

Béton fibré à Ultra Hautes
Performances (BFUP)

Ductal®-FO

Titulaire : **Lafarge Ciments**
5 Boulevard Louis Loucheur
92 214 Saint Cloud Cedex

Cette Evaluation n'a pas valeur d'Avis Technique au sens de l'arrêté modifié du 2 Décembre 1969 ; elle ne vise en effet pas un produit, composant ou procédé ayant une destination d'emploi définie dans la construction.

Elle vise à faciliter l'instruction ultérieure d'Avis Techniques pour des applications relatives à des emplois définis.

Toute utilisation de ce document non rendu public par la Commission, relève de la seule responsabilité du titulaire et de ceux à qui il le communique.

COMMISSION CHARGÉE DE FORMULER LES AVIS TECHNIQUES

GROUPES SPECIALISES N° 16

Produits et procédés spéciaux pour la maçonnerie

SEANCES du 1er avril 2009

Avertissement

Ce document est destiné à faciliter l'instruction d'Avis Techniques relatifs à l'aptitude à l'emploi de produits, composants ou procédés utilisant le matériau visé par la présente évaluation, dans des emplois susceptibles d'être évalués dans le cadre de cette procédure telle que définie dans l'arrête du 2 décembre 1969 modifié.

Le Groupe Spécialisé n° 16 "Produits et procédés spéciaux pour la maçonnerie" de la Commission chargée de formuler les Avis Techniques a examiné, le 1^{er} avril 2009, le Béton Fibré à Ultra Hautes Performances (BFUP) renforcé par des fibres organiques Ductal®-FO présenté par la Société Lafarge Ciments.

Cette évaluation annule et remplace celle en date du 27 septembre 2005.

Il a proposé sur ce matériau l'Evaluation Technique ci-après.

1 DEFINITION SUCCINCTE

Le Ductal®-FO est un Béton Fibré à Ultra Hautes Performances (BFUP). Ce béton se caractérise par une résistance à la compression supérieure à 120 MPa, un mode de rupture ductile sous une sollicitation en traction et une porosité très faible. Les principes de l'obtention de ces performances reposent principalement sur une teneur en liant élevée, un rapport eau/ciment très faible ($E/C \leq 0,26$), l'emploi de fibres d'Alcool Polyvinylique, un choix très étudié des matériaux et une granulométrie optimisée.

La présente Evaluation Technique porte sur 4 formules de Ductal®-FO :

- le Ductal®-FO Premix G2 (gris) (anciennement BS 1000) et le Ductal®-FO Premix B2 (blanc) (anciennement AB 1000) .
- le Ductal®-FO Premix G3 (gris) et le Ductal®-FO Premix B3 (blanc).

Après coulage, ces 4 bétons peuvent subir un traitement thermique ou être conservés en condition ambiante. L'évaluation technique porte donc sur les propriétés du matériau obtenues par ces 2 modes de fabrication.

2 EVALUATION TECHNIQUE

Les propriétés du béton Ductal®-FO présentées ci-après résultent principalement de l'analyse des résultats d'essais réalisés par le CSTB, le LCPC et le CNR présentés au paragraphe 5 du Dossier Technique.

Variations dimensionnelles

La comparaison des essais réalisés sur des éprouvettes de Ductal®-FO non traités thermiquement montre que les variations dimensionnelles déterminées sur les éprouvettes de dimension 325 mm x 50 mm x 15 mm (représentatives des applications en panneaux de faible épaisseur) sont supérieures à celles déterminées sur les éprouvettes 40 mm x 40 mm x 160 mm.

Les variations dimensionnelles déterminées sur les éprouvettes 325 mm x 50 mm x 15 mm conduisent aux résultats suivants :

Type de Ductal®-FO	Ductal®-FO Premix B2	Ductal®-FO Premix G2	Ductal®-FO Premix B3	Ductal®-FO Premix G3
Retrait de séchage	0,62 mm/m	0,47 mm/m	0,26 mm/m	0,15 mm/m
Retrait endogène	0,32 mm/m	0,19 mm/m	0,21 mm/m	0,13 mm/m
Variations dimensionnelles entre états conventionnels extrêmes	0,37 mm/m	0,43 mm/m	0,24 mm/m	0,25 mm/m

Les valeurs de retrait de séchage et de variations dimensionnelles entre états conventionnels extrêmes sont comparables à celles des bétons ordinaires pour G2/B2 et G3/B3. Elles sont inférieures aux valeurs typiquement déterminées sur les mortiers et les composites ciments verre.

