

EVALUATION TECHNIQUE DE PRODUITS ET MATERIAUX N° ETPM-20/0068 du 9 avril 2020

concernant le Béton fibré à Ultra Hautes Performances
(BFUP) Ductal® NaW3-FO

Première édition : 21 mars 2013

Deuxième édition : 18 janvier 2017

Troisième édition : **ETPM-20/0068 du 9 avril 2020**

Titulaire : LAFARGEHolcim Distribution
2 avenue du Général de Gaulle
92140 CLAMART Cedex

Cette Evaluation Technique comporte 23 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

Béton fibré à Ultra Hautes Performances (BFUP) Ductal® NaW3-FO

DEFINITION SUCCINCTE

Le Ductal® NaW3-FO est un Béton Fibré à Ultra Hautes Performances (BFUP). Ce béton se caractérise par une résistance à la compression supérieure à 100 MPa, un mode de rupture ductile sous une sollicitation en flexion et de très bonnes valeurs d'indicateurs de durabilité (faibles porosité et perméabilité notamment). L'obtention de ces performances repose principalement sur une teneur en liant élevée, un rapport eau/ciment très faible ($E/C \leq 0,28$), l'emploi de fibres, un choix très étudié des matériaux et une granulométrie optimisée.

Le Ductal® NaW3-FO est renforcé de fibres organiques courtes (fibres d'Alcool Polyvinylique).

Après coulage, ce béton est conservé en évitant les risques de dessiccation puis en condition ambiante (cf. § 3.4 du dossier technique). Ce béton n'est pas traité thermiquement.

EVALUATION TECHNIQUE

Les propriétés du Ductal® NaW3-FO présentées ci-après résultent principalement de l'analyse des résultats d'essais réalisés par le Laboratoire Central de Recherche de Lafarge (LCR), le CSTB et l'Ecole Centrale de Lille présentés au paragraphe 5 du Dossier Technique.

Variations dimensionnelles

Les variations dimensionnelles de Ductal® NaW3-FO déterminées sur les éprouvettes 40 mm x 40 mm x 160 mm conduisent aux résultats suivants :

Tableau 1 : Variations dimensionnelles du béton NaW3-FO

Type de Ductal®	Premix NaW3-FO	Premix B3-FO
Retrait de séchage	-678 $\mu\text{m}/\text{m}$	-260 $\mu\text{m}/\text{m}$
Retrait endogène	-77 $\mu\text{m}/\text{m}$	-210 $\mu\text{m}/\text{m}$

Inversement, les valeurs de retrait de séchage sont largement supérieures. Elles sont du même ordre de grandeur que celles d'un béton ordinaire.

La cure des éléments en Ductal® NaW3-FO devra être soignée afin de réduire les risques de fissuration liés au retrait de séchage qui est plus important que celui des autres formules de Ductal®.

Résistance à la compression

Les résistances à la compression déterminées sur des éprouvettes de Ductal® NaW3-FO sont données dans le Tableau 7. Les valeurs sont de l'ordre de 75 MPa à 24 heures et comprises entre 114 et 130 MPa à 28 jours.

Comportement en flexion

Des essais de flexion ont été réalisés sur des éprouvettes de Ductal® NaW3-FO. Un exemple d'allure des courbes charge-flèche est donné dans la figure 2 du Dossier Technique.

Le matériau présente une première phase élastique suivi d'une petite décroissance de contrainte. Les valeurs de contrainte et de déformation déterminées à la LDP (Limite de Proportionnalité) et à la rupture, ainsi que le module

d'élasticité, sont données dans les Tableaux 8 à 10. Les contraintes au LDP sont comprises entre 8 et 11 MPa. Les contraintes à la rupture sont comprises entre 12 et 18 MPa. Le module d'élasticité est compris entre 46 000 et 48 000 MPa.

La déformation à la rupture est largement supérieure à la déformation au LDP. Ceci est très favorable à la tenue mécanique des éléments en Ductal® NaW3-FO.

Essais d'abrasion

La résistance à l'abrasion a été déterminée par les essais d'abrasion (méthode Taber) effectués par le LCR. La perte de masse est comprise entre 0,32 g et 0,42 g.

Pour mémoire, ci-dessous les valeurs de perte de masse par essai d'abrasion (méthode Taber) des matériaux suivants :

- Ductal®-FO (perte de masse : 1,0 g),
- Granit (perte de masse : 0,7 g),
- Grès céram (perte de masse : 2,5 g),
- Béton ordinaire (perte de masse : 3,5 à 8,5 g).

La résistance à l'abrasion des éléments en Ductal® NaW3-FO est plus importante que celle des quatre matériaux cités ci-dessus.

Durabilité

La durabilité du matériau durci NaW3-FO a été évaluée à partir d'essais en laboratoire. Deux types d'essais ont été pratiqués : des essais de caractérisation, permettant de mesurer des indicateurs « généraux » de durabilité, et des essais de test de la performance pour des scénarios particuliers.

Indicateurs généraux de durabilité

La démarche adoptée s'appuie le guide [1] de l'AFGC, conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages. Les indicateurs mesurés sont :

- Porosité accessible à l'eau,
- Perméabilité à l'oxygène,
- Coefficient de diffusion des ions Cl⁻ (coefficient de diffusion apparent, mesuré par essai de migration).

Indicateurs de substitution

- Porosité accessible au mercure, et distribution de la taille des pores,
- Perméabilité aux ions chlorures (RCPT, selon ASTM C1202).

Test de performance pour scénarios particuliers

- Résistance à la carbonatation atmosphérique (test en conditions naturelles et accélérées),
- Résistance aux cycles de gel/dégel (conditions sévères) et résistance à l'écaillage.

Le Tableau 2, extrait du guide AFGC [1], donne des valeurs sur les niveaux de durabilité par type de mesure. On rappelle le caractère indicatif des valeurs seuils. L'applicabilité de la méthode a été testée sur des bétons hautes et ultra-hautes performances.

Les résultats des mesures d'indicateurs après 90 jours de cure humide pour les bétons NaW3-FO liées à la durabilité sont rassemblés dans le Tableau 2 et comparés aux seuils du Tableau 3. Cette comparaison permet de définir les classes de durabilité des bétons NaW3-FO pour les différentes caractéristiques.

Tableau 2 : Classes de durabilité et valeurs limites des bétons définies dans le guide AFGC[1]

Synthèse des classes et valeurs limites (indicatives) relatives aux indicateurs de durabilité généraux (G) ou de substitution (S) : porosité, résistivité électrique, coefficient de diffusion et perméabilité. Les valeurs indiquées correspondent à des mesures réalisées selon les méthodes décrites dans ce guide sur des éprouvettes conservées dans l'eau pendant 3 mois après le coulage.

Durabilité potentielle →		Classes et valeurs limites				
		Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
G	Porosité accessible à l'eau (%) P_{eau}	> 16	14 à 16	12 à 14	9 à 12	6 à 9
S	Porosité mesurée par intrusion de mercure ($P_{Hg\ max} = 400\ MPa$ et prétraitement par étuvage à $T = 45\ ^\circ C$ pendant 14 jours en présence de gel de silice) (%) P_{Hg}		13 à 16	9 à 13	6 à 9	3 à 6
G	Coefficient de diffusion apparent des chlorures (mesuré par essai de migration) ($10^{-12}\ m^2.s^{-1}$) $D_{app(mig)}$	> 50	10 à 50	5 à 10	1 à 5	< 1
G	Perméabilité apparente aux gaz (à $P_{entrée} = 0,2\ MPa$ et après étuvage à $T = 105\ ^\circ C$) ($10^{-18}\ m^2$) K_{gaz}	> 1000	300 à 1000	100 à 300	10 à 100	< 10

Tableau 3 : Classes de durabilité des bétons Ductal® NaW3-FO déterminées à partir des valeurs limites définies dans le guide AFGC (après 90 jours de conservation humide à 20°C)

Classes de durabilité	Premix NaW3 HA	
	Avec fibre organique	Sans fibre
Porosité accessible à l'eau (%)	10.9	11,2
Porosité mesurée par intrusion de mercure (%)	8.1	6.6
Coefficient de diffusion des chlorures ($10^{-12}m^2.s^{-1}$)	0.1 Durabilité très élevée	-
Perméabilité à l'oxygène ($10^{-18}\ m^2$) $S = 0$; mesures à 28 jours	22.5(*)	2.9 Durabilité très élevée

(*) Méthode d'essai non adaptée en présence de fibres organiques en raison du séchage à 105°C. Démarche valide uniquement pour la matrice sans fibres.

