin	Mars 2021	H-UKR E	22 m ²	Chantier expérimental
Escaliers	Paris	Mars 2021	H-UKR E	2 escaliers	ATEX B
Voiles intérieurs	St Leu la Foret	Avril 2021	H-UKR E	159 m ³	ATEX B
Semelles / Dallage	Bournezeau	Avril 2021	H-UKR E	100 m ³	Avis de chantier
Fondations	Bournezeau	Mai 2021	H-UKR E	1000 m ³	Chantier expérimental – Usine HOFFMANN
Fondations / silo / voiles	Bournezeau	Juin 2021	H-UKR E	5500 m ³	Chantier expérimental – Usine HOFFMANN
Dallage	Bournezeau	Septembre 2021	H-UKR E	220 m ³	Chantier expérimental – Usine HOFFMANN
Voiles Fondations 6 villas	Suisse	Juin 2021	H-UKR E	1110 m ³	-
Dallage	Moissy Cramayel	Juin 2021	H-UKR E	142 m ³	Chantier expérimental
Voiles intérieurs	Lagord	Juillet 2021	H-UKR E	120 m ³	Avis de chantier
Dallage	Moulleron le Captif	Juillet 2021	H-UKR E	200 m ³	Avis de chantier
Voiles intérieurs / poteaux/ poutres / planchers	Les Sables d'Olonne	Juillet 2021	H-UKR E	100 m ³	Avis de chantier ATEX B
Dallage	Jard sur Mer	Juillet 2021	H-UKR E	50 m ³	Chantier expérimental
Modules préfabriqués	Reims	Septembre 2021	H-UKR E	54 m ³	Chantier expérimental
Semelles	Moulleron le Captif	Octobre 2021	H-UKR E	25 m ³	Avis de chantier
Poteaux / Planchers	Orleans	Octobre 2021	H-UKR E	120 m ³	Avis de chantier
Dallage	Bournezeau	Octobre 2021	H-UKR E		Avis de chantier
Béton de propreté	Paris	Décembre 2021	H-UKR E	200 m ³	Avis bureau de contrôle

G. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] LERM SETEC, Bulletin d'analyse sur liant H-UKR E n°45357.16.001 du 05/03/2021
- [2] LERM SETEC, essais de retrait total et endogène d'un mortier à base de liant H-UKR n°45357.7121.LP du 19/01/2021
- [3] Chapitre « Absorption capillaire » du Rapport d'essais « Durabilité de matériaux alcali activés », Laboratoire GCGM, IUT Rennes, Département Génie Civil (15 octobre 2019)

