

**EVALUATION TECHNIQUE DE PRODUITS ET MATERIAUX**  
**N° ETPM-18/0056 du 30 mars 2020**  
concernant le ciment pour béton H-UKR

**Titulaire :** HOFFMANN GREEN CEMENT TECHNOLOGIES  
57 rue Archereau  
85480 BOURNEZEAU

Cette Evaluation Technique comporte 40 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 centrale à béton.

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 ci-dessous :

Les % indiqués sont des pourcentages massiques		Ciment H-UKR	Ciment conforme NF EN 197-1	Ciment conforme NF 15743
Constituants	Laitier	S = 80 à 90%	$36 \leq S \leq 95\%$ pour les CEM III	$S \geq 75\%$
	Activateur carbo-silicate	10 à 20%	Non couvert	Non couvert L'activateur utilisé est un sulfate de calcium : $5 \leq Cs \leq 20\%$
	Clinker	K = 0%	$K \geq 5\%$ minimum	$0 < K \leq 5\%$

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 et pour la caractérisation de l'adhérence acier / béton.

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.

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 Prima : ciment pur
- H-UKR Technika : ciment pur + mélanges de filler calcaire.

L'évaluation, ainsi que l'ensemble des résultats d'essais analysés pour cette ETPM, portent uniquement sur le ciment dur de dénomination commerciale H-UKR Prima. Lorsque, dans la présente ETPM, il est fait référence au ciment H-UKR, il s'agit du ciment H-UKR Prima.

## 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 5 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. Les bétons testés, à base de ciment H-UKR, n'ont pas été adjuvés.

### Temps de prise

Des mesures de temps de début de prise ont été effectuées, conformément à la norme NF EN 196-3.

La valeur mesurée (25 min) est très inférieure à l'exigence requise pour cette caractéristique pour les ciments normalisés ( $\geq 45$  min pour les ciments de classe de résistance 52,5 conformes à la norme NF EN 197-1 ou NF EN 15743).

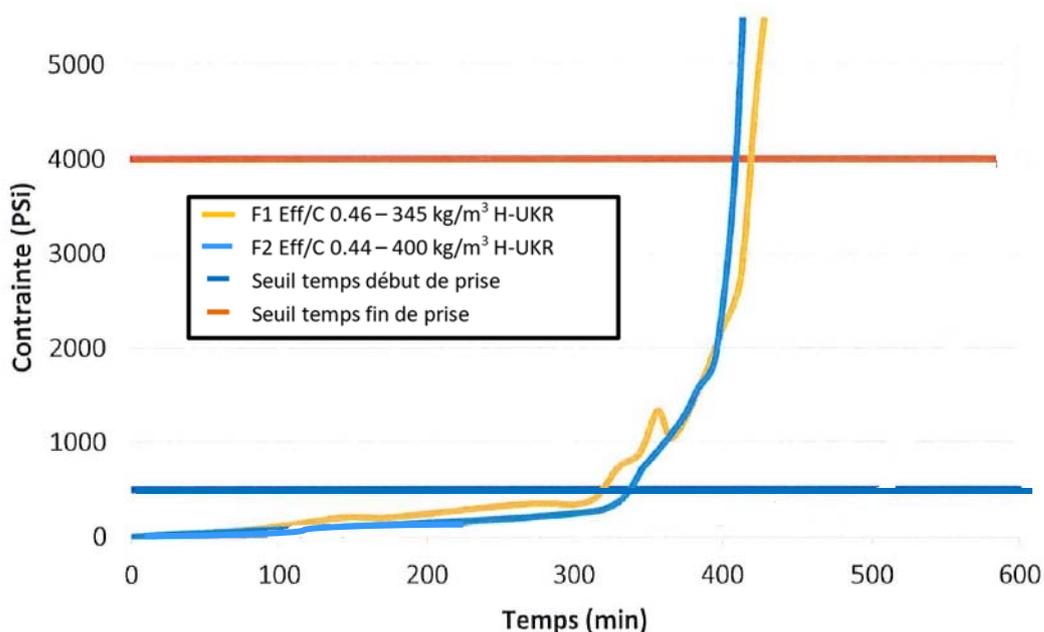
Les constats effectués sur les différents chantiers tests, impliquant un transport d'au moins 45 minutes avant coulage du béton, démontrent que le début de prise est plus élevé que la valeur mesurée. L'essai normalisé, avec l'appareil Vicat, selon la norme NF EN 196-3 paraît non adapté à la mesure sur 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 cette problématique 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 :

- Formule F1 avec un dosage en ciment H-UKR de  $345 \text{ kg/m}^3$  et un rapport  $E_{ff}/C$  de 0,46 ;
- Formule F2 avec un dosage en ciment H-UKR de  $400 \text{ kg/m}^3$  et un rapport  $E_{ff}/C$  de 0,44.

Les temps de prise obtenus en laboratoire à  $20^\circ\text{C}$  et une hygrométrie  $> 65\%$  sont (voir Figure 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.



### Caractéristiques mécaniques

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 le tableau 3 et la Figure 5 du dossier technique.

Les valeurs moyennes sont de l'ordre de 26 MPa à 2 jours, de 39 MPa à 7 jours et de l'ordre de 52 MPa à 28 jours. A 120 jours, la résistance à la compression est comprise entre 70 et 75 MPa.

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 le tableau 3 et dans la Figure 7 du dossier technique.

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

Le module d'Young d'un béton fabriqué avec le ciment H-UKR (dosage 400 kg/m<sup>3</sup>, E/C = 0,5) est de l'ordre de 30,5 GPa (valeur moyenne) à 28 j (conservation en mode endogène). Ce même béton dispose d'une résistance à la compression de l'ordre de 38,8 MPa, pour un même mode de conservation.

### Variations dimensionnelles

Les variations dimensionnelles ont été déterminées en s'inspirant de la norme NF P15-433 sur des éprouvettes de mortier normalisé de dimensions 40 mm x 40 mm x 160 mm et conduisent aux résultats suivants :

	Mortier avec ciment H-UKR	Mortier avec ciment Portland
Retrait libre	1000 µm/m (cure 20°C et 90%HR) 1400 µm/m (cure 23°C et 50%HR)	350 µm/m (cure 20°C et 90%HR) 470 µm/m (cure 23°C et 50%HR)
Retrait de séchage (après 180 j de cure humide)	120 µm/m	150 µm/m
Retrait endogène	2000 µm/m (cure 20°C et 90%HR) 2400 µm/m (cure 23°C et 50%HR)	570 µm/m (cure 20°C et 90%HR) -
Variations dimensionnelles entre états conventionnels extrêmes (séchage 60°C et immersion totale) (après 180j de cure humide)	100 µm/m	800 µm/m

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

Les valeurs de retrait libre du ciment H-UKR sont très supérieures à celles d'un ciment Portland, mais les pertes de masses associées sont similaires.

Les valeurs de retrait de séchage sont du même ordre de grandeur que celles d'un ciment Portland.

Les valeurs de retrait endogène du ciment H-UKR sont également très supérieures à celles d'un ciment Portland (570 µm/m avec une cure à 20°C), mais les pertes de masses associées sont similaires.

Les valeurs de retraits après cycles de séchage à 60°C et immersion totale sont du même ordre de grandeur que celles d'un ciment Portland.

Des mesures de retrait endogène et de retrait de dessiccation ont également été menées sur une formulation de béton dans le cadre des essais de fluage en compression.

La formulation de béton à base de ciment H-UKR testée est dosée à 400 kg de ciment avec un rapport  $E_{eff}/C$  de 0,5.

Après 284 jours d'essais sur le béton H-UKR, le retrait endogène est de 197 µm/m et le retrait de dessiccation est de 593 µm/m. Ces valeurs sont comparables à celles obtenues sur un béton ordinaire à dosage équivalent (retrait endogène pour environ 200 µm/m et retrait de dessiccation pour environ 600 µm/m).

	Béton H-UKR	Béton avec ciment Portland
Retrait endogène (après 284 jours)	197 µm/m	200 µm/m
Retrait dessiccation (après 284 jours)	593 µm/m	600 µm/m

## **Durabilité**

Préambule aux essais de durabilité : les essais de durabilité présentés ci-dessous sont basés sur des échantillons de mortier. L'évaluation de la durabilité d'un béton à base de ciment H-UKR pouvant être impactée par la nature des agrégats, leurs caractéristiques, le dosage en liant et en eau etc..., les résultats des essais sur mortier ne seront pas transposables sur béton et pourront donner lieu à des justifications complémentaires.

### Porosité accessible à l'eau et absorption capillaire

Des essais comparatifs avec un mortier avec base de ciment Portland, ont été menés pour la mesure de porosité accessible à l'eau effectuées, selon la norme NF P18-459.

La porosité accessible à l'eau du mortier à base de ciment H-UKR est de 16,8%, contre 14,6% pour le mortier à base de ciment Portland.

En complément de ces mesures de porosité accessible à l'eau, des essais d'absorption capillaire ont été menés et sont présentés dans le Tableau 5 du dossier technique.

Ces résultats montrent qu'un mortier à base d'un ciment H-UKR à une sorptivité  $S$  légèrement plus élevée qu'un mortier à base de ciment Portland ( $S = 0,04 \text{ kg.m}^{-2}/\text{s}^{1/2}$  pour le ciment H-UKR contre  $0,03 \text{ kg.m}^{-2}/\text{s}^{1/2}$  pour le ciment Portland).

Ce constat est attribué à un diamètre moyen de pore plus faible pour le ciment H-UKR, facilitant l'absorption capillaire (rayon moyen des pores d'environ  $10\mu\text{m}$ , en utilisant la Loi de Jurin).

### Résistance au gel-dégel

Les essais de résistance aux cycles de gel/dégel sont présentés Figures 8 et 9 du dossier technique.

Les essais de résistance au gel-dégel (deux séries d'essais : gel dans l'eau/dégel dans l'eau selon la norme NF P18-424 et gel dans l'air/dégel dans l'eau selon la norme NF P18-425) montrent que le comportement sur mortier à base de ciment H-UKR est similaire à celui d'un mortier à base de ciment Portland.

Le suivi massique et de la vitesse ultrasonique montrent que les mortiers ne subissent aucun dommage lors des cycles de gel/dégel.

### Résistance à la carbonatation

Les essais de carbonatation, réalisés sur éprouvettes de mortier, sont présentés Figures 10 à 12 du dossier technique.

Les essais sont réalisés selon un protocole s'inspirant de la norme NF EN 12390-10, en enceinte climatique contrôlée. Les conditions climatiques étant une concentration en  $\text{CO}_2$  de 20% (au lieu d'une concentration de 3% de  $\text{CO}_2$ ) et une humidité relative de 70%. De plus, un indicateur coloré alternatif à la phénolphtaléine a été utilisé (le chou rouge, possédant un virage de sa couleur autour d'un pH 11, contre pH 9 pour la phénolphtaléine) pour apprécier le front de carbonatation.

Ces résultats montrent que la profondeur de carbonatation atteint une profondeur de 45 mm. Le pH de la matrice évolue de 12,0 à 11,1 après 120 jours de carbonatation.

Les risques de corrosion des aciers dans un béton à base de ciment H-UKR sont faibles, la solution poreuse étant au-delà de la limite de dépassivation pH 9 (diagramme de Pourpaix).

Alors que pour un ciment à base de Portland, le pH interstitiel est dicté par la carbonatation de la Portlandite faisant varier le pH interstitiel de initialement 12.6 à moins de 8, le ciment H-UKR contient principalement des carbo-silicates. Leur carbonatation peut se manifester par la formation de carbonates de sodium (disposant d'un fort pouvoir tampon vers pH 11 à 11,6). La zone tamponnée après carbonatation se situe donc à une échelle de pH d'environ +3,5 par rapport à une zone tamponnée après carbonatation de la Portlandite (pH de 8).

L'évaluation vis-à-vis de la résistance à la carbonatation, réalisée dans le cadre de la présente ETPM (essais sur mortiers sans référence), permet de se prononcer uniquement sur une compatibilité du liant H-UKR avec une utilisation en intérieur. Des justifications complémentaires devront être apportées pour d'autres conditions d'exposition.

### 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 et sulfatiques

Les essais de résistance aux attaques acides sont présentés Figures 13 à 16 du dossier technique.

Les essais de résistance aux attaques sulfatiques sont présentés Figures 17 à 19 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 montrent que le comportement sur mortier à base de ciment H-UKR est meilleur que celui d'un mortier à base de ciment Portland.

	Mortier avec ciment H-UKR	Mortier avec ciment Portland
Attaque acide (5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	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 <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	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, hémi-hydrate).

Les essais de résistance aux attaques sulfatiques montrent que le comportement sur mortier à base de ciment H-UKR n'est pas impacté par les attaques sulfatiques (comportement similaire aux mêmes éprouvettes conservées en eau).

	Mortier avec ciment H-UKR	Mortier avec ciment Portland
Attaque sulfatique (5% Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	Après 175 jours : Augmentation massique (de l'ordre +4%) Variation vitesse ultrasonore +23%	Après 100 jours : Pas de variation massique
Attaque sulfatique (10% Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	Après 175 jours : Augmentation massique (de l'ordre +3%) Variation vitesse ultrasonore +37%	Après 100 jours : Pas de variation massique

### Adhérence béton acier

Des essais d'adhérence entre armature acier HA12 et deux formulations de béton avec ciment H-UKR, en comparaison avec le même béton avec un liant Portland ont été effectués. Les résultats sont présentés Tableau 7 du dossier technique.

A 28 jours d'âge, la résistance en compression des différents bétons testés n'était pas comparable. Néanmoins, le ratio « contrainte d'adhérence acier/béton » et « résistance à la compression du béton » est homogène entre les différentes formulations testées.