Porosité accessible à l'eau

La porosité à l'eau est de 10,9 à 11,2%. Cependant, le volume de pâte du produit est supérieur à celui des bétons qui ont été utilisés pour la définition du tableau 2. La transposition des valeurs-seuils de ce tableau pour déterminer le niveau de durabilité du Ductal® NaW3-FO peut susciter des discussions. Les valeurs de porosité doivent être exprimées en fonction du volume de pâte pour être comparables.

Le projet BHP 2000 avait évalué la durabilité en fonction du volume des vides sur la base du rapport volume de vides sur volume de pâte.

Ce rapport « volume de vides / volume de pâte » pour NaW3-FO est de 21%. Cette valeur est comparée à celles établies dans le projet BHP 2000, présentées dans le tableau 4.

Elle est plus faible que celle des autres bétons présentés.

Tableau 4 : Caractéristiques de bétons du projet national BHP 2000 [2]

Béton (Dmax 20 mm)	E/Liant	Rc (28J) MPa	P(eau) %	Niveau durabilité (*)	V(pâte) kg/m ³	V(vides) / V(pâte) %
M25	0.84	24.5	16.1	Très Faible	266	60.5
M30CV	0.52	48.5	12.8	Moyen	273	46.8
M50	0.48	55.5	14.7	Faible	327	44.9
M75	0.32	75	11.4	Elevée	292	39.0
M100FS	0.30	109	8.4	Très élevée	260	32.3
M120FS	0.24	127.5	7.4	Très élevée	298	24.8
NaW3-FO	≤ 0.28					21.0

(*) Niveau de durabilité selon les valeurs de porosité accessible de l'eau, d'après les critères du tableau 1.

NB : les valeurs ont été déduites par calcul à partir de la composition des bétons et des valeurs de porosité accessible à l'eau [2]. Le volume de pâte est assimilé est la somme du volume de liant et d'eau efficace.

Porosité mesurée par intrusion de mercure

La porosité mesurée par intrusion de mercure sur des éprouvettes de Ductal® NaW3-FO est de 0,042 mL/g, correspondant à environ 8,1%. Ces valeurs sont plus faibles mais cohérente avec les valeurs de porosité à l'eau.

La figure 3 permet de comparer les courbes de porosimétrie du Ductal® NaW3-FO avec celles d'un béton ordinaire et d'un BHP. Il est en particulier notable que la porosité capillaire du Ductal® NaW3-FO est beaucoup plus faible que celle des deux autres bétons. C'est cette population de pores, de rayon supérieur à 100 nm, qui est prépondérante dans le transport d'espèces chimiques agressives comme le CO₂ (gazeux) et les ions chlorures.

Perméabilité au gaz

Les essais de perméabilité ont été réalisés sur des éprouvettes préalablement séchées à 60°C et 105°C. La température de séchage influence de façon significative la perméabilité à l'air du matériau. Chacune des températures présentent des avantages et des inconvénients techniques et sont toujours discutées dans les groupes de normalisation. Nous avons retenu l'ensemble des résultats dans le cadre de cette Evaluation Technique.

Résistance à la pénétration des ions chlorures

Les valeurs de résistance à la pénétration des ions chlorures, déterminée conformément à la norme ASTM C 1202, sont de l'ordre de 400 à 450 Coulombs.

Ces valeurs positionnent le matériau dans la catégorie « Very Low Chloride Permeability » selon les critères de la norme présentés tableau 5.

Tableau 5 : Résistance à la pénétration des ions chlorures selon la norme ASTM C 1202

Table: Chloride Permeability Based on Charge Passed

Charge Passed (Coulombs)	Chloride Permeability	Typical of
>4,000	High	High W/C ratio (>0.60) conventional PCC
2,000–4,000	Moderate	Moderate W/C ratio (0.40–0.50) conventional PCC
1,000–2,000	Low	Low W/C ratio (<0.40) conventional PCC
100–1,000	Very Low	Latex-modified concrete or internally-sealed concrete
<100	Negligible	Polymer-impregnated concrete, Polymer concrete

Résistance au gel-dégel et à l'écaillage

Les résultats des essais de résistance au gel-dégel montrent que les échantillons de NaW3-FO ne subissent aucun dommage lors des cycles de gel/dégel en conditions sévère.

Les essais de résistance à l'écaillage montrent que la peau des échantillons n'est pas affectée par les cycles de gel/dégel en présence de sels de déverglaçage.

Résistance à la carbonatation

Les essais de résistance à la carbonatation en conditions naturelles et en conditions accélérées sur bétons Ductal® NaW3-FO ont été réalisés. Les résultats permettent de conclure que les bétons Ductal® NaW3-FO sont très résistants aux phénomènes de carbonatation.

Risque d'alcali-réaction

Le sable employé est constitué de quartz cristallisé de haute pureté (99.8%). En l'absence de constituant amorphe ou cryptocristallin, le matériau ne présente donc pas de risque d'alcali-réaction.

Effet de la température

Les essais de caractérisation mécanique à 80°C sur bétons NaW3-FO sont donnés dans le Tableau 19. Les résultats des essais montrent que la température de 80°C ne diminue pas les performances mécaniques en flexion du matériau.

Réaction au feu

Il n'a pas été réalisé d'essais de réaction au feu sur des éléments en Ductal® NaW3-FO.

Néanmoins, le Ductal® B3-FO bénéficie d'un classement A2 - s1,d0 pour les épaisseurs comprises entre 10 et 100 mm. Le Ductal® B3-FO contient 4,3% de fibres APV (en volume). Cette quantité est supérieure à celle du dosage en fibres du Ductal® NaW3-FO (0.8%-4% en volume).

Résistance au feu

Il n'a pas été réalisé d'essais de résistance au feu sur des éléments en Ductal® NaW3-FO.

L'évaluation de la résistance au feu des ouvrages en NaW3-FO nécessite la réalisation d'essais représentatifs de l'ouvrage considéré.

Pour mémoire, il a été effectué des essais de résistance au feu ont été effectués sur 3 types d'éléments en Ductal® B3-FO : panneau, dalle et colonne. La sollicitation thermique appliquée était conforme à la norme ISO 834-1. Les principaux résultats sont présentés dans le dossier technique.

La principale préoccupation vis-à-vis du comportement au feu des bétons à très haute performance est le risque d'écaillage. L'écaillage a été observé lors des essais sur les 3 types d'éléments. Cependant, il a été observé dans des proportions très variables. Ainsi, l'écaillage a été faible sur le panneau et la dalle de faibles épaisseurs. Il a été plus important sur les 2 colonnes.

VISITE D'USINE DE FABRICATION

La fabrication de panneaux en Ductal® NaW3-FO a été observée dans l'usine de Betsinor Composites à Courrières (62), le 27 juin 2012.

CONTROLES

La fabrication doit faire l'objet d'un contrôle portant sur la régularité de la fabrication. Les contrôles à réaliser sont décrits aux articles 2 et 3 du Dossier Technique.

CONCLUSIONS

Appréciation globale

Le dossier technique présenté dans ce rapport, a été établi dans l'hypothèse de l'utilisation du béton Ductal® NaW3-FO pour la fabrication de produits préfabriqués destinés à des emplois non structuraux.

Les éléments du dossier technique n'ont pas fait apparaître d'incompatibilité de nature à écarter à priori l'utilisation envisagée.

En absence de justification des caractéristiques thermiques du matériau, sa contribution aux performances thermiques de l'ouvrage ne peut pas être prise en compte dans les calculs.

Le comportement au fluage n'a pas été évalué. La réalisation d'essais complémentaires sera nécessaire dans le cas où le comportement différé affecte le comportement mécanique global de l'ouvrage.

Des armatures passives pourront être incorporées dans les produits afin d'augmenter leurs performances mécaniques. La réalisation d'essais complémentaires et spécifiques sera alors nécessaire pour déterminer leurs caractéristiques mécaniques.

Il est rappelé que cette évaluation n'a pas vocation à couvrir l'ensemble des critères d'aptitude à l'emploi pour chacune des applications envisagées (par exemple panneaux et coques architectoniques de faibles épaisseurs, modénatures, mobiliers urbains, ...). C'est normalement l'objet des Avis Techniques qui pourront être instruits sur la base de la présente évaluation et des éventuelles justifications complémentaires nécessaires.

Validité

La présente évaluation est délivrée par une durée limitée à 5 ans.