- [4] Chapitre « Propriétés mécaniques » du Rapport d'essais « Durabilité de matériaux alcali activés », Laboratoire GCGM, IUT Rennes, Département Génie Civil (15 octobre 2019)
- [5] Suivi des performances long terme sur mortiers de type H-UKR, HOFFMANN, janvier 2020
- [6] Etude statistique sur les performances du liant HUKR-E (production septembre 2020 à septembre 2021), HOFFMANN, Rapport n°1 (version 1.0)
- [7] CSTB et Cebtp, Rapport concernant les essais de retrait et de fluage en compression sur béton (formule 1) n°EEM 20 26085654-A-1, septembre 2021
- [8] CSTB et Cebtp, Rapport concernant les essais de retrait et de fluage en compression sur béton (formule 3) n°EEM 20 26085654-C, septembre 2021
- [9] CSTB et Cebtp, Rapport concernant les essais de retrait et de fluage en compression sur béton (formule 8) n°EEM 20 26085654-G, 2021 (projet)
- [10] Rapport d'essais n°46390 « essais de compression et essais de module sur béton C25 Portland », GEOS, Aout 2021
- [11] Rapport d'essais n°46748 « essais de compression, essais de fendage et essais de module sur béton C25 C30 et C35 HUKR », GEOS, Aout 2021
- [12] Rapport d'essais n°46121 « essais de compression, essais de fendage et essais de module sur bétons C30 et C25 Portland », GEOS, Juillet 2021
- [13] CSTB, rapport d'essais d'adhérence entre armature et béton n°EEM 19 26080852/A, septembre 2020
- [14] CSTB, rapport d'essais essais sismiques sur armature sur béton H-UKR n°EEM 21 02965, juillet 2021
- [15] CSTB, rapport d'essais de détermination du comportement postpic en compression sur bétons à base de ciment H-UKR n°EEM 19 26081303/A-1, décembre 2020
- [16] Chapitre « Porosité » du Rapport d'essais « Durabilité de matériaux alcali activés », Laboratoire GCGM, IUT Rennes, Département Génie Civil (15 octobre 2019)
- [17] LERM SETEC, Etude comparative des propriétés de transfert d'un béton à base de liant H-UKR avec deux bétons de référence (l'un à base d'un CEM I ou II et l'autre à base d'un CEM III) et pour différentes cures, N°49670.001.01.A, janvier 2022
- [18] CSTB, rapport essais de résistance au gel modéré des bétons avec ciment H-UKR n°33M 20 26085648-A, Mai 2021
- [19] CSTB, rapport essais de résistance au gel sévère des bétons avec ciment H-UKR n°33M 20 26085648-B, Septembre 2021
- [20] Rapport d'essais n°20B1723 « gel-dégel NF P18-425 », LD contrôles, janvier 2021
- [21] Rapport d'essais n°20B1724 « gel-dégel NF P18-425 », LD contrôles, janvier 2021
- [22] Rapport d'essais n°025601 « gel-dégel NF P18-425 », CERIB, février 2021
- [23] Rapport d'essais n°026364 « gel-dégel NF P18-425 », CERIB, avril 2021
- [24] Rapport d'essais n°20B2315 « gel-dégel NF P18-425 », LD contrôles, Mars 2021
- [25] Rapport d'essais n°20B2316 « gel-dégel NF P18-425 », LD contrôles, Mars 2021
- [26] Rapport d'essais n°21B0257 « gel-dégel NF P18-425 », LD contrôles, Mai 2021
- [27] Rapport d'essais n°21B0258 « gel-dégel NF P18-425 », LD contrôles, Mai 2021
- [28] Rapport d'essais n°21B0259 « gel-dégel NF P18-425 », LD contrôles, Mai 2021
- [29] Chapitre « Attaque acide » du Rapport d'essais « Durabilité de matériaux alcali activés », Laboratoire GCGM, IUT Rennes, Département Génie Civil (15 octobre 2019)
- [30] Chapitre « Attaque sulfate » du Rapport d'essais « Durabilité de matériaux alcali activés », Laboratoire GCGM, IUT Rennes, Département Génie Civil (15 octobre 2019)
- [31] CSTB, Rapport de classement du produit H-UKR 01 n°ES541190664, février 2020.
- [32] CSTB, Rapport de classement du produit H-UKR BAP-N n°ES541190671, février 2020.
- [33] CSTB, rapport d'essais de classement des polluants volatils sur ciment H-UBR n° SC-2021-06574/B, décembre 2021
- [34] pr FD P18-480 Béton – Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle (projet septembre 2021)
- [35] Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel. Environnements hivernaux rigoureux. Guide technique. Techniques et Méthodes. Université Gustave Eiffel. Octobre 2021.
- [36] Rapport d'étude C20LL029 « Comportement au gel des liants innovants pour béton », Cerema, février 2022
- [37] CSTB et Université Gustave Eiffel, Etude comparative de la résistance de mortiers à base d'un ciment H-UKR vis-à-vis de la carbonatation (étude en cours)

ANNEXES

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

Plan de contrôle qualité ciment H-UKR



1. CADRE GENERAL

Le système de contrôle qualité des produits Hoffmann est basé sur 2 axes :

- L'analyse des performances
- L'analyse des compositions

Chaque production et chaque matière première réceptionnée font l'objet d'un échantillon moyen. L'échantillonnage est réalisé sur plusieurs points selon le protocole §2.

2. ÉCHANTILLONNAGE

L'échantillonnage concerne la totalité des produits finis et des MP. Les échantillons de matières premières et de produits finis faisant l'objet d'analyses sont archivés et conservés au moins un an dans une échantilloteque.

Les échantillons sont réalisés selon le protocole général suivant :

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

cf. MOD-PROD-001 – « Protocole échantillonnage Big-Bag »

cf. MOD-PROD-002 – « Protocole échantillonnage réception et expédition »

cf. MOD-PROD-003 – « Protocole échantillonnage Sacs »

cf. MOD-PROD-004 – « Protocole échantillonnage Trémie »

3. ANALYSE DES MATIERES PREMIERES

Le but de la procédure étant de s'assurer de la conformité des livraisons.

- Etape 1 : Réception des matières premières

Afin d'éviter toute erreur, les silos sont identifiés avec la nature de la matière première MOD-STOCK-001 « Mode de stockage des matières premières et des produits finis dans les silos ».

La procédure MOD-APP-001 « Procédure de réception et gestion des Matières Premières » s'applique à chaque livraison.

L'enregistrement des réceptions s'effectue sur la check-list ENR-APP-002 – « Check liste réception des matières premières vrac ».

Plan de contrôle qualité ciment H-UKR



OBJET :

Ce document décrit le plan de contrôle qualité mis en place pour nos matières premières et nos produits finis pour le ciment H-UKR.

DIFFUSION :

Ce document est à diffuser au directeur scientifique, au directeur d'exploitation et à la technicienne contrôle qualité.