Type de ciment (dosage)	Résistance à la compression jour essai (MPa)	Contrainte d'adhérence acier / béton $\tau$	Résistance à la compression jour essai (MPa)	Contrainte d'adhérence acier / béton $\tau$ (kN)
	Essais à 28 jours		Essais à 87 jours	
Ciment H-UKR (dosage : 320 kg/m <sup>3</sup> )	$f_c = 31,5$ MPa $f_{c,k} = 27,9$ MPa	12,8 MPa (5 essais, valeur caractéristique : 11,2 MPa)	$f_c = 36,5$ MPa $f_{c,k} = 33,1$ MPa	15,1 MPa (1 seul essai)
Ciment H-UKR (dosage : 400 kg/m <sup>3</sup> )	$f_c = 48,4$ MPa $f_{c,k} = 46,8$ MPa	19,1 MPa (5 essais, valeur caractéristique : 18,0 MPa)	$f_c = 55,6$ MPa $f_{c,k} = 49,8$ MPa	25,1 MPa (1 seul essai)
Ciment Portland (dosage : 400 kg/m <sup>3</sup> )	$f_c = 60,0$ MPa $f_{c,k} = 57,9$ MPa	27,0 MPa (5 essais, valeur caractéristique : 24,1 MPa)	$f_c = 66,6$ MPa $f_{c,k} = 63,9$ MPa	25,8 MPa (1 seul essai)

Type de ciment (dosage)	Ratio « Contrainte d'adhérence acier/béton » / Résistance compression béton Essais à 28 jours	Ratio « Contrainte d'adhérence acier/béton » / Résistance compression béton Essais à 87 jours
Ciment H-UKR (dosage 320 kg/m <sup>3</sup> )	0,40	0,41
Ciment H-UKR (dosage 400 kg/m <sup>3</sup> )	0,39	0,45
Ciment Portland (dosage 400 kg/m <sup>3</sup> )	0,45	0,39

A 90 jours, à dosage en liant équivalent, la contrainte d'adhérence d'un béton à base de liant H-UKR est comparable à un béton avec un liant Portland.

Pour des diamètres d'armature au-delà de HA12, afin d'appréhender les facteurs d'échelle dans la caractérisation de la contrainte d'adhérence acier/béton, des justifications complémentaires devront être apportées.

### Comportement au fluage en compression

Des essais de fluage en compression d'une formulation de béton avec ciment H-UKR dosé à 400 kg/m<sup>3</sup> ont été effectués. Les résultats sont présentés Figure 22 du dossier technique.

Le fluage a été effectué à un niveau de chargement de 15.5 MPa (40% de la charge à rupture).

Le béton testé a été caractérisé, ses caractéristiques à 28 jours (sur des séries de 3 cylindres conservées à 20°C en conditions endogène) sont les suivantes :

- Résistance en compression : 38,8 MPa (valeur moyenne)
- Module instantané de déformation longitudinale : 30 500 MPa (valeur moyenne)

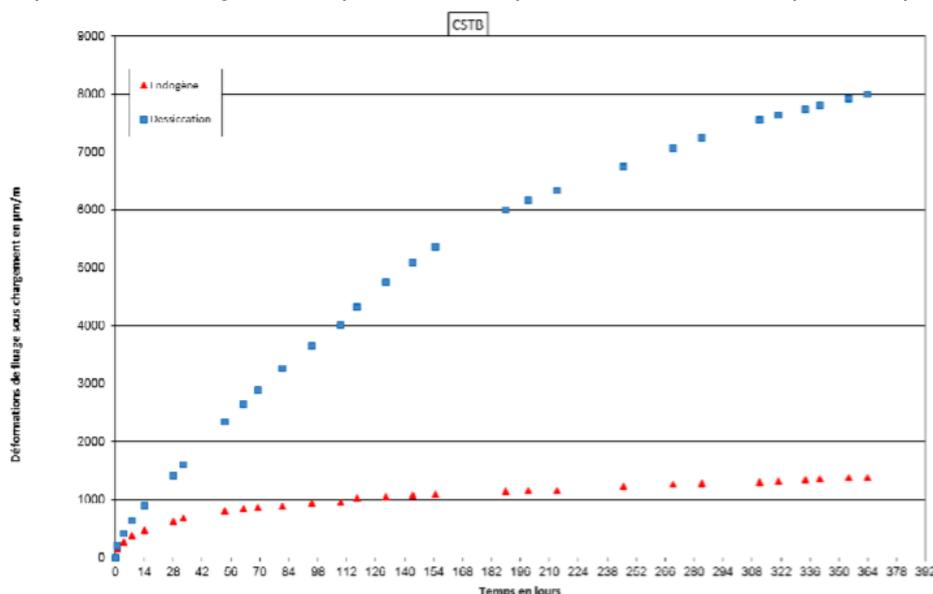
Les résultats des essais de fluage en compression montrent que la déformation totale sous chargement est la suivante :

- en mode dessiccation, après 364 jours : 8694 µm/m
- en mode endogène, après 364 jours : 1577 µm/m

Les mesures effectuées sur le lot d'éprouvettes non chargées donnent les caractérisations suivantes :

- Retrait de dessiccation, après 364 jours : 704 µm/m
- Retrait endogène, après 364 jours : 197 µm/m.

La figure ci-dessous présente le fluage en compression des éprouvettes de béton, exprimé en µm/m/MPa.



A titre d'exemple, pour un béton ordinaire à dosage en liant similaire (350 à 450 kg/m<sup>3</sup>), le fluage en compression est de l'ordre de 50 à 60  $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$  en mode endogène et de l'ordre de 110 à 120  $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$  en mode dessiccation. Les valeurs de déformation en fluage du béton à base de ciment H-UKR sont très importantes et doivent être prises en compte pour le dimensionnement des éléments de structure associés.

### Réaction au feu

Le ciment H-UKR bénéficie d'un classement A1.

## 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 2 du Dossier Technique.

## CONCLUSIONS

### Appréciation globale

L'évaluation du ciment H-UKR met en évidence les points suivants :

- 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 expériences chantiers présentées montrent un maintien de la rhéologie après 40 minutes de transport en toupie.
- Le ciment H-UKR présente une résistance mécanique (basée sur des valeurs moyennes), sur mortier normalisé, de 26 MPa à 2 jours, 39 MPa à 7 jours et de 52,5 MPa à 28 jours en compression.
- Le ciment H-UKR présente un retrait endogène et un retrait de séchage, sur mortier normalisé, plus élevés que ceux d'un ciment Portland. De plus, le ciment H-UKR présente un retrait sur mortier durci et des variations entre états conventionnels extrêmes similaires à celui avec un ciment Portland.
- 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.
- Les essais comparatifs de gel/dégel (gel dans l'eau/dégel dans l'eau ou gel dans l'air/dégel dans l'eau) montrent un comportement similaire du ciment H-UKR par rapport à un ciment Portland. Néanmoins, ces essais ne permettent pas de justifier du bon comportement aux risques de gel sur les formulations béton à base de ciment H-UKR.
- Les essais de résistance à la carbonatation permettent uniquement de se prononcer sur une compatibilité du liant H-UKR avec une utilisation en intérieur. Des justifications complémentaires devront être apportées pour d'autres conditions d'exposition.
- Les essais comparatifs d'attaque acide montrent un comportement plus durable du mortier à base de ciment H-UKR par rapport à un ciment Portland.

- Les essais comparatifs d'attaque sulfatiques montrent une absence d'impact sur le mortier à base de ciment H-UKR.
- Les 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. Pour des diamètres d'armature au-delà de HA12, afin d'appréhender les facteurs d'échelle dans la caractérisation de la contrainte d'adhérence acier/béton, des justifications complémentaires devront être apportées.
- Les essais de fluage en compression sur béton à base de ciment H-UKR montrent que les déformations totales sous charge d'un béton à base de ciment H-UKR sont bien plus élevées que celles d'un béton à base de ciment Portland (une déformation totale sous charge en mode endogène deux fois plus élevée et une déformation totale sous charge en mode dessiccation de 4 à 5 fois plus élevée). Ces valeurs de déformation en fluage du béton à base de ciment H-UKR sont importantes et doivent être prise en compte pour le dimensionnement des éléments de structure associés. De plus, pour la formulation de béton testé, il a été observé que la déformation de fluage, après un an d'essai, n'est pas stabilisée.

N'ont pas été étudiées 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 ;
- La compatibilité entre les adjuvants pour béton et le ciment H-UKR ;
- L'impact du traitement thermique des pièces en béton H-UKR sur les propriétés du matériau.
- La sensibilité à l'humidité et la durée de conservation du ciment H-UKR, pour un conditionnement en sac.
- 

**Validité : 5 ans**

**Validité jusqu'au : 30 mars 2025**

**Direction Sécurité, Structures et Feu  
Le Directeur**

**François JALLOT**

## DOSSIER TECHNIQUE ETABLI PAR LE DEMANDEUR

### 1. INTRODUCTION

La société Hoffmann Green Cement Technologies se spécialise dans la fabrication de ciments à très faible empreinte environnementale. Différents ciments ont été mis au point afin de répondre à de multiples applications comme des colles, des mortiers de montage et des enduits.

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

- H-UKR Prima : ciment pur
- H-UKR Technika : ciment pur + mélanges de filler calcaire.

Les ciments de la gamme H-UKR se distinguent des ciments Portland par leur composition à base de laitier suractivé. Ces ciments sont des prémix obtenus par mélange dans l'usine de Bournezeau située en Vendée. Les ciments H-UKR sont ensuite utilisés comme ciment dans la composition de bétons fabriqués à partir de centrale à béton dans des unités de :

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

Les ciments H-UKR sont donc des matériaux qui se substituent au ciment Portland pour la fabrication de béton. Les ciments H-UKR Prima et Technika se présentent sous la forme d'une poudre pouvant être stockée 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 ciment pur H-UKR et quelques formulations de 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.

### 2. FABRICATION DU CIMENT

#### 2.1. Matières premières

Les matières premières constituant les ciments H-UKR Prima et Technika 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 Technika un mélange d'additions calcaires qui répond à la norme NF EN 12620.

Pour chaque dénomination de la gamme de ciment H-UKR, le dosage des constituants pour la formulation des ciments H-UKR Prima et Technika est unique et a été communiquée au CSTB.

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

#### 2.2. Fabrication

Les ciments H-UKR sont fabriqués par mélange de plusieurs poudres constitutives dans un mélangeur d'une capacité de 1 tonne. Les tolérances des proportions sont indiquées dans le plan contrôle qualité sur chaque constituant (cf. annexe 1).

## 2.3. Contrôles

Le plan de contrôle sur le ciment est décrit dans la procédure interne (annexe 1 – Procédure plan de contrôle).

Les contrôles sont réalisés sur :

- Les matières fabriquées via :
  - Une analyse de composition des produits finis à l'aide de la fluorescence X après fusion en perle de la poudre fabriquée ;
  - Une 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 matières premières selon leur nature :
  - 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 spécifications des contrôles sont données dans la procédure interne (annexe 1 – Procédure plan de contrôle).

## 2.4. Conditionnement et livraison

Le conditionnement à sec 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.

## 3. FABRICATION DU BETON

### 3.1. 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.

### 3.2. Compositions

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

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

Les dosages en H-UKR pour la fabrication de béton peuvent varier selon les performances mécaniques recherchées et la consistance béton recherchée entre 250 kg/m<sup>3</sup> et 450 kg/m<sup>3</sup>.

La société HGCT 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.

Pour des rapports  $E_{ff}/C$  au-delà de 0,56, la quantité d'eau ajoutée est considérée comme trop importante : cette dernière vient modifier et perturber les équilibres chimiques ainsi que les cinétiques de prises. Il n'est donc pas préconisé de travailler au-delà du seuil de 0,55 (la plage préconisée est  $E_{ff}/C = 0,4$  à 0,5).

### 4. APPLICATIONS ENVISAGEES

Les applications envisagées des bétons à base de ciment H-UKR peuvent être les suivantes :

- Plancher
- Voile
- Poteau
- Poutre
- Dallage
- Radier
- Fondation superficielle.

## 5. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Note générale :

Les résultats expérimentaux ci-dessous sont issus de plusieurs campagnes d'essais sur le ciment H-UKR, des mortiers normalisés à base de ciment H-UKR ou sur ciment Portland (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 Prima.

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.

### 5.1. Caractérisation du ciment H-UKR

Les essais de caractérisation du ciment H-UKR Prima ont été réalisés au LEM.VP [1] et au LERM.SETEC [16] sur un échantillon représentatif de la production courante.

Les principales caractéristiques sont présentées dans le **Tableau 1** ci-dessous.

**Tableau 1 : Tableau de synthèse de la caractérisation du ciment H-UKR**

Caractéristiques	Référence norme essai	Valeur	Exigences normes harmonisées
Teneur en sulfate (SO <sub>3</sub> )	NF EN 196-2	0,03 % en masse	hEN 197-1 : ≤ 4,0% pour les CEM III hEN 15743 : ≥5% et ≤ 12,0%
Teneur en chlorure	NF EN 196-2	0,01 % en masse	hEN 197-1 : ≤ 0,10% hEN 15743 : ≤ 0,10%
Perte au feu	NF EN 196-2	5,63 % en masse à 500°C 7,46 % en masse à 950°C	hEN 197-1 : ≤ 5,0% hEN 15743 : ≤ 5,0%
Résidu insoluble	NF EN 196-2	0,07% en masse	hEN 197-1 : ≤ 5,0% hEN 15743 : ≤ 5,0%
Résistance en compression	NF EN 196-1	26,1 MPa à 2 jours 39,4 MPa à 7 jours 52,5 MPa à 28 jours	hEN 197-1 ou hEN 15743 selon classe de résistance visée
Consistance normalisée	NF EN 196-3	19,5 %	néant
Temps de début de prise	NF EN 196-3	25 min	hEN 197-1 : ≥ 45 min hEN 15743 : ≥ 45 min
Stabilité	NF EN 196-3	1 mm	hEN 197-1 : ≤ 10 mm hEN 15743 : ≤ 10 mm
Chaleur d'hydratation à 41 heures	NF EN 196-3	170 J/g	hEN 197-1 : ≤ 270 joules/g hEN 15743 : ≤ 220 joules/g
Densité apparente	NF EN 196-6	2.67 g/cm <sup>3</sup>	Néant
Finesse	NF EN 196-6	4650 cm <sup>2</sup> /g	Néant

Notes :

- Concernant la mesure de la perte en eau : 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 cette problématique 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.