Validité jusqu'au : 9 avril 2025

Direction Sécurité, Structures et Feu
Le Directeur

« François JALLOT »

DOSSIER TECHNIQUE ETABLI PAR LE DEMANDEUR

1. INTRODUCTION

Le Ductal® NaW3-FO est un Béton Fibré à Ultra Hautes Performances (BFUP). Cette famille de bétons se distingue principalement des Bétons à Hautes Performances (BHP) et des Bétons à Très Hautes Performances (BTHP) par une résistance à la compression supérieure à 100MPa, un mode de rupture ductile sous une sollicitation en flexion et de très bonnes valeurs d'indicateurs de durabilité (faibles porosité et perméabilité notamment). L'obtention de ces performances repose principalement sur une teneur en liant élevée, un rapport eau/ciment très faible ($E/C \leq 0,28$), l'emploi de fibres, un choix très étudié des matériaux et une granulométrie optimisée.

Le Ductal® NaW3-FO est renforcé de fibres organiques courtes (fibres d'Alcool Polyvinylique).

Les propriétés du NaW3-FO frais sont les suivantes :

- Etalement de la matière sans fibres : Cône ASTM, 0 choc avec étalomètre humide (cm) : 290 ± 30 mm à 3 minutes maximum après levée du cône,
- Masse volumique (kg/m³) : 2350 ± 50 ,
- Temps d'utilisation : supérieur à 1 heure après la fabrication à température ambiante du béton.

Le numéro de publication du brevet européen est l'EP1958926A1.

Les fabrications sont réalisées dans des usines de préfabrication ou dans des unités de préfabrication foraine. La fabrication du Ductal® NaW3-FO est réalisée par des entreprises de préfabrication détentrices de la sous-licence NaW3, à partir de l'ensemble des matières premières fournies par LafargeHolcim Distribution. Cet ensemble est appelé : « Full premix NaW3 ».

La présente Evaluation Technique porte sur le béton Ductal® NaW3-FO

Dans le texte qui suit, nous distinguerons la phase de fabrication du "Full premix NaW3" réalisée par LafargeHolcim Distribution et la fabrication du béton Ductal® NaW3-FO réalisée par les entreprises de préfabrication.

2. FABRICATION DU "FULL PREMIX"

2.1. Matières premières

Les matières premières constituant le "Full premix NaW3-FO" sont les suivantes.

Full premix NaW3-FO

- Premix NaW3,
- Fluidifiant F4,
- Accélérateur A3,
- Fibres organiques.

Le premix NaW3 est un liant constitué de :

- Ciment blanc
- Filler calcaire,
- Sable, $D_{max} \leq 0.6$ mm.

Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- Couleur : blanche,
- Densité apparente aérée : 1000-1100 kg/m³.

Le sable employé est constitué de quartz cristallisé de haute pureté (99.8%). En l'absence de constituant amorphe ou cryptocristallin, le matériau ne présente donc pas de risque d'alcali-réaction.

Dans la mesure où une substitution de matière première est envisagée, LafargeHolcim Distribution s'engage à atteindre une performance équivalente.

2.2. Fabrication

Le premix NaW3 est fabriqué par mélange des trois poudres constitutives : le sable, le ciment et le filler, dans un mélangeur d'une capacité de trois tonnes. Les tolérances des proportions sont de 3% sur chaque constituant. Le conditionnement à sec du premix se fait en seau, en sac, en fût, en big-bag ou en vrac. Ces éléments sont posés sur une palette qui est houssée et stockée dans une zone couverte à l'abri de l'humidité.

2.3. Contrôles

Le plan de contrôle sur le liant premix NaW3 est décrit dans la procédure interne].

Les contrôles sont réalisés sur :

- la rhéologie du béton NaW3 non fibré au moyen d'un essai d'étalement au cône (ASTM C230),
- la résistance mécanique à la compression sur éprouvettes cylindriques Ø 7 x H 14 cm de béton NaW3 non fibré (appelé LC-matrice) conservé à 20°C pendant 48h puis 90°C, 95%HR pendant 48h.

Ces contrôles sont réalisés à chaque livraison de matière première et toutes les 25 tonnes de premix produites. Les spécifications sont données dans la procédure.

2.4. Conditionnement et livraison

Le premix NaW3 est livré par la Société LafargeHolcim Distribution aux entreprises de préfabrication, soit en vrac, livrés par camion-citerne (pour être stockés en silos), soit en big-bags, soit en seaux, ou exceptionnellement en sacs. Le marquage NaW3 figure sur tous les bordereaux de livraison du liant.

Les produits d'adjuvantation fournis avec le premix par la Société LafargeHolcim Distribution sont livrés en bidons, fûts ou conteneurs.

Les fibres organiques fournies avec le premix par la Société LafargeHolcim Distribution sont livrées en sacs.

L'ensemble des matériaux est livré dans les proportions préconisées pour la fabrication du béton Ductal® NaW3-FO.

3. FABRICATION DU BETON NaW3-FO

3.1. Centres de fabrication

Introduction

Le béton Ductal® NaW3-FO est préparé dans des usines de préfabrication ou unités de préfabrication foraine détentrices de la sous-licence NaW3 délivrée par la Société LafargeHolcim Distribution. Ces unités de production fabriquent et mettent en œuvre dans des moules le béton Ductal® NaW3-FO, sous leur responsabilité.

L'unité de production prend connaissance du protocole de fabrication remis par le technicien de l'assistance technique NaW3 lors de la visite de qualification. Ce protocole renseigne pour une installation donnée des quantités à introduire, des temps et chronologies à respecter pour fabriquer une gâchée de béton Ductal® NaW3-FO. L'unité de production est en outre renseignée sur les bonnes pratiques à effectuer pour la maturation du matériau.

Les dispositions de fabrication et de contrôle sont précisées dans le cahier des charges délivré par la Société LafargeHolcim Distribution à l'unité de production lors de la délivrance de la sous-licence NaW3.

La liste des unités de production détenant la sous-licence NaW3 est disponible auprès de la Société LafargeHolcim Distribution.

Sous-licence NaW3

Un technicien de LafargeHolcim Distribution établit la formule du béton Ductal® NaW3-FO (rapport E/C, quantité d'adjuvant et d'accélérateur) avec le matériel de l'unité de production. Cette unité de production obtient la sous-licence NaW3 au vu des résultats de cette validation et des conclusions de la visite préalable.

Assistance technique

La Société LafargeHolcim Distributions assure la formation théorique et pratique de chaque entreprise utilisatrice du matériau Ductal® NaW3-FO.

La Société Lafarge Holcim Distributions assure son assistance aux entreprises sous-licenciées lorsqu'elles en font la demande.

Cette assistance ne peut être assimilée ni à la conception de l'élément, ni à la réception des moules, ni à un contrôle des règles de mise en œuvre.

Visite annuelle de l'unité de production

La fabrication dans les unités de production sous-licenciées est auditée par la Société Lafarge Holcim Distributions dans le cadre d'une visite annuelle.

Les anomalies, remarques et commentaires éventuels, sont consignés dans le rapport de visite, qui précise les mesures correctives à prendre pour conserver la sous-licence délivrée par la société Holcim Distribution.

En cas d'interruption de la production du béton NaW3 sur une période de quelques mois, la visite annuelle est reportée jusqu'à la reprise de la production.

Equipements nécessaires

Les conditions nécessaires pour la mise en place du Ductal® NaW3-FO sont les suivantes :

- bâtiment couvert et protégé contre les risques de gel,
- la température de l'air et des moules doit être comprise entre 5 et 35 °C.

3.2. Compositions

Le béton Ductal® NaW3-FO est préparé par mélange des constituants du "Full premix NaW3-FO". L'eau doit être conforme à la norme EN 1008. Les centrales de production ne doivent en aucun cas utiliser des eaux provenant de recyclage.

Les proportions des mélanges doivent respecter les conditions suivantes :

- rapport E/C inférieur ou égal à 0,28,
- dosage en fluidifiant F4 compris entre 1 et 3.5 % de la masse de ciment,
- dosage en accélérateur A3 compris entre 0 et 5 % de la masse de ciment,
- dosage en fibres organiques : 0.8%4% volumique.

Les quantités respectives introduites sont précisées dans un protocole de fabrication remis par l'assistant technique de Lafarge Holcim Distributions à l'issue de sa visite préalable.