REVISIONS :

Date	Modifications	Version
04/08/2021	Création	1.0

VALIDATION DOCUMENTAIRE :

Nom	Rédacteur	Approbateur
	BOUHARIE	HOFFMANN.D
Fonction	Technicienne Contrôle Qualité	Directeur scientifique
Date	04/08/2021	06/08/2021

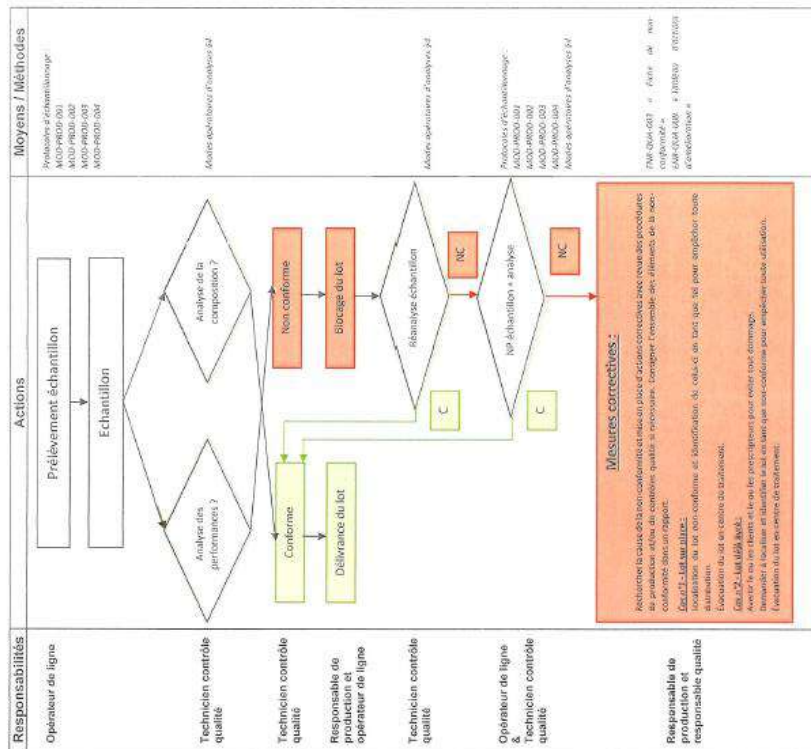
HOFFMANN GREEN CEMENT TECHNOLOGIES
A LA BREPAUBRE - CHAÏLÉ SOUS LES CHAMPAIGNES
18310 RIVEDET FORT-MOISE - FRANCE
03 25 23 00 00

PRO-CQ-026
Version : 1.0
Date d'application :
06/08/2021
Page 4 sur 5

Plan de contrôle qualité ciment H-UKR



5. LOGIGRAMMES – CONDUITE A TENIR en cas de NC sur produits finis



PRO-CQ-026
Version : 1.0
Date d'application :
06/08/2021
Page 3 sur 5

Plan de contrôle qualité ciment H-UKR



• Etape 2 : Analyse des matières premières au laboratoire de contrôle qualité

L'échantillon sera ensuite analysé et/ou conservé au laboratoire contrôle qualité pour s'assurer que le produit correspond aux spécifications avant utilisation dans nos liants.

Les principales méthodes d'analyse utilisées pour ce faire sont fonction de la nature de la matière première :

- Spectrométrie de fluorescence X
- Diffraction X (taux d'amorphe)
- Surface spécifique Blaine

Exemples de méthode d'analyse en fonction de la matière première considérée :

CONSTITUANTS	METHODES
Laitier	Fluorescence X, Taux d'amorphe, Blaine

Les autres constituants secondaires seront analysés en cas de non-conformité de production et si le laitier est conforme.

Les résultats et les exigences sont tracés sur le fichier : ENR-CQ-019 - Résultats des contrôles qualité – MP.