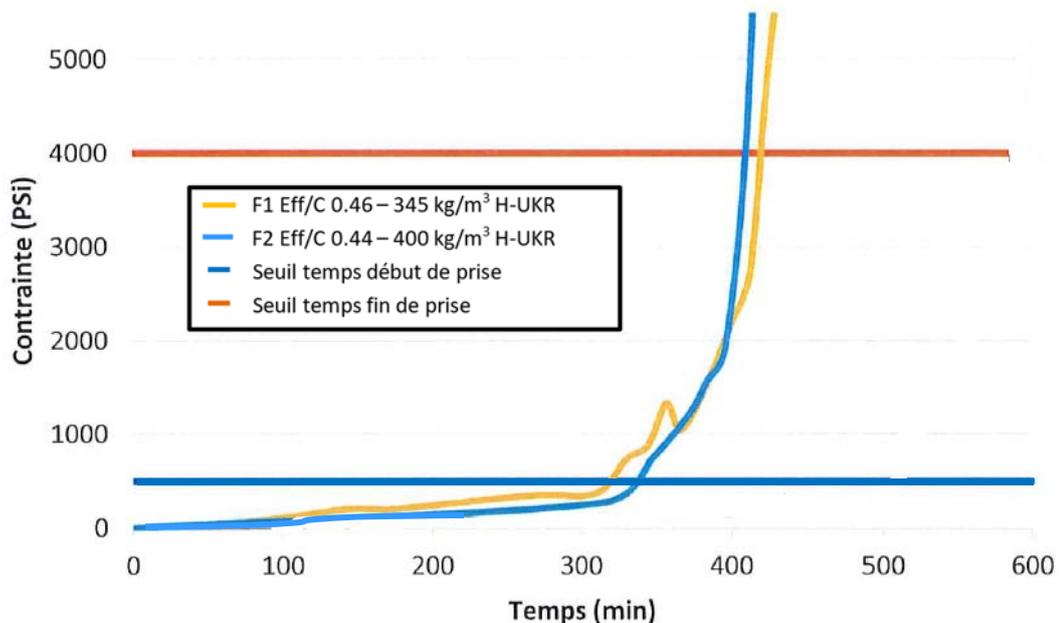
Ces essais ont été réalisés selon la norme ASTM C 403/C 403 M (janvier 2016) : « Méthode d'essais pour la détermination du temps de prise sur béton par résistance à la pénétration » sur deux formulations différentes :

- Formule F1 avec un dosage en ciment H-UKR de 345 kg/m<sup>3</sup> et un rapport E<sub>ff</sub>/C de 0,46 ;
- Formule F2 avec un dosage en ciment H-UKR de 400 kg/m<sup>3</sup> et un rapport E<sub>ff</sub>/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 à base de liant H-UKR Prima selon la norme ASTM C 403/C 403 M**



## 5.2. Variations dimensionnelles

Les essais de variations dimensionnelles et pondérales ont été réalisés en s'inspirant de la norme NF P 15-433, à l'université de Rennes 1 [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 des mortiers type CEN à la différence près que pour les mortiers à base de ciment H-UKR Prima un ajustement en eau a été réalisé de façon à prendre en compte l'eau interne déjà apportée par les activateurs carbo-silicate.

Ainsi, les propriétés du mortier à base de ciment H-UKR (dosage à E/C = 0,48) sont comparées à celles d'un ciment Portland (dosage E/C = 0,50 – annoté « Référence »). Le ciment Portland de référence est un CEM I 52.5 N CE PM-ES-CP2 NF à 97% de clinker.

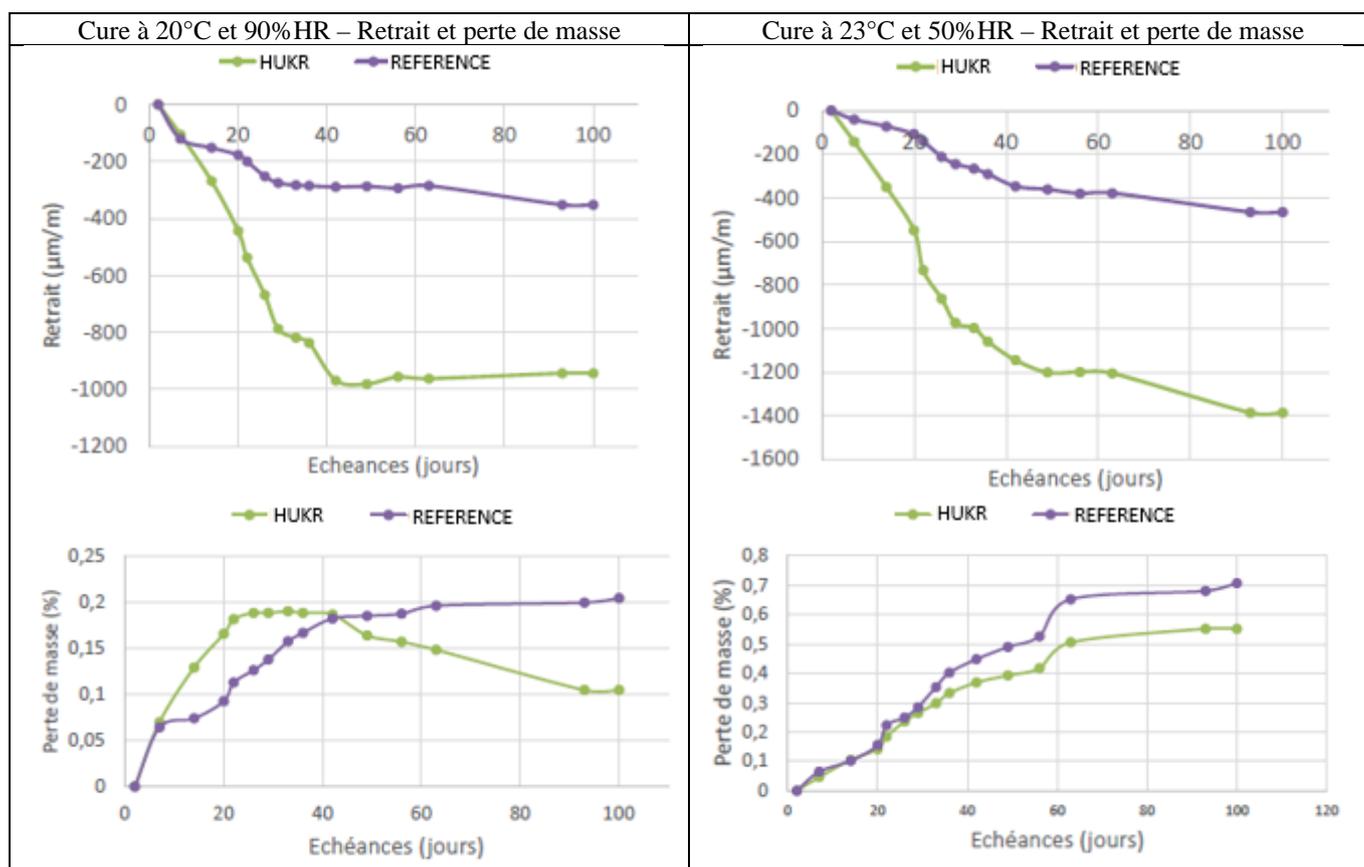
### Essais de retrait de séchage

Les essais ont été réalisés avec deux conditions de cure :

- Condition 1 : 20°C et 90%HR.
- Condition 2 : 23°C et 50%HR.

La synthèse des résultats est présentée sur la [Figure 2](#) page suivante.

**Figure 2 : Retrait de séchage et évolution de la perte de masse**



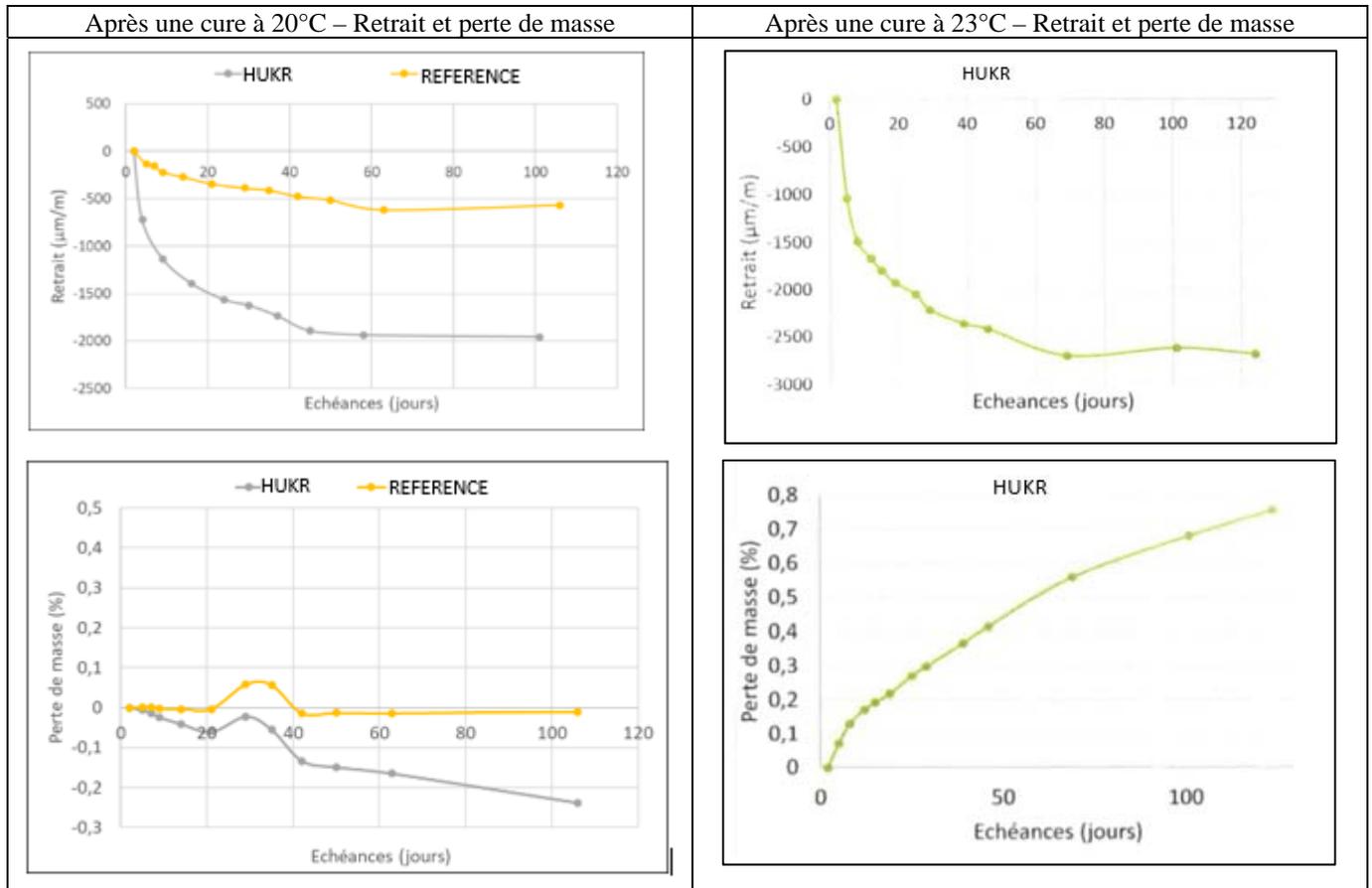
### Essais de retrait endogène

Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes de mortier recouverte de 3 couches de film aluminium pour supprimer les échanges d'humidité avec l'extérieur. Les essais ont été réalisés avec deux conditions de cure :

- Condition 1 : cure à 20°C,
- Condition 2 : cure à 23°C.

La synthèse des résultats est présentée dans la [Figure 3](#), page suivante.

Figure 3 : Retrait endogène



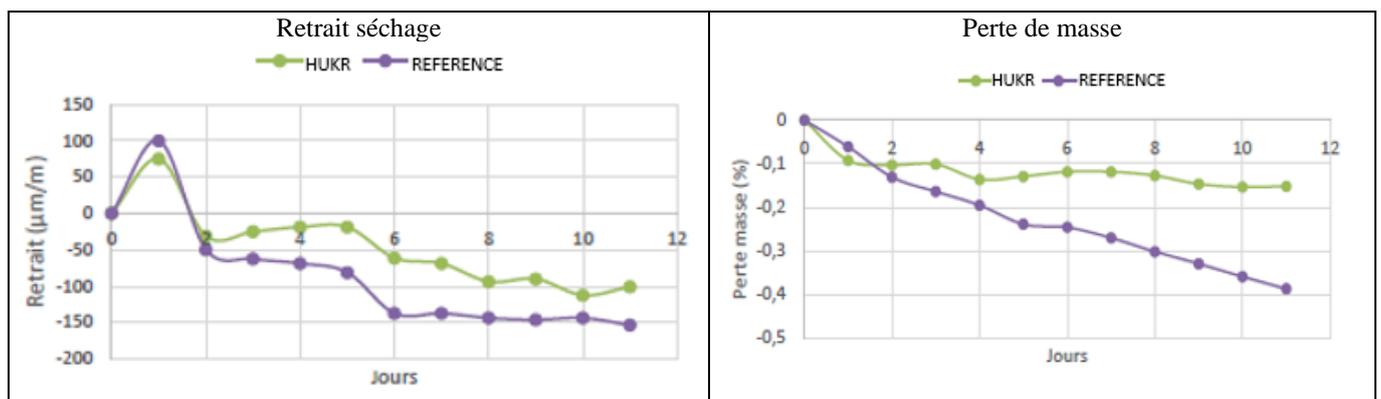
**Essais de retrait sur mortier durci**

Les essais ont été réalisés après maturation pendant 180 jours des éprouvettes de mortier en sac étanche à 20°C et 90%HR.

Après maturation, les éprouvettes de retrait ont été conservées à 20°C avec du gel de silice.

La synthèse des résultats est présentée sur la Figure 4.

Figure 4 : Retrait sur mortier durci et évolution de la perte de masse (âge des éprouvettes : 180 j)



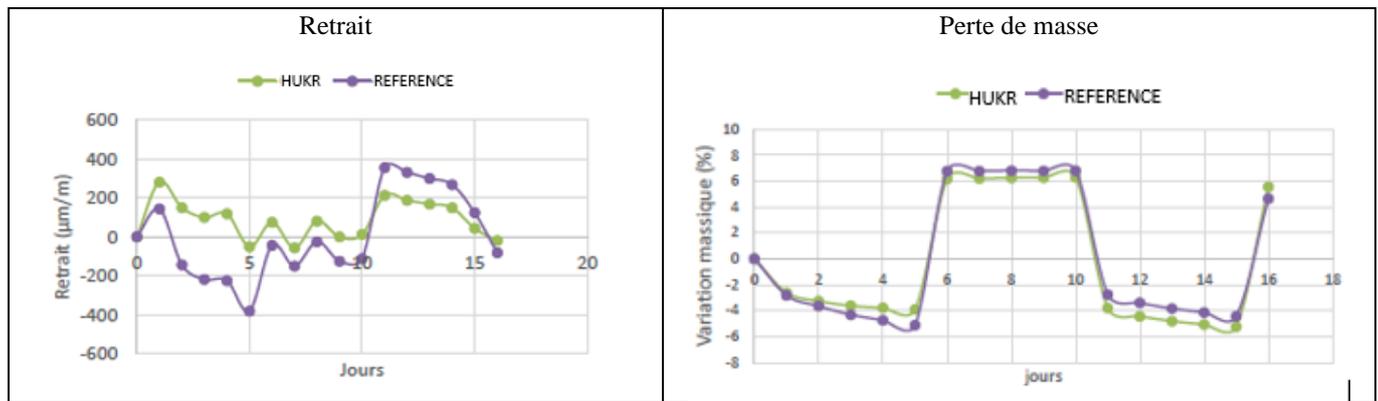
**Essais de retrait par cycles d'immersion/séchage à 60°C**

Les essais ont été réalisés après maturation pendant 180 jours des éprouvettes de mortier en sac étanche à 23°C et 50%HR.