3.3. Fabrication

Malaxage

Le malaxeur servant au gâchage du béton Ductal® NaW3-FO ne doit pas comporter d'eau résiduelle avant chargement. La bascule à liant, le malaxeur et sa trémie de vidange doivent être complètement purgés de toute trace de liant à chaque changement de liant.

L'ordre d'incorporation est le suivant :

- premix NaW3 : malaxage pendant un temps t6
- eau + ½ quantité de fluidifiant F4 : malaxage pendant un temps t7
- ½ quantité de fluidifiant F4 : malaxage pendant un temps t8
- fibres organiques : malaxage pendant un temps t9
- accélérateur A3 éventuel : malaxage pendant un temps t10

Les fibres organiques sont introduites de manière progressive au mélange (soit manuellement, soit à l'aide d'un tapis vibrant) afin d'éviter toute création de «pelote».

Les temps de malaxage (t1 à t10) sont fixés par l'assistant technique de Lafarge Holcim Distributions lors de la visite préalable. Ces temps sont fixés en fonction du matériel de l'unité de production, de manière à respecter un étalement du béton Ductal® NaW3-FO au cône ASTM compris entre 260 mm et 320 mm à 3 minutes après levée du cône. Ils figurent dans le protocole de fabrication remis à l'unité de production par la Société LafargeHolcim Distribution.

Mise en place dans les moules

La mise en place du Ductal® NaW3-FO dans les moules doit se faire dans un délai maximum de 1 heure après la fabrication du béton, pour des conditions de température moyenne.

Un béton Ductal® NaW3-FO ne remplissant pas les conditions du § 3.4.4 ne doit pas être coulé.

La mise en place commence par un côté du moule afin de chasser progressivement l'air lors du coulage. Cette mise en place se fait sous une légère vibration continue.

3.4. Conditions de conservation et traitement thermique

Conditions de conservation dans les moules

L'élément coulé en Ductal® NaW3-FO doit être protégé de la dessiccation jusqu'à la fin de prise. On peut procéder en étendant un film plastique sur l'élément ou en vaporisant un produit de cure sur le matériau, afin qu'il soit protégé de toute évaporation. Ces conditions de conservation doivent être d'autant plus surveillées et maintenues que l'air ambiant est sec ou que l'environnement de l'élément est ventilé. La température ne doit pas excéder 40 °C. Entre 30°C et 40°C, le dosage en fluidifiant F4 peut être ajusté afin de respecter les propriétés rhéologiques du matériau à l'état frais avant introduction des fibres.

L'élément réalisé en Ductal® NaW3-FO devra être protégé de la pluie et du soleil direct pendant 48 heures après la prise.

3.5. Réception de la gâchée et Contrôles

Béton frais

La rhéologie du béton frais est vérifiée après chaque gâchée. Avant de mettre en place le Ductal® NaW3-FO dans le ou les moules, sa fluidité est contrôlée à l'aide de la mesure de l'affaissement au cône selon la norme ASTM C230. L'essai est réalisé par la méthode statique.

L'étalement pour la mise en œuvre du béton Ductal® NaW3-FO est compris entre 260mm et 320mm.

Béton durci

Le protocole standard est le suivant. A chaque campagne de fabrication, l'unité de production fait prélever 3 éprouvettes 7 cm x 7 cm x 28 cm. Celles-ci sont conservées dans l'usine de production jusqu'à ce qu'elles puissent être transportées, protégées de la dessiccation pendant 48 heures (par un film plastique, par exemple) et soumis à un essai de flexion à 7 jours.

Au moins une série d'éprouvette est réalisée et testée par 10 m³ de béton fabriqué.

La moyenne des modules de rupture (post-fissuration) doit être supérieure à 12 MPa.

La moyenne des résistances à la compression doit être supérieure à 110 MPa. La valeur caractéristique associée est 100 MPa.

En fonction de ses applications, l'unité de fabrication peut décider de contrôles et de spécifications associées différents.

4. DOMAINE D'EMPLOI

Les applications principales des bétons Ductal® NaW3-FO sont les suivantes :

- panneaux et coques architectoniques,
- brises soleil,
- escaliers,
- modénatures,
- mobilier urbain.

5. RESULTATS EXPERIMENTAUX

5.1. Variations dimensionnelles

Les éprouvettes sont des prismes 4x4x16cm. Les moules utilisés sont en acier. Des plots de mesure sont fixés au centre des sections 4x4 cm. Ils seront noyés dans le béton et serviront de base de mesure de la longueur de l'éprouvette. Le remplissage se fait en une couche. Après confection les éprouvettes sont conservées sur le lieu de fabrication. Le démoulage se fait à l'échéance de 24 heures \pm 1 heure.

- Pour la mesure de retrait total, les prismes sont ensuite rapidement emmenés dans une salle régulée à 20°C 50% H.R.
- Pour la mesure de retrait endogène, les prismes sont préalablement recouverts de deux couches de papier aluminium avant d'être stockés dans une salle régulée à 20°C 50% H.R.

La mesure de la longueur initiale (L₀) et de la masse initiale sont effectuées dès mis en place dans la salle de séchage. Le matériel utilisé est un rétractomètre. Une fois par jour, puis de moins en moins fréquemment, la longueur et la masse sont mesurées.

Les résultats [11] après 55 jours sont présentés dans le tableau 6.

Tableau 5: Synthèse des résultats des variations dimensionnelles

Type	NaW3-FO (âge début d'essai : 1 jour)
Retrait de séchage (mm/m)	0,68 (55 jours)
Retrait endogène (mm/m)	0,08 (55 jours)

5.2 Résistance à la compression

Les essais de compression ont été réalisés au LCR [4] sur des cylindres $\varnothing 7$ H 14. Ces cylindres ont été conservés 28 jours à 20°C et 100% HR.

Les résultats sont présentés dans le tableau 6.

Tableau 7 : résistances en compression (moyenne et valeurs minimum et maximum entre parenthèses)

Type	Ductal® NaW3 - FO	Ductal® NaW3 (sans fibres)
Résistance après 24 h (MPa)	74,6 (6 ep.:73,3–75,9)	<i>Non mesurée</i>
Résistance après 28 j à 20°C et 100% HR (MPa)	114,3 (8ep.:111,5–118,7)	129,5 (3 ep.: 125,9–131,5)
Résistance après 90 j à 20°C et 100% HR (MPa)	132,7 (4 ep.: 128,0– 135,7)	<i>Non mesurée</i>

5.3 Comportement mécanique en flexion quatre points

Les essais de flexion 4 points ont été réalisés à 28 jours par le LCR [5], [6], [27], [28] et par le CSTB [19]. Les essais ont été réalisés sur différents types d'éprouvettes :

- 70x70x280 mm : Tableau 8, Figure 1, [5].
- 450x100x20 mm : Figure 2, [6] : Essais croisés industriel-laboratoire.
- 450x140x20 mm : Tableau 9, [27].
- 450x140x25 mm : Tableau 9, [28].

Des essais [6] ont été effectués dans le cadre d'essais comparatifs (fabrication laboratoire au LCR et industrielle chez Betsinor).

Les déformations et contraintes ont été calculées en considérant le matériau élastique, isotrope et homogène. Un exemple d'allure des courbes est donné dans la Figure 2.

Figure 1 : exemple de courbe de flexion sur éprouvette de NaW3-FO de 70 mm x 70 mm x 280 mm

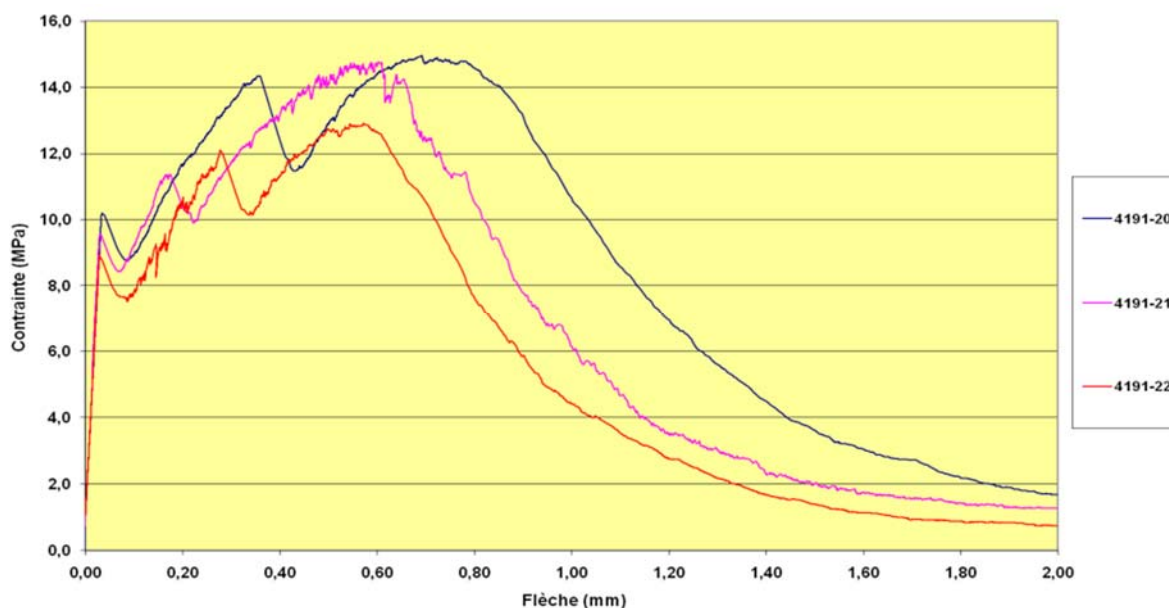


Tableau 8 : Résultats des essais de flexion quatre points sur éprouvettes 70x70x280mm