Les valeurs de retraits endogènes sont supérieures à celles des bétons ordinaires. Ceci est cohérent avec les résultats de la littérature qui montrent que le retrait endogène augmente lorsque le rapport eau/liant diminue.

Le traitement thermique du béton Ductal®-FO réduit de façon très significative le retrait de séchage. Le facteur de réduction est compris entre 5 et 10.

Résistance à la compression

Les résistances à la compression déterminées sur des éprouvettes de Ductal®-FO non traités thermiquement sont données dans le Tableau 4. Les valeurs sont comprises entre 115 et 150 MPa. La Figure 3 présente l'évolution de la résistance en fonction de l'âge.

Les résultats de porosité présentés plus loin montrent que le traitement thermique diminue de façon significative la porosité totale du matériau. Les résistances en compression des bétons Ductal®-FO traités thermiquement sont donc considérées au moins égales aux valeurs du Tableau 4.

Comportement en flexion

Des essais de flexion ont été réalisés sur des éprouvettes de Ductal®-FO non traités thermiquement. Un exemple d'allure des courbes charge-flèche est donné dans la Figure 4.

Le matériau présente une première phase élastique avec un pic de contrainte. Les valeurs de contrainte et de déformation déterminées au pic (LDP : Limite de Proportionnalité) et le module d'élasticité sont données dans le Tableau 5. Les résistances déterminées sont comprises entre 13 et 16 MPa. Le module d'élasticité est compris entre 33 000 et 40 000 MPa.

Au-delà du pic, le matériau présente un comportement ductile. La charge se maintient entre 30 et 100 % de la valeur au pic pour des valeurs de déformations largement supérieures à la valeur à LDP.

Les résultats de porosité montrent que le traitement thermique diminue de façon significative la porosité totale du matériau. Les caractéristiques en flexion des bétons Ductal®-FO traités thermiquement sont donc considérées au moins égales aux valeurs du Tableau 5.

Les performances en flexion du Ductal®-FO dépendent fortement du taux de fibres incorporé dans la matrice (Figure 5). Les propriétés décrites dans ce document concernent des échantillons contenant 4,3 % de fibres en volume.

Chargement de longue durée en flexion

Les résultats des essais de flexion de longue durée sont présentés dans le Tableau 6. Ces résultats montrent que le matériau rompt après plusieurs jours lorsqu'il est chargé à des contraintes supérieures ou égales à 75 % de la résistance du matériau. En revanche, l'éprouvette chargée à 56 % de la résistance du matériau ne présentait aucun désordre après 322 jours de tests.

Le domaine d'application du béton Ductal®-FO est à priori limité aux applications non structurales. En cas d'application structurale, l'utilisation d'armatures passives et/ou la réalisation d'essais seront nécessaires pour valider la résistance du matériau aux contraintes envisagées.

Comportement au choc sur grandes plaques

Les essais réalisés montrent un bon comportement au choc des grandes plaques réalisés en Ductal®-FO.

Les essais de 400 et 900 joules n'ont pas présenté de désordre.

Essai de choc (CNR)

L'indice I déterminé par les essais de choc effectués par le CNR est de 60. Il situe le matériau dans la catégorie des bétons à ultra haute tenue au choc.

Les catégories sont définies de la façon suivante :

- supérieur à 400 pour les matériaux médiocres,
- compris entre 250 et 400 pour les matériaux courants,
- inférieur à 150 pour les matériaux très résistants aux chocs,
- inférieur à 100 pour les matériaux à ultra haute tenue au choc.

Essais d'abrasion (CNR)

L'indice I déterminé par les essais d'abrasion effectués par le CNR est de 1,69. Il situe le matériau dans la catégorie des matériaux résistants à l'usure.

Les catégories sont définies de la façon suivante :

- compris entre 2 et 5 pour les matériaux courants,
- compris entre 1 et 2 pour les matériaux résistants à l'usure,
- inférieur à 1 pour les matériaux très résistants à l'usure,
- inférieur à 0,5 pour les matériaux anti-usure.