Après maturation, les éprouvettes ont subi des cycles de séchage à 60°C pendant 5 jours, puis d'immersion totale en eau à 20°C pendant 5 jours.

La synthèse des résultats est présentée dans la **Figure 5**.

**Figure 5 : Retrait par cycle séchage/immersion (âge des éprouvettes : 180 j)**



La synthèse de l'ensemble des résultats de retrait est donné en **tableau 1**.

**Tableau 1 : Tableau de synthèse des résultats des variations dimensionnelles**

Type de retrait sur prismes 40x40x160	Ciment H-UKR Prima	Ciment Portland
Retrait de séchage (µm/m)	Cure 20°C/90%HR : 935 µm/m après 100 j Cure 23°C/50%HR : 1390 µm/m après 100 j	Cure 20°C/90%HR : 335 µm/m après 100 j Cure 23°C/50%HR : 410 µm/m après 100 j
Retrait endogène (µm/m)	Cure 20°C/90%HR : 1960 µm/m après 101 j Cure 23°C/50%HR : 2440 µm/m après 106 j	Cure 20°C/90%HR : 565 µm/m après 106 j Cure 23°C/50%HR : 1355 µm/m après 101 j
Retrait sur mortier durci (µm/m)	100 µm/m après 11 j (après maturation 180 j à 20°C et 90%HR)	150 µm/m après 11 j (après maturation 180 j à 20°C et 90%HR)

**5.3. Absorption capillaire**

Les essais d'absorption capillaire ont été réalisés par l'Université de Rennes 1 [3].

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

Ainsi, les propriétés du mortier à base de 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.

Les mesures ont été effectuées sur prisme 40x40x160 cm, 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 2**, page suivante.

**Tableau 2 : Sorptivité (sur la plage de 1h à 8h de remontée capillaire)**

Type de ciment	Sorptivité S (kg.m <sup>-2</sup> /s <sup>1/2</sup> )
Ciment H-UKR Prima (cure 20°C et 90%HR)	0,094
Ciment H-UKR Prima (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 au-dessus 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.

#### 5.4. Résistance à la compression

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

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

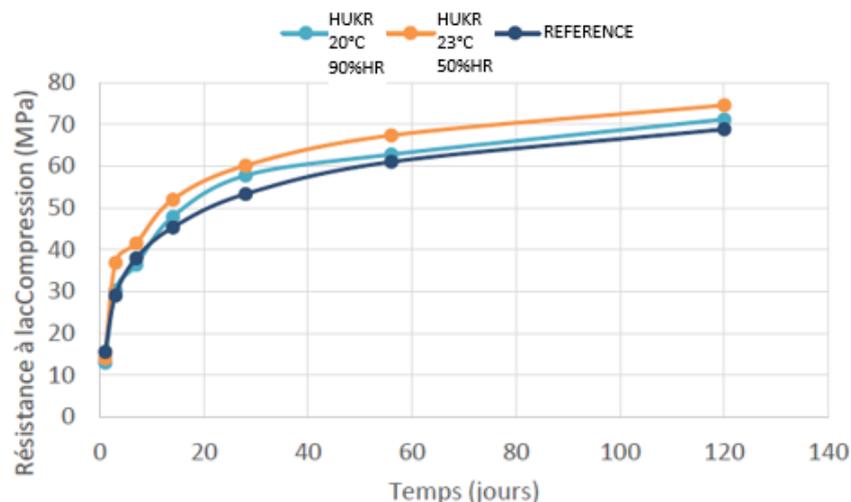
Ainsi, les propriétés du mortier à base de ciment H-UKR (dosage à E/C = 0,48) sont comparées à celles d'un ciment Portland (dosage E/C = 0,50 – annoté « Référence »). Le ciment Portland de référence est un CEM I 52.5 N CE PM-ES-CP2 NF à 97% de clinker.

Les essais ont été réalisés avec deux conditions de cure :

- Condition 1 : 20°C et 90%HR.
- Condition 2 : 23°C et 50%HR.

Les résultats sont présentés dans la Figure 6.

**Figure 6 : 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.

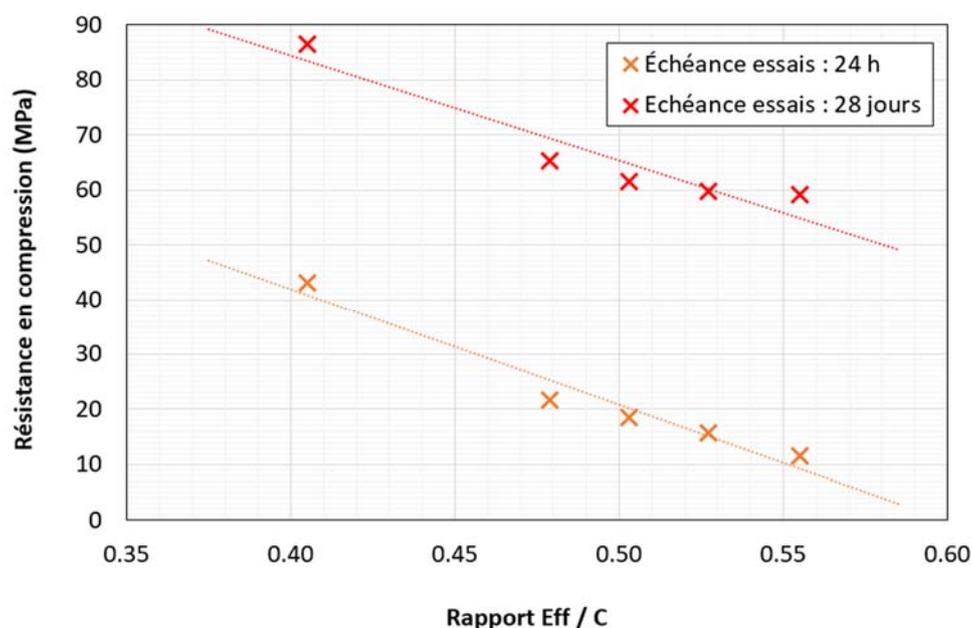
Pour ces essais, les mesures ont été effectuées sur des mortiers confectionnés avec des rapport « Eau efficace / Ciment » ( $E_{ff}/C$ ) entre 0,41 et 0,56.

Cette plage de rapport  $E_{ff}/C$  correspond à la fourchette d'utilisation préconisée pour le ciment H-UKR Prima.

Pour des rapports  $E_{ff}/C$  au-delà de 0,56, la quantité d'eau ajoutée est considérée comme trop importante : cette dernière vient modifier et perturber les équilibres chimiques ainsi que les cinétiques de prises. Il n'est donc pas préconisé de travailler au-delà du seuil de 0,56.

Les résultats sont présentés dans la Figure 7.

**Figure 7 : incidence du rapport  $E_{ff}/C$  sur les performances mécaniques sur mortier normalisé**



### 5.5. Résistance à la flexion

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

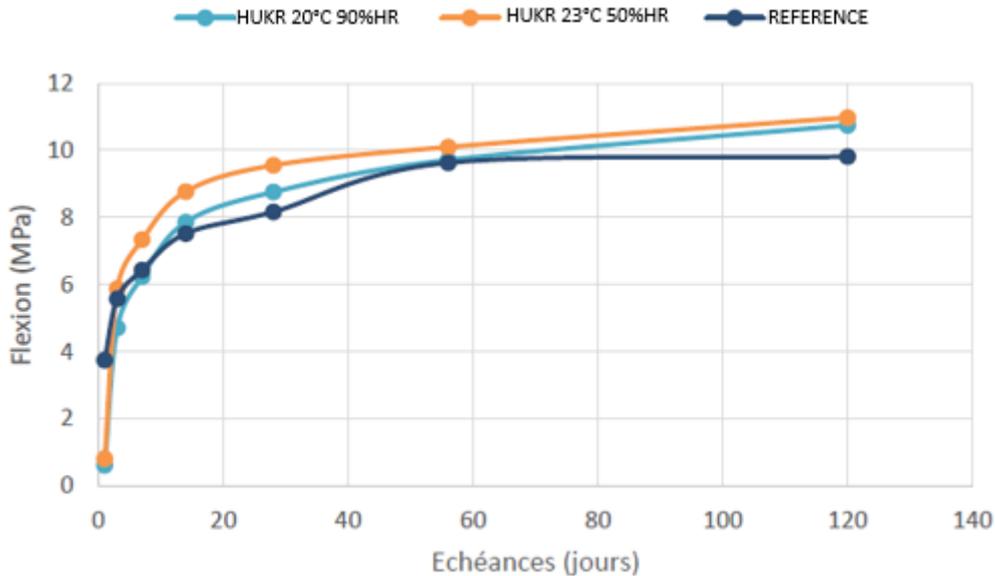
Les propriétés du mortier à base de ciment H-UKR (dosage à  $E/C = 0,48$ ) sont comparées à celles d'un ciment Portland (dosage  $E/C = 0,50$  – annoté « Référence »). Le ciment Portland de référence est un CEM I 52.5 N CE PM-ES-CP2 NF à 97% de clinker.

Les essais ont été réalisés avec deux conditions de cure :

- Condition 1 : 20°C et 90%HR.
- Condition 2 : 23°C et 50%HR.

Les résultats sont présentés dans la Figure 8, page suivante.

Figure 8 : résistances à la flexion sur mortier normalisé



### 5.6. Stabilité des performances mécaniques

Des essais de stabilité de résistance dans le temps ont été conduits en interne [14], sur des mortiers type CEN à base de ciment H-UKR Prima avec un rapport E/C ajusté à 0,47

Les résistances en compression ont été mesurées sur des éprouvettes prismatique de type 40x40x60 ou demi-éprouvettes prismatique de 40x40x160.

Les résultats obtenus sont présentés dans la [Tableau 3](#).

Tableau 3 : résistances à la compression à long terme sur mortier normalisé

Résistance en compression sur demi-prismes 40x40x160 ou prismes 40x40x60	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'on ne constate en aucun cas 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 Prima a également été réalisée [15] 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 Prima 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.

Les résultats obtenus sont présentés dans la [Tableau 4](#), page suivante.

**Tableau 4 : étude statistique sur les performances du liant H-UKR Prima produit entre Décembre 2018 et Juillet 2019**

Nombre de production			40	
Echéances	Unité	Moyenne	Ecart moyen (% vs. moyenne)	Ecart-type (% vs. moyenne)
Rc 24 h	MPa	29,6	2,3 (7.7%)	3.0 (10,0 %)
Rc 7 jours	MPa	55,0	2,6 (4.7 %)	3.0 (5,5 %)
Rc 28 jours	MPa	68,8	3,2 (4.6 %)	4,0 (5.8 %)

### 5.7. Durabilité - Porosité accessible à l'eau

Les essais de porosité accessible à l'eau ont été réalisés par l'Université de Rennes 1 [5].

Les propriétés du mortier à base de 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.

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 5](#).

**Tableau 5 : Porosité accessible à l'eau**

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

### 5.8. Durabilité - résistance au gel-dégel

Des essais de gel-dégel ont été réalisés par l'Université de Rennes 1 [6].

Deux protocoles ont été menés :

- Essai de gel sur béton durci - Gel dans l'eau - Dégel dans l'eau selon la norme NF P18-424
- Essai de gel sur béton durci - Gel dans l'air - Dégel dans l'eau selon la norme NF P18-425

Les éprouvettes sont des prismes de mortier normalisé 40x40x160 mm.

Les propriétés du mortier à base de ciment H-UKR (dosage à E/C = 0,48) sont comparées à celles d'un ciment Portland (dosage E/C = 0,50 – annoté « Référence »). Le ciment Portland de référence est un CEM I 52.5 N CE PM-ES-CP2 NF à 97% de clinker.

Les cycles consistent en 4 heures de gel et 2 heures de dégel.

Durant les cyclages, la variation de masse ainsi que la vitesse ultrasonore (selon la norme NF EN 12504-2) sont suivies.

Lors des essais de gel dans l'air et dégel dans l'eau, deux lots d'éprouvettes avec ciment H-UKR ont été caractérisés.

Les résultats sont présentés dans les [Figures 9 et 10](#), page suivante.