Ductal®	NaW3-FO
	7x7x28 (9 épr.)
Déformation LDP* (mm/m)	1,80^{E-04} (1,07 ^{e-4} - 2,40 ^{e-4})
Contrainte LDP* (MPa)	7,7 (5,5-9,9)
Déformation rupture (mm/m)	6,07^{E-03} (4,27 ^{e-3} -8,07 ^{e-3})
Contrainte rupture (MPa)	15,6 (12,9-18,6)
E (MPa)	46 000 (42500-48600)

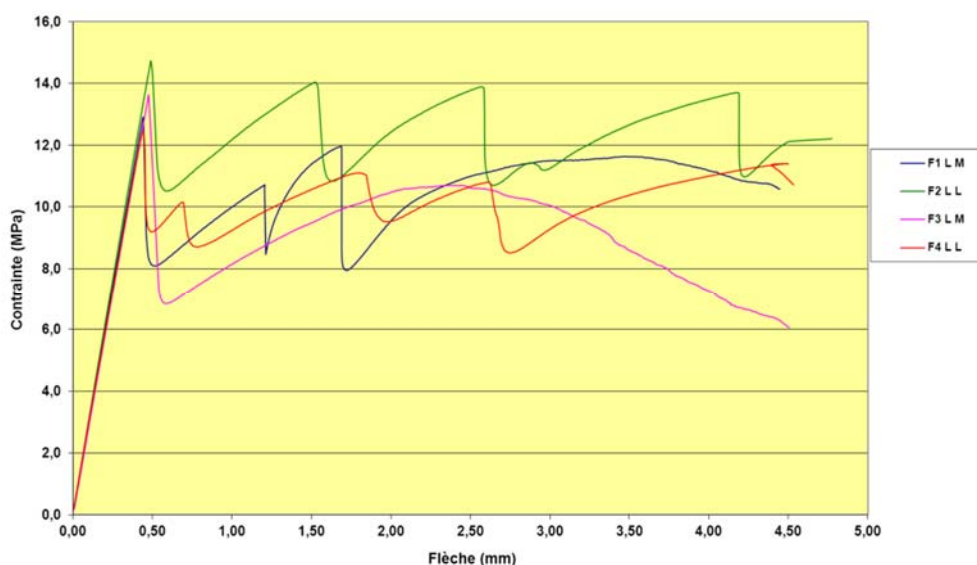
*LDP = Limite de Proportionnalité ou point à partir duquel la courbe n'est plus linéaire

Tableau 9 : Résultats des essais de flexion quatre points sur éprouvettes

Ductal®	NaW3-FO	
	450x140x25 (3 épr.) LCR	450x140x20 (3 épr.) LCR
Déformation LDP* (mm/m)	5,80 10⁻⁵ (2,12- 9.7 10 ⁻⁵)	2,30 10⁻⁴ (2,26 à 2,35 10 ⁻⁴)
Contrainte LDP* (MPa)	10,5 (8,9 - 12,3)	10,9 (10,6 - 11,3)
Déformation rupture (mm/m)	8,2, 10⁻³ (7,2 - 9.4 10 ⁻³)	<i>nc</i>
Contrainte rupture (MPa)	17,5 (16,4-18,4)	12,4 (11,5 - 12,9)
E (MPa)	<i>nc</i>	48 200 (47300 - 48900)

*LDP = Limite de Proportionnalité ou point à partir duquel la courbe n'est plus linéaire
Nc signifie que la valeur n'a pas pu être calculée.

Figure 2 : exemple de courbe de flexion sur éprouvette de NaW3-FO de 450 mm x 100 mm x 20 mm



5.4 Comportement mécanique en flexion trois points

Les essais de flexion 3 points ont été réalisés à 28 jours par le LCR [22]. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes de 40 mm x 40 mm x 160 mm. Les résistances ont été calculées en considérant le matériau élastique, isotrope et homogène. Les résultats sont donnés dans le tableau 10.

Tableau 10 : Résultats des essais de flexion trois points sur éprouvettes

Ductal®	NaW3-FO
Résistance (MPa)	20,2 (3 épr) (19,3 - 21,6)

5.5 Essais d'abrasion

Des essais d'abrasion ont été effectués au LCR [7] sur des plaques en NaW3-FO sont présentés Tableau 7. Les éprouvettes testées étaient des carrés de 100mm de côté avec un trou central de 12mm pour la fixation sur un plateau tournant.

Les essais d'abrasion ont été effectués selon la méthode Taber, décrite par la norme ASTM C 501-84. L'échantillon est pesé à 0.01g près, puis il est fixé sur un plateau tournant à 60 tours par minute. Deux meules abrasives sont appliquées sur l'échantillon avec une force d'appui donnée. L'échantillon est mis en rotation 500 tours, puis il est pesé, les poussières générées sont éliminées par un système d'aspiration. L'abrasivité s'exprime par la perte de masse au bout des 500 tours, pour une force d'appui donnée et un type de meule.

Tableau 11 : Résultats des essais de flexion trois points sur éprouvettes

Ductal®	NaW3-FO (3 épr)	Béton décoratif « Artévia » (3 épr)
Perte de masse (g)	0,32 (0,31 - 0,33)	5,06 (4,79 - 5,49)
Perte de masse (%)	0,07 (0,06 - 0,07)	1,08 (1,02 - 1,17)

5.6 Durabilité – porosité accessible à l'eau

Des essais de porosité à l'eau ont été réalisés par le LCR [8] sur des éprouvettes de Ductal® NaW3-FO, avec et sans fibres, et conservées 28 et 90 jours à 20°C et 100 d'humidité relative. Les mesures ont été effectuées conformément à la norme NF P 18-459. Les résultats du LCR sont présentés dans le tableau 12.

Tableau 12 : résultats des essais de porosité accessible à l'eau réalisés au LCR

Ductal®	Porosité à l'eau (%) après 28 jours de cure humide à 20°C	Porosité à l'eau (%) après 90 jours de cure humide à 20°C
NaW3-FO	11,3 (11,3 / 11,3 / 11,3)	10,9 (10,9 / 10,9 / 10,9)
NaW3 (sans fibres)	11,7 (11,7 / 11,6 / 11,7)	11,2 (11,2 / 11,2 / 11,2)