Essais d'usure

La résistance à l'usure a été déterminée par 2 autres essais :

- un essai fonctionnel de résistance à l'usure conformément à la norme NF EN 660-1 (essai de Stuttgart),
- un essai conventionnel de résistance à l'abrasion profonde conformément à la norme NF EN ISO 10545-6 (essai de Capon) généralement réalisés sur les revêtements en céramique.

La perte d'épaisseur moyenne déterminée par l'essai de Stuttgart est de 0.11 mm (Ductal®-FO.premix B2) et 0,08 mm (Ductal®-FO Premix G2). Ces valeurs permettent au matériau de prétendre à l'emploi dans des locaux à fort trafic (halls d'accueil par exemple).

Ce résultat est confirmé par l'essai de Capon. Les longueurs de l'empreinte mesurées sont de 24,5 mm (Ductal®-FO. Premix G2) et 29,0 mm (Ductal®-FO Premix B2). La performance du matériau est supérieure à celle des grès cérame. Elle permet l'emploi du matériau dans des locaux à fort trafic qui doivent répondre à la spécification suivante : valeur inférieure à 32 mm.

Essais d'arrachement d'inserts

La résistance moyenne à l'arrachement d'inserts, déterminée conformément à la norme NF B 10-514 sur 22 éprouvettes

Il est à noter que la norme NF B 10-514 est maintenant remplacée par la norme NF EN 13364.

Il est donc nécessaire de mettre à jour cette caractérisation en procédant à des nouveaux essais suivant la norme NF EN 13364.

Néanmoins, la valeur moyenne d'arrachement obtenue selon la norme NF B 10-514 est de 351 daN (essais effectués sur des bétons Ductal®-FO Premix G2). Ces résultats sont supérieurs à des résultats disponibles sur des pierres naturelles testées dans les mêmes conditions (ceux-ci s'échelonnent entre 140 daN et 210 daN pour des calcaires, des granits et des grés).

Durabilité

Le Tableau 1 est extrait du guide AFGC, conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages [1].

Les caractéristiques des bétons Ductal®-FO liées à la durabilité sont rappelées dans le Tableau 2 et comparées aux valeurs du Tableau 1. Cette comparaison permet de définir les classes de durabilité des bétons Ductal®-FO pour les différentes caractéristiques. Excepté, la valeur de porosité déterminée par intrusion de mercure sur le Ductal®-FO Premix G2 non traité thermiquement, toutes les valeurs conduisent à classer ce béton dans les classe élevée et très élevée.

Le traitement thermique diminue la porosité du matériau. La durabilité du Ductal® FO traité thermiquement est donc au moins égale à celle du Ductal® FO non traité thermiquement.

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

Durabilité potentielle →		Classes et valeurs limites				
		Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
G	Porosité accessible à l'eau (%) P_{eau}		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 °C pendant 14 jours en présence de gel de silice) (%) P_{Hg}	> 16	13 à 16	9 à 13	6 à 9	3 à 6
S	Résistivité électrique ($\Omega.m$) ρ	< 50	50 à 100	100 à 250	250 à 1000	> 1000
G	Coefficient de diffusion <i>effectif</i> des chlorures ($10^{-12} m^2.s^{-1}$) D_{eff}	> 8	2 à 8	1 à 2	0,1 à 1	< 0,1
G	Coefficient de diffusion <i>apparent</i> 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	Coefficient de diffusion <i>apparent</i> des chlorures (mesuré par essai de diffusion) ($10^{-12} m^2.s^{-1}$) $D_{app(dif)}$				< 5	
<i>Type de béton (indicatif et pour des formules simples)</i>			B25 à B40	B30 à B60	B55 à B80	> B80

Tableau 2 : Classes de durabilité des bétons Ductal®-FO déterminées à partir des valeurs limites définies dans le guide AFGC

Classes de durabilité	Premix B2 et Premix G2		Premix B3	Premix G3
	Avec traitement thermique	Sans traitement thermique	Sans traitement thermique	Sans traitement thermique
Porosité accessible à l'eau (%)	-	10,2 – 11,6 Durabilité élevée	12,4 Durabilité moyenne	11,3 Durabilité élevée
Porosité mesurée par intrusion de mercure (%)	6 Durabilité élevée/très élevée	8,3 – 9,5 Durabilité moyenne/élevée	-	-
Résistivité électrique (Ωm) ρ	-	1500 - 6500 Durabilité très élevée	5707 Durabilité très élevée	3586 Durabilité très élevée
Coefficient de diffusion des chlorures ($10^{-12} m^2.s^{-1}$)	<1 Durabilité très élevée	<1 Durabilité très élevée	-	-

Résistance au gel-dégel

Les essais de résistance au gel-dégel sur bétons Ductal®-FO traités thermiquement et non traités thermiquement montrent que les cycles gel-dégel ne diminuent pas les performances mécaniques en flexion du matériau.