Figure 9 : Résultats des essais de résistance au gel-dégel (Gel dans l'eau - Dégel dans l'eau) selon la norme NF P18-424

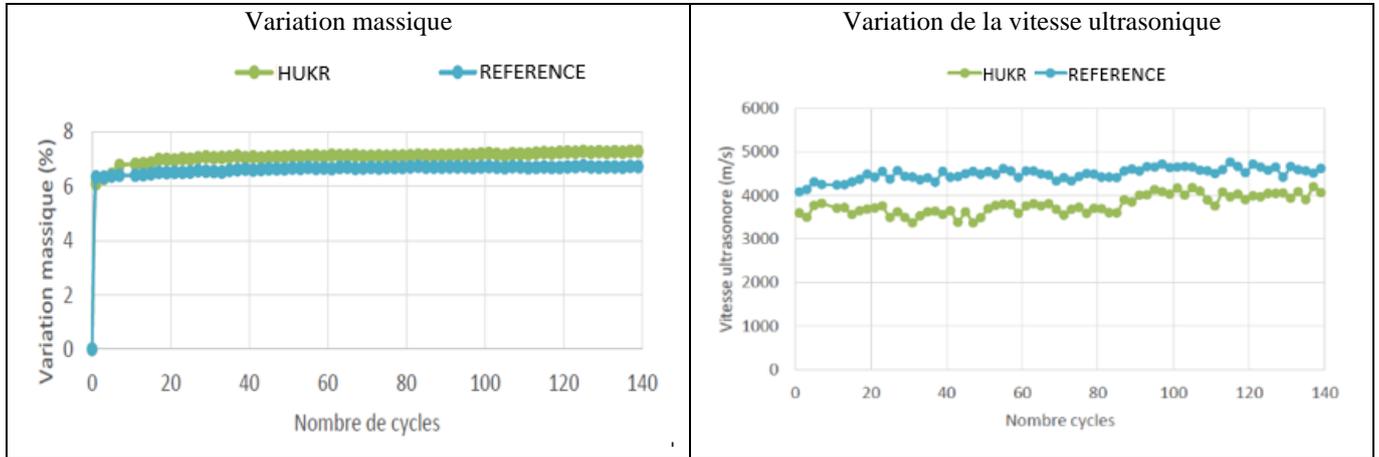
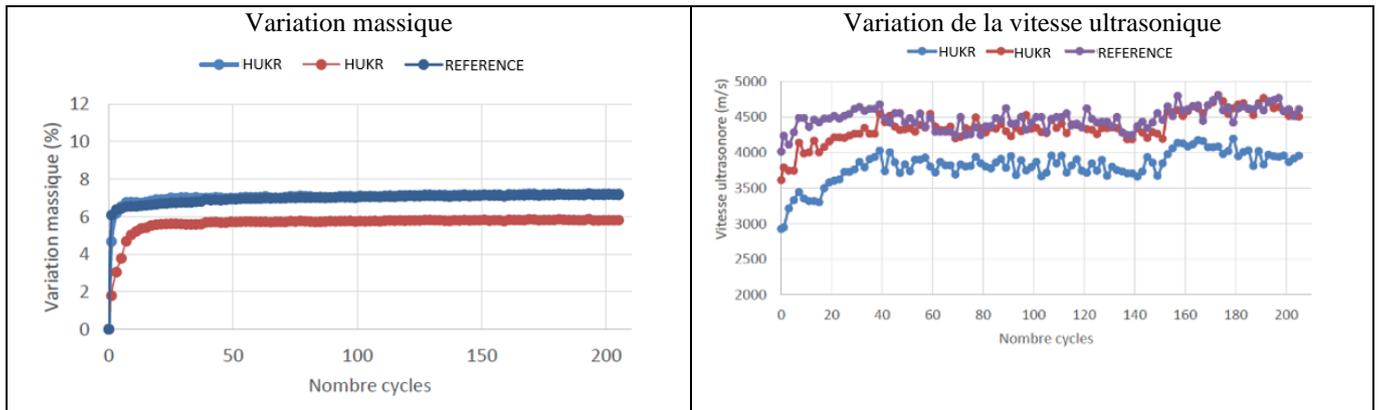


Figure 10 : Résultats des essais de résistance au gel-dégel (Gel dans l'air - Dégel dans l'eau) selon la norme NF P18-425



### 5.9. Durabilité – essais de carbonatation

Des essais de résistance à la carbonatation ont été réalisés par l'Université de Rennes 1 [7] [8] [9] [10].

Les essais ont été réalisés selon un protocole s'inspirant de la norme NF EN 12 390-10, en enceinte climatique contrôlée. Les conditions climatiques étant une concentration en CO<sub>2</sub> de 20% (au lieu d'une concentration de 3% de CO<sub>2</sub>) et une humidité relative de 70%.

De plus, un indicateur coloré alternatif à la phénolphtaléine a été utilisé (le chou rouge, possédant un virage de sa couleur autour d'un pH 11, contre pH 9 pour la phénolphtaléine) pour apprécier le front de carbonatation.

Les éprouvettes sont des cylindres de mortier normalisé de diamètre 5 cm et de longueur 30 cm à base du ciment H-UKR.

Aux échéances 3, 7, 14, 28, 56, 90 et 120 jours, des mesures de profondeur de carbonatation, de vitesse ultrasonore (selon la norme NF EN 12504-2) et de pH de la matrice sont suivies.

Les résultats sont présentés dans les Figures 11 à 13.

Figure 11 : Résultats de la mesure de la profondeur de carbonatation (par mesure avec l'indicateur coloré choux rouge dont le virage pH = 11)

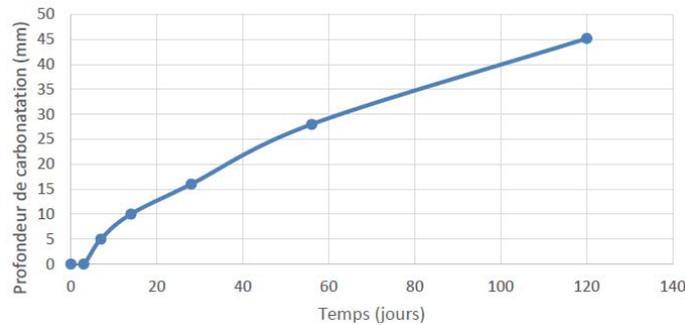


Figure 12 : Résultats de la mesure de pH lors de l'essai de carbonatation

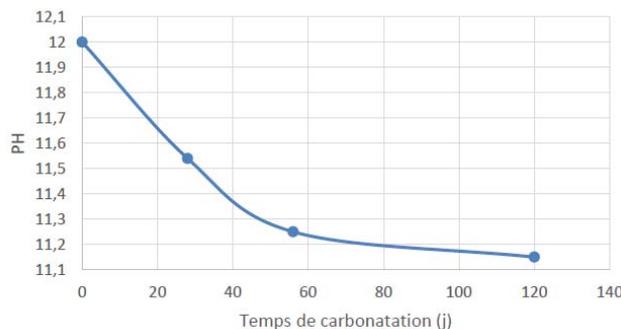
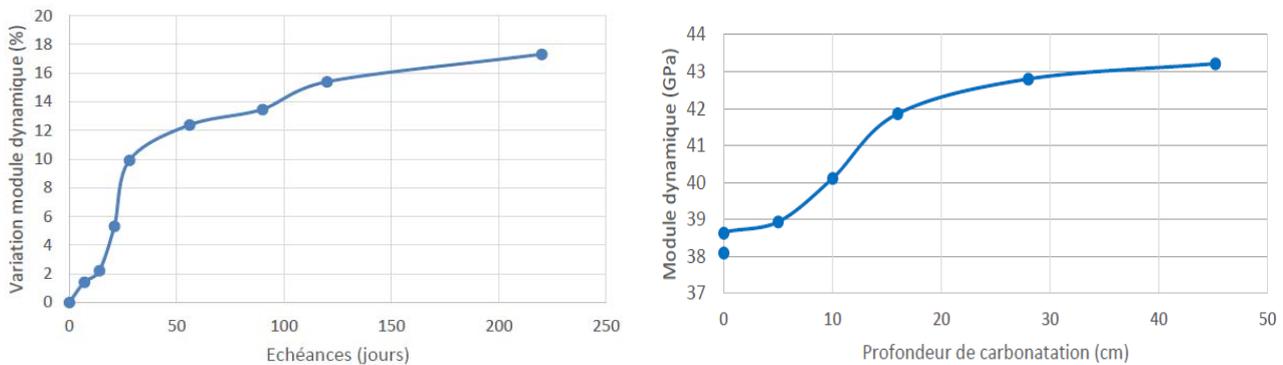


Figure 13 : Résultats de la mesure de vitesse ultrasonore lors de l'essai de carbonatation



## 5.10. Durabilité – attaque acide

Des essais d'attaques acides ont été réalisés par l'Université de Rennes 1 [11], selon une méthode interne au laboratoire. Deux dosages d'attaque acide sulfurique  $H_2SO_4$  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 Figures 14 et 15.

**Figure 14 : Résultats du suivi massique et vitesse ultra sonore en fonction du dosage en acide (acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)**

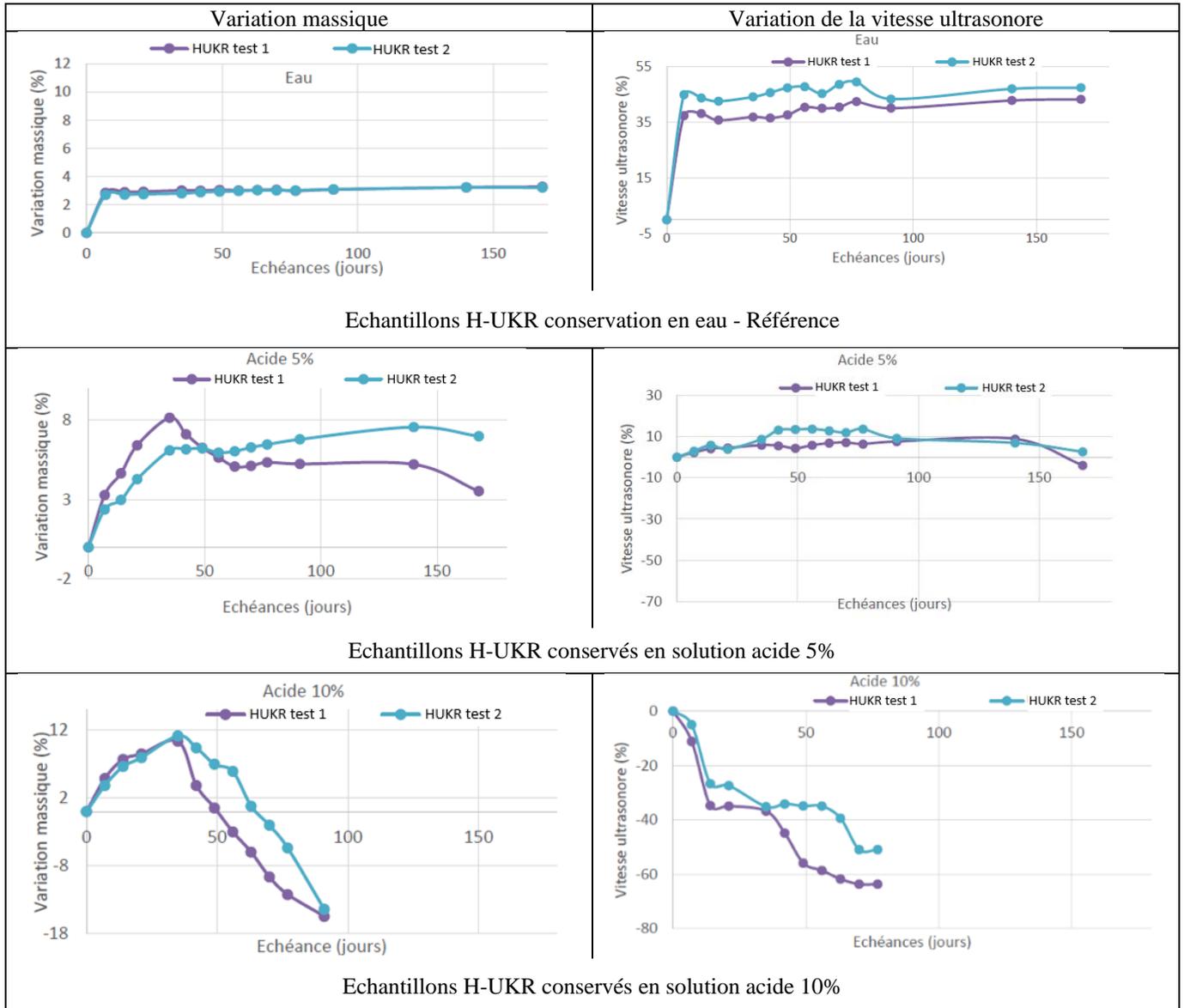
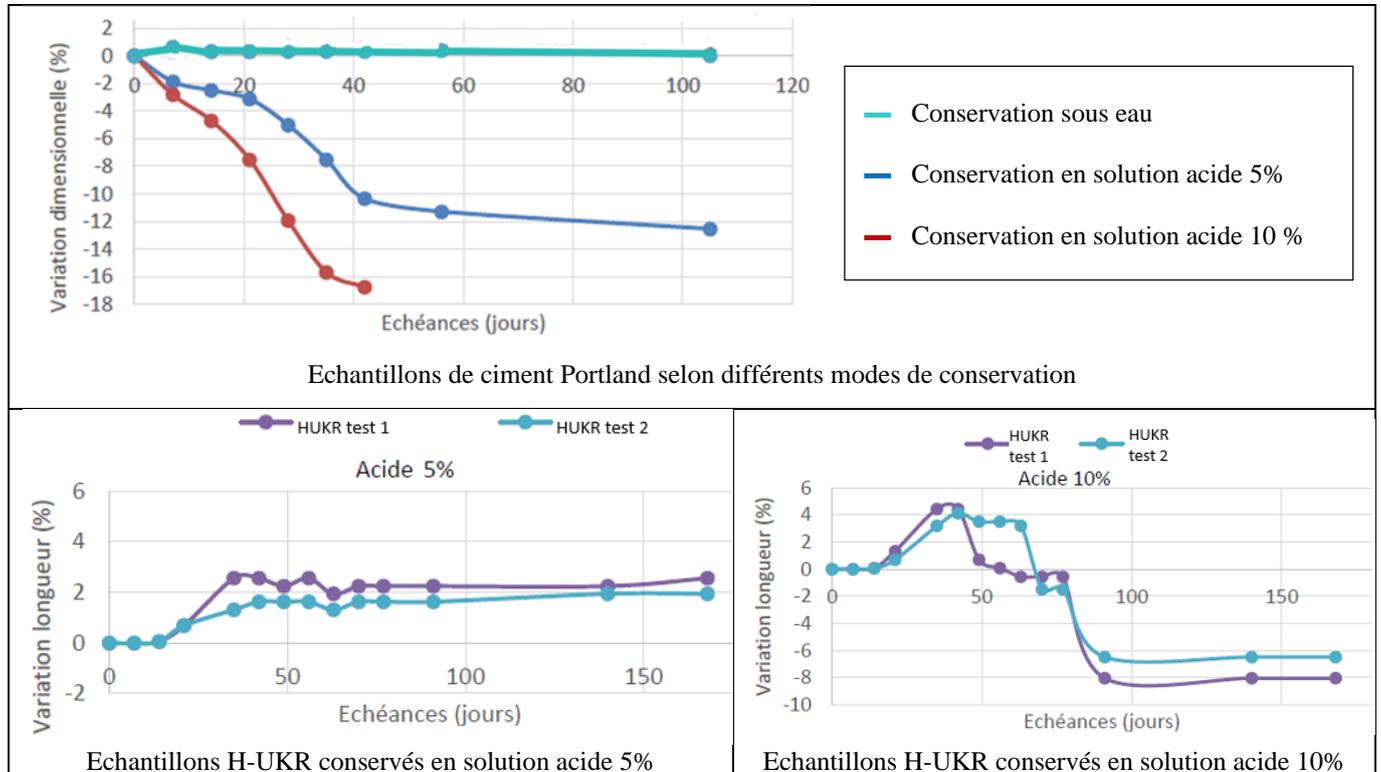


Figure 15 : Résultats du suivi de la variation de longueur lors de l'essai d'attaque acide (acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)



### 5.11. Durabilité – attaque sulfatique

Des essais d'attaque sulfatique ont été réalisés par l'Université de Rennes 1 [12], selon une méthode interne au laboratoire.