5.7 Durabilité - porosimétrie par intrusion de mercure

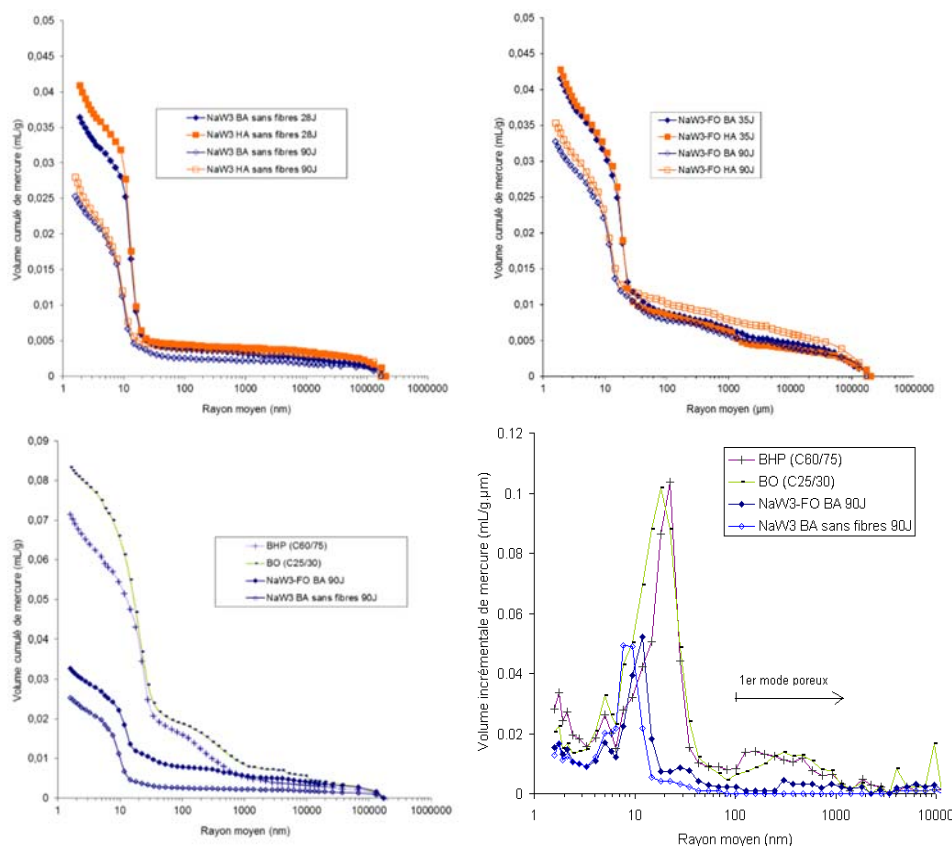
Des essais de porosimétrie par intrusion de mercure ont été réalisés par le LCR [10]. Les mesures ont été effectuées pour des échantillons n'ayant pas subi de traitement thermique, et ayant mûri 28 jours et 90 jours à 20°C, 100%HR. Les résultats sont présentés dans le Tableau 13.

Tableau 13 : porosité totale par intrusion de mercure

Ductal®	Porosité totale (%) – après 28 jours de cure humide	Porosité totale (%) – après 90 jours de cure humide
NaW3-FO	9,6	8,1
NaW3 (sans fibres)	9,3	6,6

Les courbes de porosimétrie sont présentées ci-après. La première figure regroupe les courbes de distribution de rayon de pores pour les échantillons pourvus de fibres (FO) et la deuxième pour les échantillons coulés sans fibres. A titre de comparaison, des distributions de tailles de pores mesurées dans les mêmes conditions pour un béton ordinaire avec cendres volantes, et pour un BHP formulé avec des fumées de silice.

Figure 3 : courbes de porosité par intrusion de mercure pour les deux formules de Ductal® NaW3-FO avec et sans fibres. Courbes seules (haut) et comparaison avec des bétons ordinaires (bas).



On distingue deux modes poreux selon [30] : le premier mode poreux (ou porosité capillaire), qui regroupe des pores de rayon supérieur à 100 nm, correspond à l'espace occupé initialement par l'eau de gâchage. Le volume et la taille de cet espace poral diminuent progressivement avec la précipitation et la croissance des hydrates. Avec l'hydratation apparaît un « second mode poreux », correspondant à des vides plus petits, situés entre les amas d'hydrates.

Le premier mode poreux dépend essentiellement du rapport Eau / Ciment. Sa disparition correspond au passage à l'état discontinu du réseau de ces pores inter-grains. Le second mode poreux, lié à l'architecture des amas d'hydrates, est une caractéristique intrinsèque du matériau. Il progresse tant que des C-S-H externes aux grains de ciment se forment. Quand l'hydratation ne progresse plus qu'en formant des hydrates internes (ie : transformation « in-situ » des grains anhydres en C-S-H), cette nouvelle porosité n'est pas ou peu accessible par porosimétrie mercure.

Pour le Ductal® NaW3-FO, le premier mode poreux est inexistant (cf. dernier graphique de droite de la figure 3). Ceci est attribuable au rapport E/C très faible de la pâte, et à l'empilement granulaire optimisé à toutes les échelles de grains. Et l'on constate que les rayons caractéristiques du second mode poreux sont plus faibles que ceux des bétons BO et BHP considérés (10 nm contre 25 nm), ce qui est très favorable pour limiter le transport d'espèces chimiques agressives dans le matériau.

5.8 Durabilité – perméabilité à l'oxygène

Des essais de perméabilité à l'oxygène ont été réalisés à l'Ecole Centrale de Lille [9] et au LCR [18] sur des éprouvettes de Ductal® NaW3-FO à 28 jours. A l'Ecole Centrale de Lille (ECL), les éprouvettes ont été placées dans une chambre de confinement et soumises à une pression de 35 bars. On fait alors passer de l'oxygène à travers les éprouvettes, à une pression d'entrée de 16 bars. Au LCR, le test classique de mesure de perméabilité selon la norme XP P 18-563. Les résultats sont présentés dans le Tableau 14.

Tableau 14 : perméabilité à l'oxygène

Type de BFUP	Perméabilité à 20°C (m ²)		Perméabilité avec séchage à 105°C (m ²)		Perméabilité avec séchage à 60°C (m ²)
	ECL	LCR	ECL	LCR	ECL
NaW3-FO	Non mesurée	< 0.5·10 ⁻¹⁸	Non mesurée	22.5·10 ⁻¹⁸ (16,1·10 ⁻¹⁸ à 26,9·10 ⁻¹⁸)	Non mesurée
NaW3 (sans fibres)	Non mesurée	< 0.5·10 ⁻¹⁸	Non mesurée	2.9·10 ⁻¹⁸ (2,9·10 ⁻¹⁸ à 3,0·10 ⁻¹⁸)	Non mesurée

Les valeurs mesurées pour la matrice sans fibres sont très faibles : inférieures à 10 ·10⁻¹⁸m².

En présence de fibres, la perméabilité à l'oxygène est un peu plus élevée.

Le séchage à 105°C entraîne un artefact : les fibres se colorent et on observe une augmentation de la perméabilité. La présence d'un artefact comme des modifications au sein des échantillons lors du séchage à 105°C expliquerait les différences entre les mesures au LCR et l'ECL.

L'augmentation de la perméabilité avec le séchage avec les fibres est plus nette pour une autre formule (G3 FO et G3 sans fibres (cf. Figures 3 et 7 du rapport de l'Ecole Centrale de Lille).

Les valeurs mesurées en présence de fibres restent toutefois faibles : entre 3 et 32 ·10⁻¹⁸m², après séchage à 105°C.

5.9 Coefficient de diffusion des ions chlorures (XP P 18-462)

Le coefficient de diffusion du béton Ductal® NaW3-FO a été mesuré selon le protocole décrit dans la norme XP P18-462. Après 6 mois de cure humide, un disque de NaW3-FO de 11 cm de diamètre et 5 cm d'épaisseur a été placé entre deux cellules, l'une remplie d'une solution de soude diluée (NaOH0.1 M) et l'autre avec une solution de soude avec une certaine quantité de sel NaCl dissous (NaOH0.1 M + NaCl0.5 M). Une différence de potentiel de 20 V est imposée entre les deux cellules, afin d'accélérer la pénétration dans l'échantillon. Au bout d'une certaine durée d'essai, évaluée selon les mesures de courant entre les faces des disques, l'essai est stoppé, les cellules démontées, le disque fracturé et aspergé avec une suspension de nitrate d'argent. Le front de pénétration des ions chlorures peut ainsi être rapidement visualisé, et mesuré. Le coefficient de diffusion est alors calculé [24].

Tableau 15: Coefficient de diffusion apparent sous champ de migration (XP P 18-462)

Ductal®	D _{appmig}
NaW3-FO	0.28 · 10 ⁻¹² m ² (0.11 0.38 · 10 ⁻¹²)

5.10 Résistance à la pénétration des ions chlorures

Mesures complémentaires selon ASTM C 1202 (Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration)

Des mesures de courant ont été effectuées selon la norme ASTM C 1202. Cet essai permet de donner une indication sur la capacité des matériaux cimentaires à résister à la pénétration des ions chlorures. Il est fréquemment utilisé en Amérique du Nord.

Cette méthode consiste à enregistrer la quantité de courant électrique ayant traversé un échantillon de 50 mm d'épaisseur et de 95 mm de diamètre (3.75 inches) pendant une période de 6 heures. Une différence de potentiel de 60 Volt entre les extrémités de l'échantillon cylindrique, lequel est immergé, d'un côté dans une solution de NaCl (3%) et de l'autre dans une solution de NaOH (0.3N). La charge totale de coulombs est ensuite reliée à la résistance de l'échantillon à la pénétration des chlorures.