Essais de vieillissement accéléré

Ductal®-FO non préfissuré

Des essais de vieillissement accéléré (cycles dits HRT) ont été réalisés sur des éprouvettes de Ductal®-FO traités thermiquement. Les éprouvettes ont été d'abord soumises à 100 cycles chaud-froid (3 heures à 80°C, 3 heures à -20°C) dans une enceinte ventilée, puis à 100 cycles d'immersion-séchage (6 heures dans l'eau à 15°C, 6 heures dans l'air à 60°C). Les résultats, donnés dans le Tableau 12, montrent que les cycles HRT ne diminuent pas les performances mécaniques en flexion du matériau.

Ductal®-FO préfissuré

Des essais de vieillissement accéléré ont été réalisés sur des éprouvettes de Ductal®-FO traités thermiquement et préalablement préfissurées (ouverture totale des fissures : 300 µm). Les éprouvettes ont été ensuite soumises à 2 types de vieillissement accéléré :

- cycles immersion séchage (18h dans l'eau à température ambiante, 6 h de séchage à 60 °C et 20 % HR) durant 90 jours,
- immersion dans l'eau à 60 °C durant 90 jours.

Les résultats, donnés dans le Tableau 13, montrent que ces 2 types de vieillissements accélérés ne diminuent pas les performances mécaniques. Au contraire, les valeurs de charges maximales sont plus élevées.

Réaction au feu

Le classement de la réaction au feu sur des éprouvettes de Ductal®-FO ayant subi un traitement thermique valable pour les épaisseurs comprises entre 10 et 60 mm est M0 (validité 5 ans à compter du 08/12/2005).

Résistance au feu

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

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

3 VISITE D'USINE DE FABRICATION

La fabrication de panneaux en Ductal®-FO a été observée dans l'usine d'éléments préfabriqués en béton Queguiner, à Landivisiau (29), le 27 août 2003.

De plus, la fabrication d'éprouvettes en Ductal®-FO a été observée au TCEA de Lafarge à l'Isle d'Abeau (38) le 8 février 2005 (pour les premix G2 et B2) et le 26 juillet 2007 (pour les premix B3 et G3).

4 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.

5 CONCLUSIONS

Appréciation globale

Le dossier technique présenté dans ce rapport, a été établi dans l'hypothèse de l'utilisation du béton Ductal®-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 cas d'application structurelle, l'utilisation d'armatures passives et/ou la réalisation d'essais complémentaires et spécifiques seront nécessaires pour valider la résistance du matériau aux contraintes envisagées.

De même, il est rappelé que les essais d'arrachement d'inserts ont été réalisés selon la norme NF B 10-514. Il est nécessaire de procéder à la réalisation de nouveaux essais suivant la nouvelle norme en vigueur NF EN 13364.

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

S'agissant d'une technique nouvelle, les données techniques relatives au matériau et à sa composition, ainsi que l'expertise acquise sur son utilisation sont susceptibles d'évoluer rapidement. La présente évaluation est donc délivrée par une durée limitée à trois ans, à l'issue de laquelle elle pourra faire l'objet d'un renouvellement à l'identique ou être modifiée en fonction de l'évolution du matériau.

Validité : jusqu'au 2 septembre 2012

Pour le Groupe Spécialisé n° 16

Le CSTB
Pour enregistrement

Ph. CUNIN

H. BERRIER

DOSSIER TECHNIQUE ETABLI PAR LE DEMANDEUR

1 INTRODUCTION

Le Ductal®-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 120 MPa, un mode de rupture ductile sous une sollicitation en traction et une porosité très faible. Les principes de l'obtention de ces performances reposent principalement sur une teneur en liant élevée, un rapport eau/ciment très faible ($E/C \leq 0,26$), l'emploi de fibres, un choix très étudié des matériaux et une granulométrie optimisée.