Deux dosages d'attaque sulfatique (sulfates d'aluminium Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) 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 les Figures 16 à 18, page suivante.

Figure 16 : Résultats du suivi de masse lors de l'essai d'attaque sulfatique (Sulfate d'aluminium  $Al_2(SO_4)_3$ )

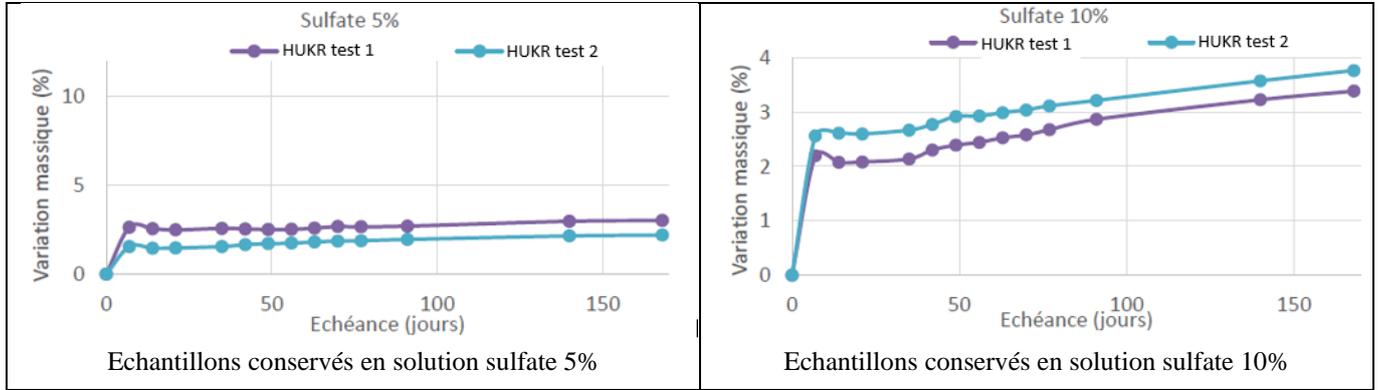


Figure 17 : Résultats du suivi de vitesse ultrasonore lors de l'essai d'attaque sulfatique (Sulfate d'aluminium  $Al_2(SO_4)_3$ )

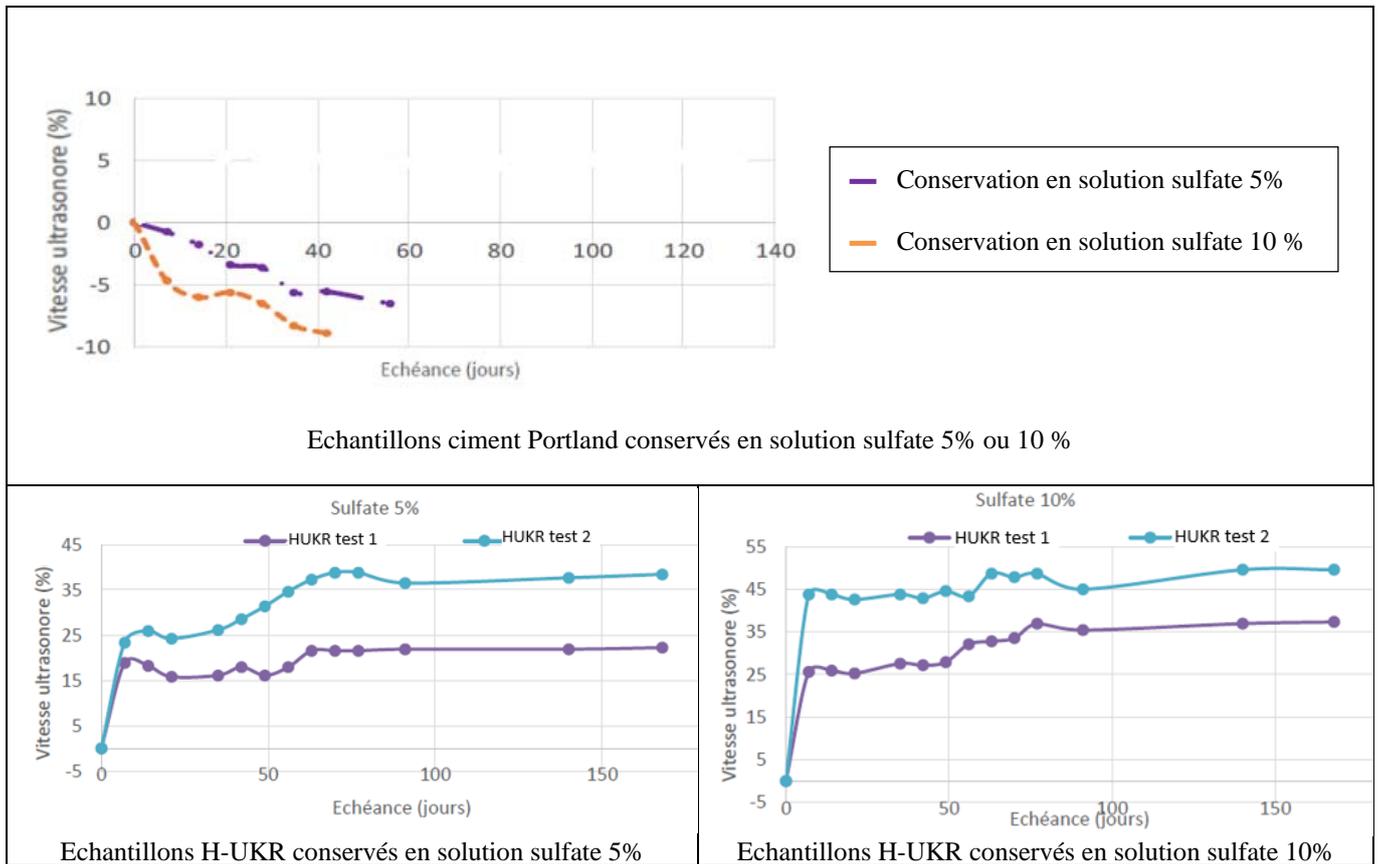
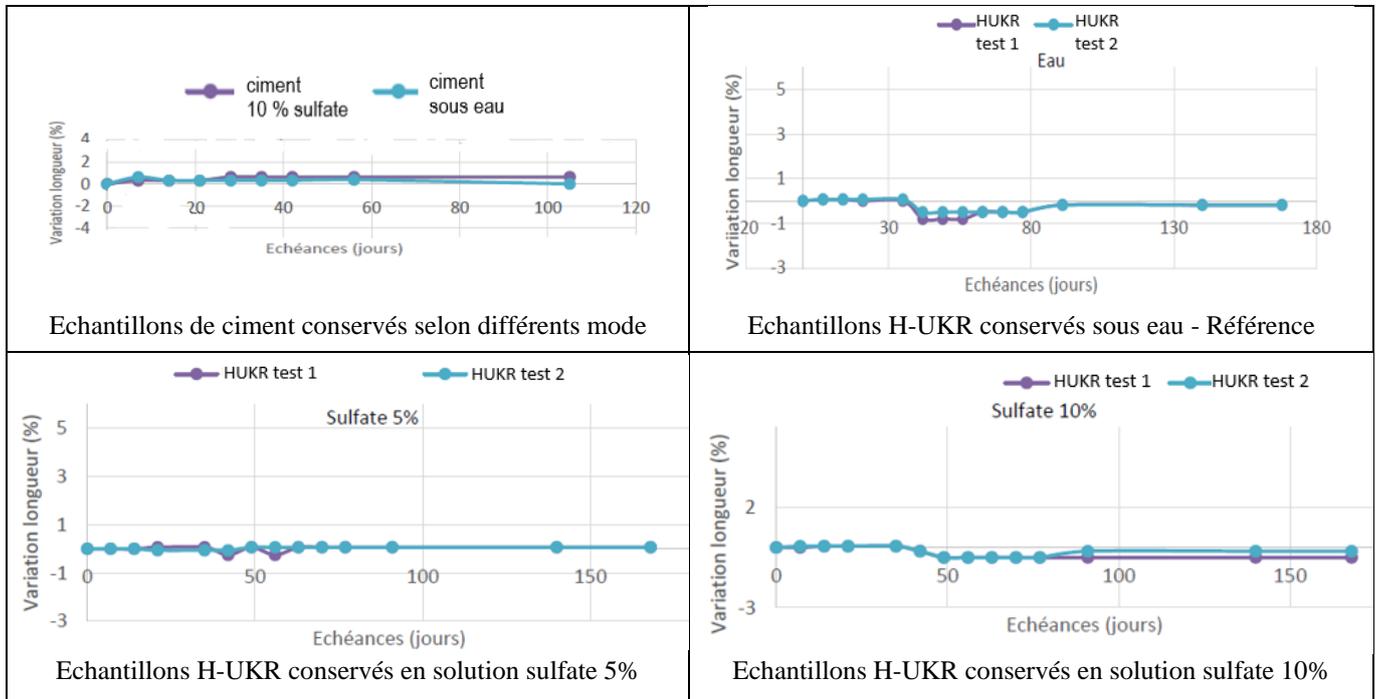


Figure 18 : Résultats du suivi de la variation de longueur lors de l'essai d'attaque sulfatique (Sulfate d'aluminium  $Al_2(SO_4)_3$ )



## 5.12. Adhérence armature / béton

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

L'ensemble des bétons ont été confectionnées sur un site de béton préfabriqué le même jour

- Deux formules à base de ciment H-UKR :
  - o formulation n°1 : dosage en ciment 320 kg/m<sup>3</sup>, rapport  $E_{eff}/C$  de 0,47 et ;
  - o formulation n°2 : dosage en ciment 400 kg/m<sup>3</sup>, rapport  $E_{eff}/C$  de 0,40 ;
- Une formule à base de ciment Portland : CEM I 52.5 R CE CP2 NF dosé à 300 kg/m<sup>3</sup> + 200 kg/m<sup>3</sup> de filler, rapport  $E_{eff}/C$  de 0,57 (hors filler).

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 7 ci-après synthétise les résultats.

**Tableau 7 : Tableau de synthèse des essais d'adhérence armature / béton**

Type de ciment (dosage)	Résistance le jour d'essai (MPa) (3 essais)	Contrainte d'adhérence acier / béton $\tau$	Résistance le jour d'essai (MPa) (3 essais)	Contrainte d'adhérence acier / béton $\tau$ (kN)
	Essais à 28 jours		Essais à 87 jours	
Ciment H-UKR (dosage : 320 kg/m <sup>3</sup> )	<u>Compression</u> $f_c = 31,5$ MPa $f_{c,k} = 27,9$ MPa <u>Fendage</u> $f_{tf} = 1,90$ MPa $f_{tf,k} = 1,5$ MPa	12,8 MPa (5 essais – valeur caractéristique : 11,2 MPa)	<u>Compression</u> $f_c = 36,5$ MPa $f_{c,k} = 33,1$ MPa	15,1 MPa (1 seul essai)
Ciment H-UKR (dosage : 400 kg/m <sup>3</sup> )	$f_c = 48,4$ MPa $f_{c,k} = 46,8$ MPa <u>Fendage</u> $f_{tf} = 2,20$ MPa $f_{tf,k} = 1,9$ MPa	19,1 MPa (5 essais – valeur caractéristique : 18,0 MPa)	<u>Compression</u> $f_c = 55,6$ MPa $f_{c,k} = 49,8$ MPa	25,1 MPa (1 seul essai)
Ciment Portland (dosage : 300 kg/m <sup>3</sup> + 200 kg/m <sup>3</sup> )	$f_c = 60,0$ MPa $f_{c,k} = 57,9$ MPa <u>Fendage</u> $f_{tf} = 2,80$ MPa $f_{tf,k} = 1,9$ MPa	27,0 MPa (5 essais – valeur caractéristique : 24,1 MPa)	<u>Compression</u> $f_c = 66,6$ MPa $f_{c,k} = 63,9$ MPa	25,8 MPa (1 seul essai)

### 5.13. Fluage en compression

Des essais de fluage en compression sur béton à base de ciment H-UKR ont été effectués par le CSTB [14], selon les recommandations RILEM.

Une formulation (dosage en ciment : 400 kg/m<sup>3</sup>, rapport  $E_{eff}/C = 0,5$ ) de béton avec ciment H-UKR a été confectionnée sur un site de béton préfabriqué.

Le béton confectionné utilise des granulats de  $D_{max}$  10 mm, le G/S du squelette granulaire est de 0.52.

Les essais de fluage ont débuté à l'âge de 28 jours et ont été réalisés avec un niveau de chargement de 40% de la charge de rupture mesurée sur cylindres âgés de 28 jours, soit de 15.5 MPa.

Les caractéristiques du béton testé sont les suivantes (échéance : 28 jours, conservation en mode endogène) :

- Masse volumique : 2336 kg/m<sup>3</sup> (valeur moyenne, sur 3 cylindres de diamètre 11 cm)
- Résistance à la compression : 38,8 MPa (valeur moyenne, sur 3 cylindres de diamètre 11 cm)
- Module d'élasticité : 30,4 GPa (valeur moyenne, sur 3 cylindres de diamètre 11 cm)

Les figures 19 à 21 ci-après synthétisent les résultats.