Tableau 6 : Courant mesuré selon ASTM C1202 [31]

Ductal®	Courant (C)
NaW3-FO	704 (641-767)

5.11 Durabilité - résistance au gel-dégel et à l'écaillage

Les essais réalisés sont :

- la résistance aux cycles de gel/dégel en conditions sévères avec une forte saturation en eau des bétons (NF P 18-424) ;
- la résistance à l'écaillage, c'est-à-dire le comportement de la peau du béton soumis aux cycles de gel/dégel en présence de sels de déverglaçage (XP P 18-420).

Les éprouvettes de NaW3-FO non traitées thermiquement ont été fabriquées au LCR. Les corps d'épreuve ont été testés après une maturation de 28 jours à 20°C, 100%HR par le laboratoire EGIS accrédité COFRAC pour les essais demandés [14] et [15].

Résistance aux cycles de gel/dégel (NF P 18-424)

Les corps d'épreuve sont des prismes 10cmx10cmx40cm. Après 28 jours de conservation à 20°C, 100%HR, les échantillons ont subi 300 cycles de gel / dégel dans de l'eau (amplitude : -18°C / +9°C, vitesse de refroidissement : 6°C/h, 4 cycles par jour).

Les critères de performance sont basés sur l'évolution du gonflement ($dl/l < 500\mu\text{m/m}$) et du rapport des fréquences propres ($F/F_0 > 60\%$) après 300 cycles [14].

Résultats à l'issue de 300 cycles

- la valeur médiane du rapport des fréquences propres est supérieure ou égale à 100%,
- la valeur médiane de l'allongement relatif est de 65 $\mu\text{m/m}$.

Résistance à l'écaillage (XP P 18-420)

Les corps d'épreuve sont des cubes 15cmx15cmx15cm. Après une période durcissement précisée dans la norme, les cubes sont sciés en deux et préparés pour recueillir à leur surface un volume de saumure. Les échantillons subissent ensuite des cycles de gel/dégel (amplitude : -20°C / +20°C, vitesse de refroidissement : 4°C/h, vitesse de refroidissement : 8°C/h, 1 cycle par jour).

Les critères de performance sont basés sur l'évolution la masse de béton écaillé ; la valeur médiane doit rester inférieure ou égale à 600 g/m² à l'issue de 56 cycles, pour une étude en laboratoire (Ref Guide LCPC 2003 [21]).

Résultats à l'issue de 56 cycles

la valeur médiane de la masse de particules écaillées est de 9 g/m²; cette formule présente une excellente résistance à l'écaillage.

5.12 Durabilité –carbonatation en conditions naturelles

Des essais de carbonatation en conditions naturelles en laboratoire ont été réalisés au LCR [16] sur des éprouvettes de NaW3-FO.

Un premier lot d'éprouvettes a été conservée 7 jours et un second lot 28 jours à 20°C et 100% HR, puis exposées dans un laboratoire à 20°C et 65% HR. A différentes échéances (28 ; 90 ; 140 et 365 jours), les éprouvettes sont fracturées et la profondeur de carbonatation est mesurée par aspersion de phénolphthaléine.

Les résultats sont présentés dans le tableau 17.

Tableau 17 : Valeurs moyenne de profondeur de carbonatation pour les 2 formules de NaW3 avec fibres

Ductal®	Durée conservation en cure humide 20°C/100%HR	Profondeur de carbonatation
NaW3-FO	7 jours	0 mm (après 140 jours exposition)
	28 jours	0 mm (après 140 jours exposition)

5.13 Durabilité –carbonatation en conditions accélérées

Des essais de carbonatation en conditions accélérées en laboratoire ont été réalisés au LCR [17] sur des éprouvettes de NaW3-FO.

Un premier lot d'éprouvettes a été conservée 28 jours à 20°C et 100% HR, puis conditionnée soit pendant 14 jours par séchage à 45°C soit 14 jours par séchage à 20°C/55%HR. Suite à ce conditionnement, les éprouvettes sont exposées dans un caisson à atmosphère enrichi en CO₂ (20°C ; 55% HR et 10% CO₂). A différentes échéances, les éprouvettes sont fracturées et la profondeur de carbonatation est mesurée par aspersion de phénolphthaléine.

Les résultats sont présentés dans le tableau 18.

Tableau 18 : Valeurs moyenne de profondeur de carbonatation pour les 2 formules de NaW3 avec fibres

Ductal®	Durée conservation en cure humide 20°C/100%HR	Profondeur de carbonatation
NaW3-FO	28 jours cure humide puis 2 semaines de séchage à 45°C	0 mm (après 112 jours exposition)
	28 jours cure humide puis 2 semaines de séchage à 20°C/55%HR	0 mm (après 112 jours exposition)

5.14 Durabilité – effet des hautes températures (80 °C)

Des essais de flexion 4 points ont été réalisés au LCR [29] sur des éprouvettes de NaW3-FO ayant subies une période d'étuvage à 80°C.

Des plaques 450mm x 100mm x 20 mm ont été conservées à 20°C, 100%hr pendant 28 jours, puis mises dans une enceinte climatique à 80°C sèche. Elles ont été testées à diverses échéances à 80°C (2, 7, 28, 56 et 130 jours) [29].

Tableau 19 : Résultats des essais de flexion 4 points sur éprouvettes 450x100x20 mm conservées à 80°C sec après 28 jours de maturation à 20°C 100% Hr.

Échéances	28J 20°C 100% Hr (8 épr.)	+ 2J 80°C sec (4 épr.)	+ 7J 80°C sec (4 épr.)	+ 28J 80°C sec (4 épr.)	+ 56J 80°C sec (8 épr.)	+ 130J 80°C sec (4 épr.)
Déformation LDP* (mm/m)	2,9 10⁻⁴ (2,5 à 3.5.10 ⁻⁴)	2,1 10⁻⁴ (1,9 à 2,23 10 ⁻⁴)	2,6 10⁻⁴ (2,36 à 2,86 10 ⁻⁴)	3,5 10⁻⁴ (3,28 à 3,89 10 ⁻⁴)	4,0 10⁻⁴ (3,81 à 4,26 10 ⁻⁴)	4,0 10⁻⁴ (3,9 à 4,1 10 ⁻⁴)
Contrainte LDP* (MPa)	13,7 (12,2 à 16,1)	8,7 (7,3 à 10,3)	10,8 (9,0 à 12,4)	16,6 (14,8 à 18,6)	19,4 (17,2 à 20,6)	19,3 (17,9 à 20,8)
Déformation rupture (mm/m)	<i>nc</i>	<i>nc</i>	<i>nc</i>	3,5 10⁻⁴ (3,28 à 3,89 10 ⁻⁴)	4,0 10⁻⁴ (3,81 à 4,26 10 ⁻⁴)	4,0 10⁻⁴ (3,9 à 4,1 10 ⁻⁴)
Contrainte rupture (MPa)	14,7 (13,4 à 16,1)	9,2 (7,3 à 12,8)	11,2 (9,0 à 13,6)	16,6 (14,8 à 18,6)	19,4 (17,2 à 20,6)	19,3 (17,9 à 20,8)
E (MPa)	47 500 (45 100 à 50 700)	44 600 (42 000 à 47 800)	44 800 (41 300 à 48 700)	47 100 (45 000 à 49 900)	48 100 (44 100 à 51 400)	48 700 (44 700 à 52 400)

* LDP = Limite de Proportionnalité ou point à partir duquel la courbe n'est plus linéaire.

Nc signifie que la valeur n'a pas pu être calculée.

5.15 Réaction au feu

Les essais de réaction au feu ont été réalisés par le CSTB] sur des éprouvettes de Ductal®-FO ayant subi un traitement thermique. Le classement valable pour les épaisseurs comprises entre 10 et 100 mm est A2-s1,d0.

5.16 Résistance au feu

Des essais de résistance au feu ont été effectués 3 types d'éléments en Ductal® B3-FO : panneau, dalle et colonne. Le béton a subi un traitement thermique. La sollicitation thermique appliquée était conforme à la norme ISO 834.

Comportement au feu sur panneau

Des essais de résistance au feu ont été effectués sur un panneau vertical en Ductal® B3-FO de 2,4 m x 2 m x 2 cm d'épaisseur 25]. Quatre panneaux isolants de 50 et 75 mm d'épaisseur ont été collés sur la face non exposée.