4. ANALYSE DES PERFORMANCES DES PRODUITS FINIS ET DE LEURS COMPOSITIONS :

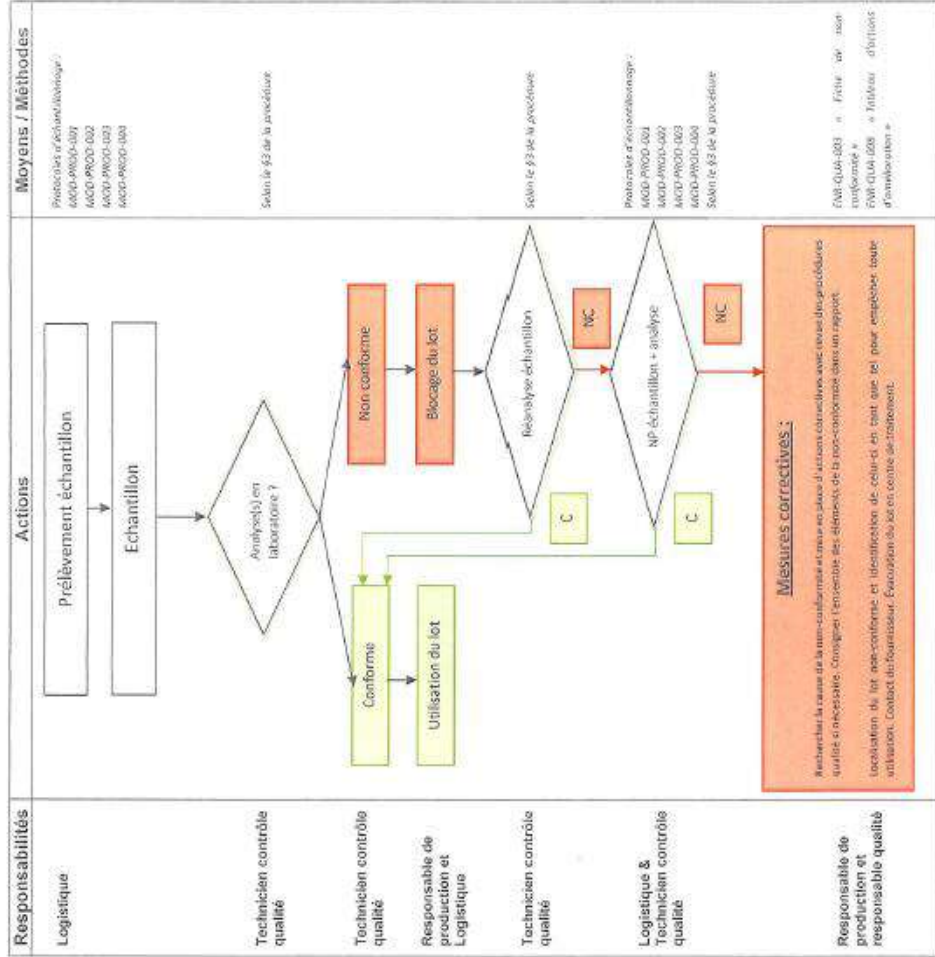
Pour le ciment H-UKR les analyses à réaliser sur le produit fini sont les suivantes :

Caractéristiques	Méthodes d'analyse	Fréquence	Critères d'acceptation
Constituants et composition du ciment	ANPD-CQ-019 + Analyse par fluorescence X +	1 fois	Acceptation à la réception de la matière première
Caractéristiques	Méthodes d'analyse	Fréquence	Critères d'acceptation
Résistances à la compression (à court terme et long terme)	ANPD-CQ-027 + Préparation du mortier + Malaxage + Moulage + ANPD-CQ-026 + Mesure de la compression +	Sur chaque DE	Acceptation à la réception de la matière première

Les résultats et les exigences sont tracés sur le fichier : ENR-CQ-028 - Résultats de contrôles qualité - H-UKR H-EVA...

Plan de contrôle qualité ciment H-UKR

6. LOGIGRAMMES – CONDUITE A TENIR en cas de NC sur matière première



ANNEXES

Annexe 2: Tables des matières du dossier technique

A.	INTRODUCTION	21
B.	FABRICATION DU CIMENT	21
a.	Matières premières	21
b.	Fabrication	21
c.	Contrôles	22
d.	Conditionnement et livraison	22
C.	FABRICATION DU BETON	22
a.	Centres de fabrication	22
b.	Compositions	23
D.	APPLICATIONS ENVISAGEES	23
E.	RESULTATS EXPERIMENTAUX	23
a.	Caractérisation du ciment H-UKR	23
b.	Caractérisations sur mortier normalisé à base de ciment HUKR	25
i.	Variations dimensionnelles	25
ii.	Absorption capillaire.....	27
iii.	Résistance à la compression	27
iv.	Résistance à la flexion.....	29
v.	Stabilité des performances mécaniques	29
c.	Caractérisations sur béton à base de ciment HUKR	30
i.	Résistance mécanique	30
ii.	Retraits sur béton	31
iii.	Comportement au fluage en compression.....	33
d.	Caractérisation de l'adhérence armature / béton	35
e.	Comportement post-pic en compression	36
f.	Durabilité	37
i.	Porosité accessible à l'eau	37
ii.	Mesure du coefficient de diffusion des chlorures sur béton	39

iii.	Mesure de la profondeur de carbonatation sur béton	39
iv.	Résistance au gel-dégel	41
	Essais de gel modéré	41
	Essais de gel sévère	45
v.	Résistance aux attaques acides	47
vi.	Résistance à l'attaque sulfatique externe	48
g.	Réaction au feu	50
h.	Sécurité d'utilisation	50
i.	Environnement	50
F.	CHANTIERS DE REFERENCE	51
G.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	51