Figure 19 : Fluage en compression - Variations dimensionnelles en mode retrait endogène et en mode retrait de dessiccation

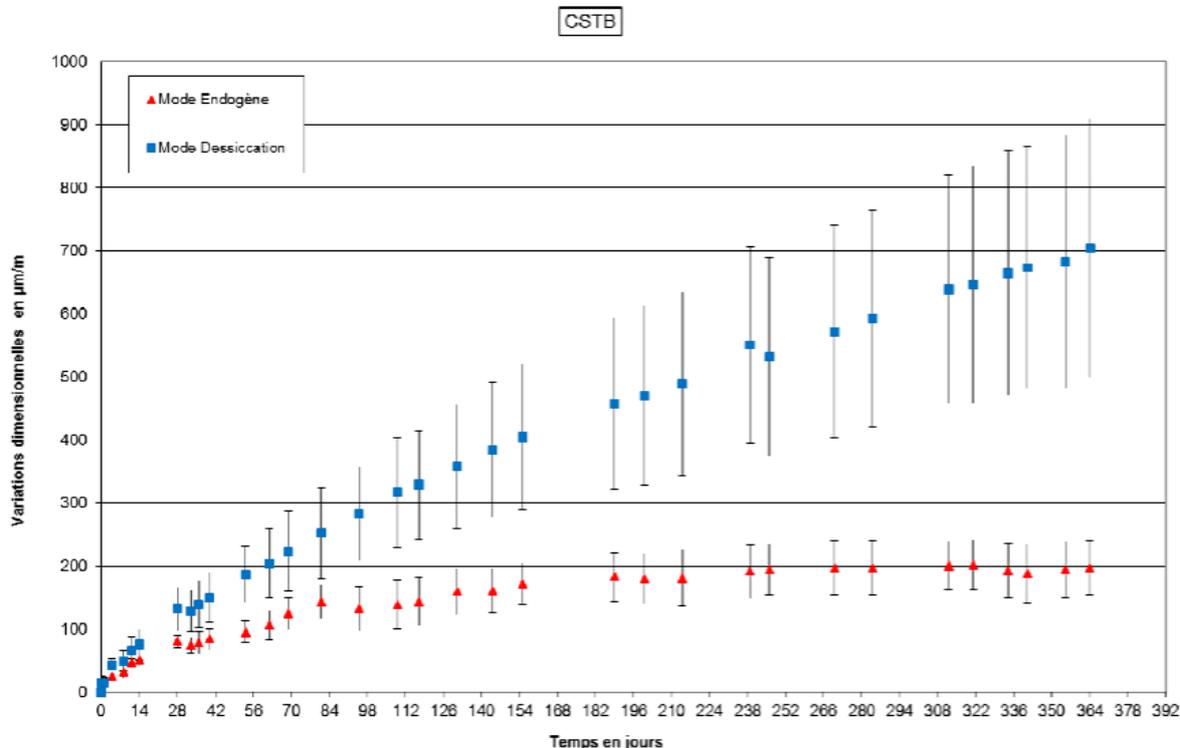


Figure 20 : Fluage en compression - Déformations totale sous chargement en mode retrait endogène et en mode retrait de dessiccation

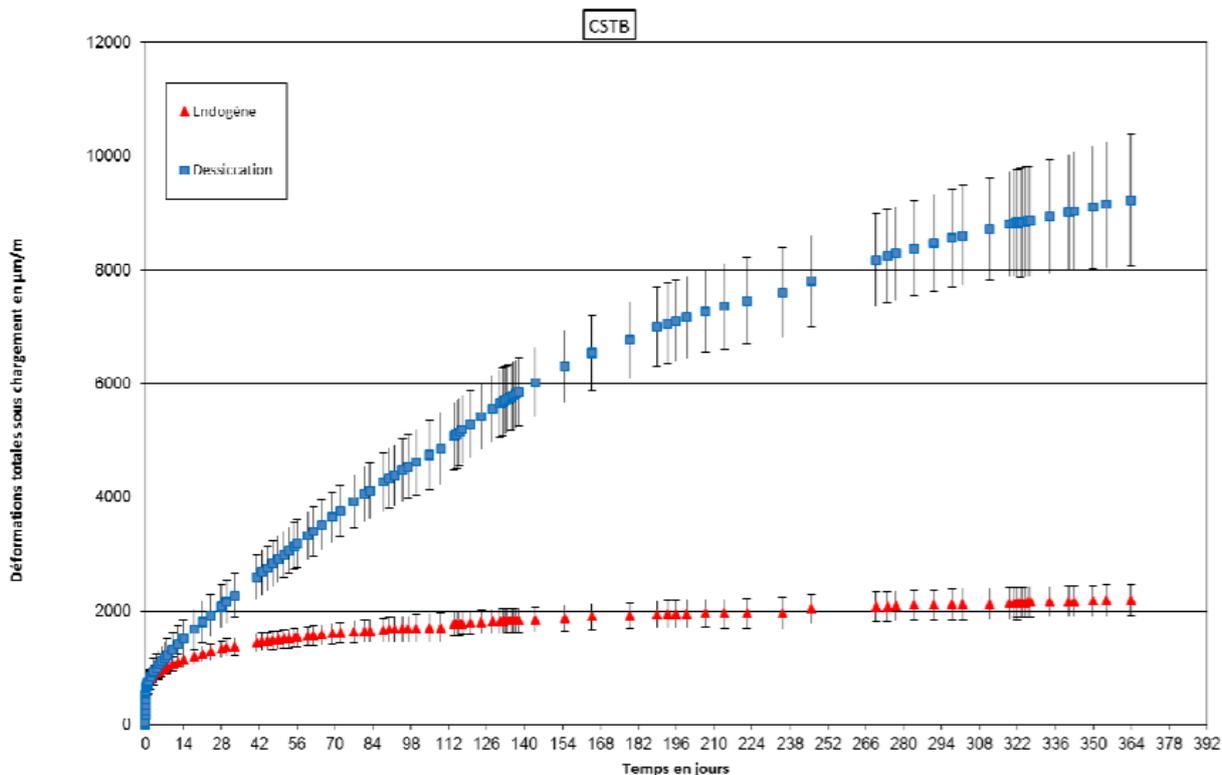
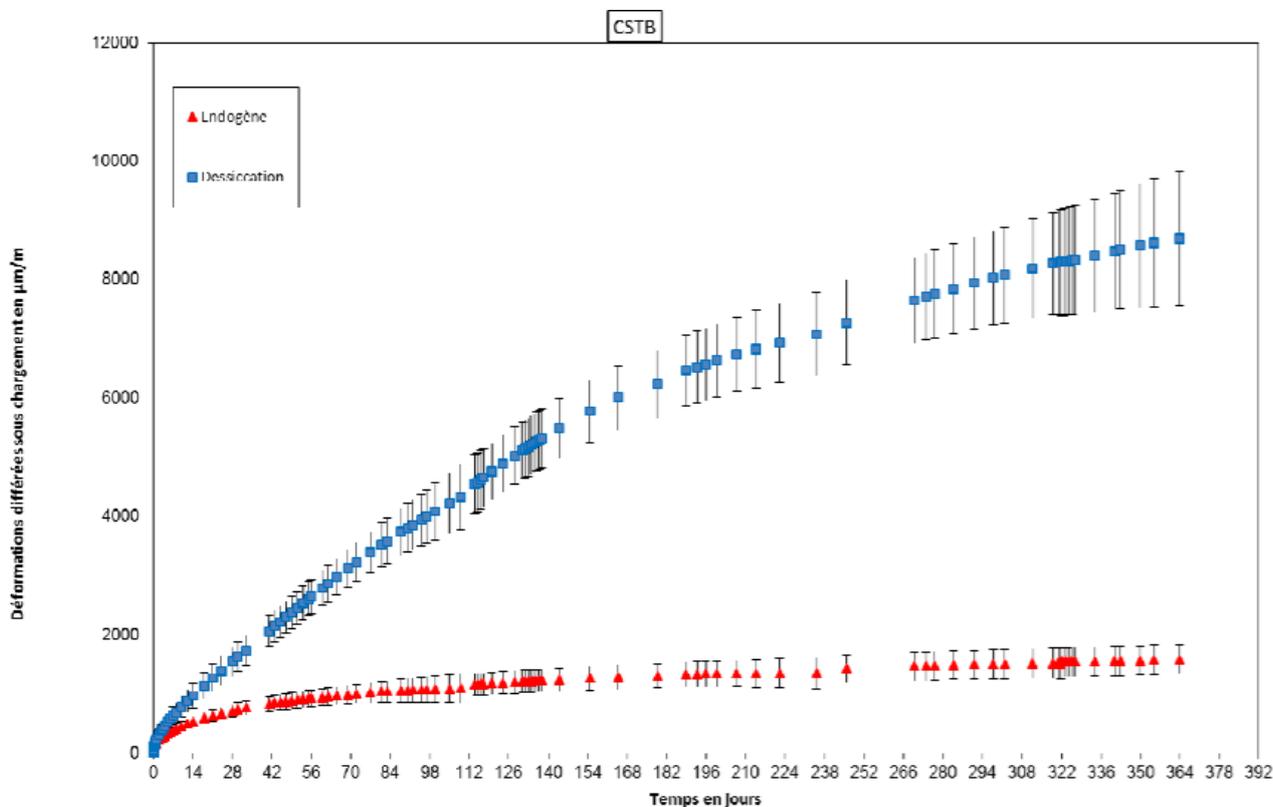


Figure 21 : Fluage en compression - Déformations différées sous chargement en mode retrait endogène et en mode retrait de dessiccation



### 5.14. Réaction au feu

Le ciment H-UKR Prima bénéficie d'un classement au feu A1 [17].

Le ciment H-UKR Technika bénéficie d'un classement au feu A1 [18].

### 5.15. Sécurité d'utilisation

Les ciments H-UKR font l'objet d'une fiche de sécurité type FDS.

De la même façon qu'un ciment Portland, il est nécessaire lorsque l'on manipule les ciments 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

## 6. CHANTIERS DE REFERENCE

Les chantiers de référence sont résumés ci-dessous :

- Fondations (6 m<sup>3</sup> de béton H-UKR Prima dosé à 450 kg/m<sup>3</sup>)
- Dalle de stockage 30 m<sup>2</sup>(6 m<sup>3</sup> de béton H-UKR Prima dosé à 450 kg/m<sup>3</sup>)
- Radier (30 m<sup>3</sup> de béton H-UKR Prima dosé à 400 kg/m<sup>3</sup>)
- Dalle 150 m<sup>2</sup> de béton H-UKR Prima dosé à 335 kg/m<sup>3</sup>
- Dalle 100 m<sup>2</sup> de béton H-UKR Technika dosé à 380 kg/m<sup>3</sup>
- Dalle 150 m<sup>2</sup> de béton H-UKR Technika dosé à 380 kg/m<sup>3</sup>
- Quai 280 m<sup>2</sup> (70 m<sup>3</sup> de béton H-UKR Technika dosé à 380 kg/m<sup>3</sup>)
- Fondations trackers solaires (32 m<sup>3</sup> de béton H-UKR Technika dosé à 380 kg/m<sup>3</sup>)
- 25 ml de voiles de béton H-UKR Technika dosé à 380 kg/m<sup>3</sup>

## 7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] LEM.VP, Rapport d'essais R18-2598 du 15 novembre 2018
- [2] Rapport d'essais « Retrait des matériaux alcali activés », Laboratoire GCGM, IUT Rennes, Département Génie Civil (15 octobre 2019)
- [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] Chapitre « Porosité » du Rapport d'essais « Durabilité de matériaux alcali activés », Laboratoire GCGM, IUT Rennes, Département Génie Civil (15 octobre 2019)
- [6] Rapport d'essais « Gel-Dégel », Laboratoire GCGM, IUT Rennes, Département Génie Civil (15 octobre 2019)
- [7] Rapport d'essais « Carbonatation », Laboratoire GCGM, IUT Rennes, Département Génie Civil (15 octobre 2019)
- [8] INSA Rennes, Rapport Carbonatation 20171211\_UKR-P2\_Argiwest\_v1 du 17 janvier 2018
- [9] INSA Rennes, Rapport Carbonatation UKR\_C\_56j\_v1 du 1er février 2018
- [10] INSA Rennes, Rapport Carbonatation 20180406\_UKR\_CB\_120j\_v1 du 14 mai 2018
- [11] Chapitre « Attaque acide » du Rapport d'essais « Durabilité de matériaux alcali activés », Laboratoire GCGM, IUT Rennes, Département Génie Civil (15 octobre 2019)
- [12] Chapitre « Attaque sulfate » du Rapport d'essais « Durabilité de matériaux alcali activés », Laboratoire GCGM, IUT Rennes, Département Génie Civil (15 octobre 2019)
- [13] CSTB, rapport adhérence MRF 19 26078888
- [14] CSTB, rapport fluage compression MRF 19 26078073
- [14] Suivi des performances long terme sur mortiers de type H-UKR, HGCT, janvier 2020
- [15] Etude statistique des performances des liants H-UKR produits, HGCT, novembre 2019
- [16] LERM SECTEC, Bulletin d'analyse sur liant H-UKR BPE 01 n°35357.3.001 du 6 février 2020
- [17] CSTB, Rapport de classement du produit H-UKR 01 n°ES541190664, février 2020.
- [18] CSTB, Rapport de classement du produit H-UKR BAP-N n°ES541190671, février 2020.