L'écaillage du panneau a été observé entre la 13ème et la 27ème minute.

L'essai a été arrêté à 132 minutes.

Le panneau est resté étanche aux flammes et aux gaz chauds ou inflammables durant la durée de l'essai. Le résultat est donc de 132 minutes.

Les résultats d'isolation thermique sont compris en fonction des zones entre 55 et 112 minutes.

Après essai, les observations suivantes ont été réalisées :

Face exposée :

- le panneau est bombé vers le feu,
- la surface du panneau est écaillée et craquelée,
- importante érosion au centre du panneau,
- fissurations verticales et horizontales importantes.

Face non exposée

- élément bombé vers le feu, notamment au niveau de la zone 3.
- les nappes non exposées des zones 1 et 2 sont parsemées de taches brunâtres et noirâtres, notamment en zone 1.

- les nappes non exposées des zones 3 et 4 sont entièrement brunies avec des tâches noirâtres qui sont beaucoup plus importantes en nombre et prononcées en zone 4.

Comportement au feu sur dalle

Des essais de résistance au feu ont été effectués sur une dalle en Ductal® B3-FO de 400 mm x 300 mm x 25 mm 26].

Une charge de 42 kg est appliquée transversalement à mi longueur des dalles.

Les observations principales réalisées au cours de l'essai ont été les suivantes :

- bruits et craquements audibles au cours des premières minutes,
- une fissure est observée au droit de la charge appliquée à 8 minutes,
- dégagement d'une odeur très forte et irritante à 8 minutes,
- fin de l'isolation thermique (température supérieure à 140°C sur face non exposée) à 13 minutes,
- fin d'étanchéité aux gaz inflammables à 44 minutes.

La flèche maximale atteinte est de 4 mm après 30 minutes. Il n'y a alors pas d'évolution notable jusqu'à la fin de l'essai, la plaque continuant de supporter la charge.

Après essai, les observations suivantes ont été réalisées :

Face exposée :

- surface écaillée et friable au toucher sur 5 à 6 mm de profondeur.

Face non exposée

- surface brunie et craquelée.

Essai au feu sur colonnes

Des essais de résistance au feu ont été effectués sur 2 colonnes en Ductal® B3-FO de dimension 20 cm x 20 cm x 70 cm et 30 cm x 30 cm x 90 cm ont été réalisés 26].

Elles ont été placées dans un four et soumises au feu sur ses 4 faces dans l'objectif de déterminer la perte de masse et l'échauffement intérieur de ce corps d'épreuve.

Entre 9 minutes et 1h00, les observations principales réalisées sont :

- la chute de morceaux sous forme d'écaillés,
- des projections.

Celles-ci conduisent à la ruine totale et la chute des colonnes.

6. CHANTIERS DE REFERENCE

- Piscine de Périgueux, 2013
- Bâtiment industriel à Pordenone (Italie), 2013
- Crèche Gustave Jouffroy, Paris, 2013
- Rénovation de l'Eglise de Comines, 2014
- Logements étudiants Porte de Vanves, Paris, 2014
- Résidence de tourisme Nakara, Cap d'Agde, 2015
- Extension Hotel Sofitel, Rabat (Maroc), 2015
- UpperHills Project, Shenzhen (Chine), 2015
- GasHolder Triplets, Londres (UK), 2015
- CNE Fédération Française de Tennis, Paris, 2016
- Parking REX Beaujon, Bordeaux, 2016

- Siège Darver, Castries, 2016
 - Rénovation IGH Saint-Blaise, Paris, 2016
 - Rénovation immeuble de logements rue de la Huchette, Paris, 2016
 - Construction logements collectifs rue du Capitaine Marchal, Paris, 2016
 - Construction et rénovation de logements Le Chaperon Vert, Gentilly, 2016
 - Rénovation CHU, Brest, 2018
 - Salle événementielle de Muret, Toulouse, 2019
 - ESTP Cachan, 2019
 - Shopping Mall, Oran, Algérie, 2019
 - Résidence les eaux vives, Genève, Suisse, 2018
 - Institut de Formation des Professionnels de Santé, Grenoble, 2019
 - Les collines de l'Arche, La Défense, Paris, 2020
- La Tour Cèdre, La Défense, Paris, 2020

7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ETPM Pg4 Durabilité AFGC_Design_Guidelines Janvier 2002
- [2] Presses LPC Les spécificités des bétons à hautes performances : Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité évaluées en conditions de laboratoire ou en conditions naturelles, Véronique Baroghel-Bouny, Septembre 2004, 76 pages.
- [3] ETPM §2.3 QCM Manual Ductal 4 Mars 2020
- [4] ETPM §5.2 tab 7 LCR2012-Ductal@-0003 -PV d'essais LCR - compression - 19 Novembre 2012
- [5] ETPM §5.3 fig1 tab8 LCR2012-Ductal@-0016 -PV d'essais LCR - flexion 7x7x28 -6 Février 2013
- [6] ETPM §5.3 fig2 LCR2012-Ductal@-0001 -PV d'essais LCR - flexion 450x100x20 -19 Novembre2012
- [7] ETPM §5.5 tab11 LCR2012-Ductal@-0018- PV d'essais - essais abrasion - 6 Fevrier
- [8] ETPM §5.6 tab12 LCR2012-Ductal@-0010- PV d'essais - porosite eau - 20 decembre 2012
- [9] ETPM §5.8 tab14 Rapport perméa BFUP (ECL) Ecole Centrale de Lille. Rapport d'essais de perméabilité et de porosité sur béton Décembre 2012
- [10] ETPM §5.7 tab13 LCR2012-Ductal@-0011- PV d'essais - porosimetrie mercure - 20 decembre 2012
- [11] ETPM §5.1 tab6 LCR2012-Ductal@-002-PV d'essais LCR - retrait - 19 Novembre 2012
- [12] LCR. Rapport d'essais n° LCR2012-Ductal@-0012. 20 décembre 2012
- [13] LCR. Rapport d'essais n° LCR2012-Ductal@-0013. 20 décembre 2012
- [14] ETPM §5.11 PV d'essais EGIS 2012-2000 01 Octobre 2012 (Gel)
- [15] ETPM §5.11 PV d'essais EGIS 2012-2375 01 Octobre 2012 (Ecaillage)
- [16] ETPM §5.12 tab17-LCR2012-Ductal@-00014 -PV d'essais LCR - Carbo Naturelle - 20 Decembre 2012
- [17] ETPM §5.13 tab18-LCR2012-Ductal@-00015-PV d'essais LCR - Carbo Acceleree - 20 Decembre 2012
- [18] ETPM §5.8 tab14 LCR2012-Ductal@-00016 -PV d'essais LCR - Permeabilité O2 - 20 decembre 2012
- [19] ETPM §5.3 Essais de flexion CSTB EEM_12_26039885.
- [20] ETPM §5.15 CSTB Reaction au feu RC150218_26072016
- [21] Guide technique LCPC 2003 « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel »
- [22] ETPM §5.4 tab10 LCR2012-Ductal@-0017 -PV d'essais LCR - flexion 4x4x16 -6 Février 2013
- [23] LCR. Rapport d'essais n° LCR2012-Ductal@-0016. 31 janvier 2013
- [24] ETPM §5.9 tab15 LCR2013-Ductal@-00017 -PV d'essais LCR - Dapp mig - 6 fevrier 2013
- [25] ETPM §5.16 CSTB Resistance au feu sur panneau CSTB RS0022_LAFARGE Ductal FO Archi 15 fevrier 2000
- [26] ETPM §5.16 CSTB Resistance au feu sur dalles et sur colonnes CSTB RS0023_LAFARGE Ductal FO 17 mars 2000
- [27] ETPM §5.3 tab9 C2 LCR2013-Ductal@-0007- PV d'essais - flexion 450x140x20 - 8 Mars 2013
- [28] ETPM §5.3 tab9 C1 LCR2013-Ductal@-0008- PV d'essais - flexion 450x140x25 - 8 Mars 2013
- [29] ETPM §5.14 tab 19 LCR2012-Ductal@-0009 - flexion 450x100x20 - 80°C - 11 Mars 2013
- [31] Baroghel-Bouny V. « Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons. Méthodes, Analyse, Interprétation », Publication LCPC, Paris, 1994, 468 pages.
- [31] ETPM §5.10 tab16 LCR2013-Ductal@-00016 -PV d'essais LCR - ASTM C1202 - 31 Janvier 2013