## ANNEXES

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

ANNEXE 1

## Plan de contrôle

Date de mise à jour	03/07/2018
---------------------	------------

Etapes	Détail	Risque	Type de contrôle	Moyen	Opérateur	Précision	N° mode opératoire	Fréquence	Action si NC
Reception Vrac	Accueil	Mauvais documents ou manque document ( BL ; bulletin analyse	Vérification des documents .Pesée arrivée et départ	visuel Pont bascule 50T	Magasinier	+/-20 Kg		A chaque livraison	Refus du camion
	Raccordement silos	Deversement dans un mauvais silo	cadenas avec détrompeurs correspondant à la bouche du silo	visuel et automate	Magasinier			A chaque livraison	Enregistrement sur registre et décision avec le directeur de site
Reception Sacs et Big bags sacs		Deversement dans un mauvais silo	cadenas avec détrompeurs correspondant à la bouche du silo	visuel et automate	Magasinier			A chaque livraison	Enregistrement sur registre et décision avec le directeur de site
Désulfogypse	Reception	mauvaise qualité	% Humidité	visuel	Magasinier				Refus de livraison
	Séchage	trop humide		Humidimetre	Opérateur	0,01%			Reséchage jusqu'à obtention des bonnes valeurs
Pesage des composants	Vrac standard	erreur de pesage	Vérification du peson	Etalonnage externe . Masse de 10 kg	Laboratoire agréé Laborantin	+/- 20g		Annuel Hebdomadaire	Si dépassement des tolérances lors des vérifications hebdomadaires , enregistrement et décision du directeur de site
	Vrac spécifique	erreur de pesage	Vérification du peson annuelle et hebdomadaire	Etalonnage externe . Masse de 2 kg	Laboratoire agréé Laborantin	+/- 3g		Annuel Hebdomadaire	Si dépassement des tolérances lors des vérifications hebdomadaires , enregistrement et décision du directeur de site
		La quantité pesée n'arrive pas en totalité au malaxeur	Analyse des alertes de l'automate par rapport aux seuils.	Analyse Bulletin de pesée ,et alertes	Opérateur	+/- 0,5%		A chaque mêlée	Mise au rebut de la mauvaise mêlée
Nettoyage entre deux produits finis différents		Nettoyage non réalisé et Pollution entre deux produits différents	planning des fabrications.Gestion des interdits par l'automate	Journal des alertes	Opérateur et automate			à chaque mêlée	Mise au rebut de la mauvaise mêlée

	durée malaxage	Montage	Durée de malaxage - Intensité du moteur (seuil d'alerte: ±5A par rapport au seuil)	Journal des alertes	Opérateur et automate	±5A	à chaque mêlée	Mise au rebut de la mauvaise mêlée
Malaxage	vidage du malaxeur	Vidage incomplet du malaxeur	Poids dans les silos (alertes dépassement seuils automate)	Journal des alertes	Opérateur et automate	+/- 2 kg	à chaque mêlée	
	transfert vers silo PF	mauvaise destination et mélange de deux produits finis	Blocages dans l'automate. Validation par l'opérateur	Journal des opérations	Opérateur		à chaque mêlée	Mise au rebut du contenu du silo
Changement Mac		surpoids du véhicule	Table de pesage avant la trémie de chargement	Vérification annuelle	Laborantin	+/- 20 kg	annuelle	
Changement Big bags		non-conformité des poids par rapport aux étiquettes	table de pesée	Etalonnage externe - Masse de 10 kg	Laboratoire agréé Laborantin	+/- 1 kg	Annuelle	
							Avant chaque utilisation	

### 1.0 Cadre général

Le système de contrôle qualité des produits de la gamme H-UKR fabriqués par l'usine HGCT située à Bourgneuf (85) est basé sur 2 axes :

- l'analyse des compositions des produits finis, qui constitue une méthode quasi-systématique et rapide d'évaluation de la conformité des lots produits ;
- et l'analyse des performances des produits finis, qui vient compléter de manière moins systématique les analyses de composition effectuées.

L'analyse des compositions est faite par comparaison de la composition du produit fini avec la composition théorique de la version de référence issue des essais R&D en laboratoire ; l'opération de production consistant essentiellement en un mélange de poudres de compositions connues il est donc aisé de calculer la composition théorique du produit fini.

L'analyse des performances est faite par comparaison des performances du produit fini avec la version de référence. La version de référence est issue des essais de R&D en laboratoire et est considérée comme « correcte » puisque la production vise justement à obtenir des produits présentant les performances de la version de référence.

Chaque production et chaque matière première réceptionnées font l'objet d'un échantillonnage qui conduit à l'obtention d'un échantillon moyen. L'échantillonnage est réalisé en plusieurs points comme le décrit le protocole de chapitre 5.2.0 Echantillonnage.

### 2.0 Analyse de la composition des produits fabriqués – liants minéraux

La méthode d'analyse principalement utilisée pour suivre la qualité et s'assurer de la conformité des liants minéraux fabriqués est la spectrométrie de fluorescence X.

La conformité du produit est fixée avec des fourchettes définies sur différents paramètres choisis de manière à garantir des performances physico-mécaniques des liants minéraux fabriqués, ces dernières étant elles-mêmes définies par des fourchettes suffisamment fines de manière à assurer aux utilisateurs des liants une régularité de leur produit au cours du temps.

L'avantage de la méthode d'analyse par composition est la rapidité de réponse par rapport au système d'analyse des performances. En effet quand la détermination des performances d'un produit fini nécessite au minimum 24 à 48 h, l'analyse par fluorescence X demande moins d'une heure. Ces 2 systèmes sont donc tout à fait complémentaires.

Plusieurs campagnes d'essais avec des fournisseurs reconnus ont démontré que la méthode la plus adaptée pour les matrices HGCT était la fluorescence X après fusion en perle de l'échantillon. Les

mélanges de poudres sont des matrices particulièrement complexes pour une méthode d'analyse comme la fluorescence X. En effet, cette dernière est basée sur une analyse optique d'une surface. Or, si à l'échelle de la dizaine de grammes le mélange est globalement homogène il n'en est rien à l'échelle du micromètre notamment du fait des différences de granulométrie. La fusion permet donc une homogénéisation du mélange à une échelle suffisamment petite pour être analysable en fluorescence X.

### 3.0 Analyse des performances des produits fabriqués – liants minéraux

En parallèle de la mesure de la composition des liants minéraux, des essais de performances sont également conduits en complément de manière moins systématique.

Toutefois, à ce stade du projet HGCT, ces dernières sont néanmoins encore réalisés sur chaque lot de liant fabriqué.

Les essais de performances sont réalisés sur des éprouvettes de mortiers normalisés dont la composition est similaire à la norme NF EN 196-1.

Les conditions de cure des éprouvettes confectionnées diffèrent toutefois de celles indiquées dans la norme : en effet ces dernières sont conservées dans le laboratoire en étui étanche de manière à maintenir une cure humide.

Les performances mesurées sont principalement les résistances à la compression à 24 h, 7 jours, et 28 jours. Celles-ci sont réalisées non pas sur des éprouvettes 4x4x16 mais sur éprouvettes 4x4x4.

Les lots de liants fabriqués sont jugés conformes une fois la résistance en compression à 24 h connue.

Des essais complémentaires peuvent être réalisés sur les lots de liants minéraux fabriqués de manière optionnelle :

- L'étalement à la table à choc ;
- La vitesse de durcissement ;
- La résistance à la flexion ;
- La masse volumique réelle ;
- La mesure du retrait de séchage.

Une éprouvette 4x4x4 à minima est conservée en archive pour chaque lot de liant fabriqué.

### 4.0 Analyse des matières premières entrant dans la composition des liants minéraux

Les produits finis sont réalisés par mélange de matières premières.

L'origine des matières premières entrant dans la composition des produits finis peut être de deux sortes :

L'analyse de la composition de la matière première est, elle aussi, réalisée afin d'en vérifier la compatibilité.

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, gypse et kaolinite) ;
- Granulométrie (tamis et/ou méthode optique) ;
- Surface spécifique Blaine ;
- Masse volumique réelle et apparente ;
- Teneur en eau ;
- pH et conductivité en solution ;
- Titrimétrie et complexométrie.

Dans la mesure du possible ces analyses sont réalisées en interne par le laboratoire R&D.

Le tableau ci-dessous donne un exemple des protocoles d'analyse utilisés en fonction des matières premières considérées :

Matières premières	Méthodes (paramètres)
Chaux	Titrimétrie alcalinité totale et Chaux LEDUC, Fluo X, MS550, diffraction X
Cendres	Chaux LEDUC, Fluo X, conductivité
Laitier	Fluo X, taux d'amorphe, surface Blaine
Sable	Granulométrie
Métasilicate	MS550, conductivité, vitesse dissolution, granulo tamis
Calcaire	Titrimétrie CaCO <sub>3</sub> , Fluo X
Gypse	Titrimétrie CaCO <sub>3</sub> , granulométrie, teneur en eau libre et totale
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	MS550
NH <sub>4</sub> FA	Vitesse de dissolution
MKF	Pouzsolamité, Taux d'amorphe, Fluo X
Argile	Teneur en eau, diffraction X, MS750

Une analyse complète des matières premières utilisées est réalisée à minima une fois par an.

Pour conclure sur le suivi qualité des matières premières entrant dans la composition des liants minéraux :

- S'il s'agit de matières premières produites par des industriels tiers et n'étant pas classifiées par HGCT comme MPS ou MPP, la qualité de ces dernières est garantie par les systèmes qualité des producteurs (typiquement fiche d'autocontrôle de production envoyée à chaque lot reçu) ;

-HOFFMANN GREEN CEMENT TECHNOLOGIES-  
Janvier 2020

- matières premières produites par Hoffmann en interne ;
  - matières premières produites par des industriels tiers.
- Ces deux groupes font l'objet de tests différents.

On distingue également à l'échelle de la production, différents types de matières premières. Ces dernières sont classifiées de la façon suivante :

- Matière première stratégique (MPS). Ces dernières présentent une importance stratégique majeure, notamment parce qu'elles sont intégrées à une chaîne de procédés dont la complexité implique une attention particulière du fait de l'impact important sur les performances des produits fabriqués. Elles doivent :
  - o soit faire l'objet d'une analyse préalable de lot qui permettra de valider un lot avant expédition ;
  - o soit faire l'objet d'une analyse à réception avec possibilité de refus en cas de non-conformité.
- Matière première prioritaire (MPP) ;
- Matière première de Groupe 1 (MG1) ;
- Matière première de Groupe 2 (MG2).

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

A titre d'exemple, dans le cas de la gamme H-UKB, les matières premières entrant dans la composition des liants Prima et Technika sont classifiées de la façon suivante :

Catégories de MP	Nature de la MP	Type d'analyse	Fréquence d'analyse
MPS	Laitier de hauts fourneaux	Fluo X Taux d'amorphe Surface Blaine	A chaque nouveaux lots réceptionnés
MPP	Activateurs carbo-silicate	Essais sur mortier de référence : performances mécaniques et rhéologique	1 essai tous les 6 mois
MPG1	Additions calcaires	Essais sur mortier de référence : performance mécanique et rhéologique	1 essai par an

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

-HOFFMANN GREEN CEMENT TECHNOLOGIES-  
Janvier 2020

Autre plutôt en périphérie. La totalité des sous-échantillons sont mis dans un contenant de taille suffisante et mélangés selon les bonnes pratiques et si besoin à l'aide d'un outil adapté. On prélève alors 2 flacons de 2,5L.

- Stockage en big-bag (protocole alléié) : Tous les 3 big-bag on prélève 1 échantillon d'environ 1 litre à l'aide de la canne de prélèvement multi-points. La totalité des sous-échantillons sont mélangés et mis dans 2 flacons de 2,5L.
- Stockage en sac : Prélèvement de 2,5 L.

- Dans le cas où les matières premières entrent dans les catégories MP5 ou MP6 une caractérisation de ces dernières est spécifiée (protocole d'essais et fréquence d'essais) de manière à assurer la conformité des produits finis.

#### 5.0 Traitement des non-conformité observés sur les liants minéraux

L'analyse des matières premières réalisée par H&CT en cas de non-conformité d'une production est effectuée de manière incrémentielle.

En effet, en cas de non-conformité pour certains paramètres, certaines matières premières, du fait de leur rôle dans le système, sont plus susceptibles d'en être responsables.

A titre d'exemple, en cas de non-conformité de la résistance en compression à 24 h pour le liant H-UKR Technika, il est peu probable que les ajouts calcaires soient responsables : on préférera analyser en priorité les matières premières du groupe MP5, puis celles du groupe MP6.1 et enfin si nécessaire celles du groupe MP6.2.

A l'inverse, si un défaut d'étalement est observé, on préférera analyser en priorité les additions calcaires faisant partie du groupe MP6.2.

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

#### 6.0 Echantillonnage

L'échantillonnage concerne la totalité des produits finis fabriqués et des matières premières reçues.

Les échantillons de produits finis font l'objet d'analyses systématiques. Ils sont archivés et conservés au moins un an dans une échantillonnage.

Comme explicités ci avant dans le document, les échantillons de matières premières reçues ne sont pas systématiquement analysés. En effet, ces derniers peuvent être mis en attente des résultats de production et, selon la conformité des produits finis fabriqués, ils sont eux-aussi archivés et conservés à minima un an dans l'échantillonnage.

Les échantillons sont réalisés selon le protocole suivant :

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

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

- Stockage en silo ou citerne : Prélèvement de 2,5 L par canne
- Stockage en big-bag (protocole renforcé) : Par big-bag on prélève à la canne 2 échantillons d'environ 1 L à l'aide de la canne de prélèvement multi-points. L'un plutôt vers le centre et

## ANNEXES

### **Annexe 2 : Liste des performances**

Désignation	Valeurs				Référence Normative	Période	Variabilité
	Unité	Typique	Min	Max			
Performances sur mortier normalisé	RC à 28 Jours	MPa	75 à 85	70	94	30	Interne
		MPa	75 à 85	72	90	25	Interne
		MPa	80 à 85	73	89	25	Interne
	Flexion 3 points à 28 Jours	MPa	6 à 8	4,5	10,1	15	Interne
	RC à T+1,1H	MPa	12 à 25	12	35	10	Interne
	RC à T+1,1H	MPa	12 à 35	12	35	60	Interne
	RC à 24H	MPa	80 à 140	25	55	30	Interne
	RC à 7 J	MPa	60 à 70	55	80	30	Interne
	Retrait dimensionnel	um/m	3000			3	Interne
	Vitesse des ultrasons à 28J	M/S	4300	3900	4600	50	Interne
	Porosité Totale	%	18			2	Interne
	Porosité accessible à l'eau	%	13			2	Interne
	Résistance au gel/dégel		Bonne			3	Interne
	Carbonatation		En cours				Interne
	Attaque sulfatique		En cours				Interne
Attaque acide		En cours				Interne	
Début de setting	Minutes	<60	12	60	15	Interne	
Fin de setting	Minutes	<120	25	105	15	Interne	
Bétons traditionnels	RC à 28J sur cubes 10x10	MPa	70 à 75	71	74	4	CEREMA Cofrac
	RC à 28J sur cylindre 16x32	MPa	52 à 55	50	57	6	CEREMA Cofrac
	Bétons secs (pressé/vibré)	MPa	50 à 55	40	60	8	Interne
	RC à 6J sur cubes 4x4	MPa	65 à 70	60	75	8	Interne
	RC 28J sur cubes 4x4	MPa	10 à 15 (20°C)	<5	20	15	Interne
	RC à 24H sur cubes 15x15	MPa	40 à 45	30	55	15	Interne
	RC à 28J sur cube 15x15	MPa	15 à 30	10	35	30	Interne
	RC à T+3H à 38°C	Kg/L	2,19	2,27	2,27	6	CEREMA Cofrac
	Masse volumique	S	3	1	5	4	Interne
	Classe de consistance	MPa	Pas de diminution sur murs en extérieur			1 an	Sclérométrie
	Étude de vieillissement	Ultrason	Pas de dégradation observable sur mur en extérieur			1 an	Ultrason
	Étude de vieillissement		En cours				Interne
	Tous bétons et mortiers basés UKR						Interne
	Compatibilité granulats alcali-réactifs						Interne
							Interne