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

Les propriétés du Ductal® FO frais sont les suivantes :

- Etalement : Cône ASTM, 0 choc avec étalomètre humide (cm) : 190 ± 40 mm à 3 minutes après levée du cône,
- Masse volumique (kg/m^3) : 2300 ± 100 ,
- Temps d'utilisation : supérieur à 1 heure après la fabrication à température ambiante du béton.

Le matériau Ductal®-FO a fait l'objet de nombreuses publications en français et en anglais [4] et [5].

Le n° d'enregistrement de la marque Ductal® France est le N° 98/756.909 du 29 octobre 1998. Le brevet Ductal®-FO a été accordé le 17/11/2000.

Le n° de publication du brevet FO en France est le FR2778654.

Les fabrications sont réalisées dans des usines de préfabrication ou dans des unités de préfabrication foraine.

La fabrication du Ductal®-FO est réalisée par des entreprises de préfabrication détentrices de la sous-licence Ductal®, à partir de l'ensemble des matières premières fournies par Lafarge Ciments. Cet ensemble est appelé : « Full premix Ductal® ».

La présente Evaluation Technique porte sur 4 formules de Ductal®-FO : le Ductal®-FO Premix G2, le Ductal®-FO Premix B2, le Ductal®-FO G3 et le Ductal®-FO B3. Après coulage, ces 4 bétons peuvent subir un traitement thermique ou être conservé en condition ambiante.

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

2 FABRICATION DU "FULL PREMIX"

2.1 Matières premières

Les matières premières constituant les 4 "Full premix Ductal®" sont les suivantes.

Full premix Ductal®-FO Premix G2 (anciennement BS1000)

- premix G2,
- fluidifiant F2,
- accélérateur A2,
- fibres organiques.

Le premix G2 est un liant constitué de :

- Ciment gris CEM I 52,5N de Lafarge Ciments,
- Fumée de silice grise,
- Filler calcaire,
- Sable.

Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- couleur : grise,
- Densité apparente aérée : 1025 kg/m³.

Full premix Ductal®-FO Premix B2 (anciennement AB1000)

- premix B2,
- fluidifiant F2,
- accélérateur A2,
- fibres organiques.

Le premix B2 est un liant à base constitué de :

- Ciment blanc, Lafarge Ciments CEM I 52,5N,
- Fumée de silice blanche,
- Filler siliceux
- Sable.

Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- Couleur : blanche,
- Densité apparente aérée : 1060 kg/m³.

Full premix Ductal®-FO Premix B3

- premix B3,
- fluidifiant F2,
- accélérateur A2,
- fibres organiques.

Le premix B3 est un liant constitué de :

- Ciment gris CEM I 52,5N de Lafarge Ciments,
- Fumée de silice blanche,
- Filler calcaire,
- Sable.

Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- couleur : blanche,
- Densité apparente aérée : 1016 kg/m³.

Full premix Ductal®-FO Premix G3

- premix G3,
- fluidifiant F2,
- accélérateur A2,
- fibres organiques.

Le premix G3 est un liant constitué de :

- Ciment gris CEM I 52,5N de Lafarge Ciments,
- Fumée de silice grise,
- Filler calcaire,
- Sable.

Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- couleur : grise,
- Densité apparente aérée : 1072 kg/m³.

2.2 Fabrication

Les premix G2, B2, G3 et B3 sont fabriqués par mélange de plusieurs poudres constitutives : le sable, le ciment, les fillers et la fumée de silice, dans un mélangeur d'une capacité de 2.5 tonnes. Les tolérances des proportions sont de 3% sur chaque constituant. Le conditionnement à sec du premix se fait en seau, en sac, en fut, en big-bag ou en vrac. Ces éléments sont posés sur une palette qui est hussée et stockée dans une zone couverte à l'abri de l'humidité.

2.3 Contrôles

Le plan de contrôle sur le liant premix Ductal® est décrit dans la procédure interne [6].

Les contrôles sont réalisés sur :

- les matières premières,
- la rhéologie du béton Ductal® 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 ou sur éprouvettes cubiques de 10 cm de côté de béton Ductal® non fibré (appelé LC-matrice) conservées à 20°C pendant 48h puis à 90°C, 95%HR pendant 48h,

Les spécifications des contrôles sont données dans la procédure [6].

2.4 Conditionnement et livraison

Les liants premix G2, B2, G3 et B3 sont livrés par la Société Lafarge Ciments aux entreprises de préfabrication, soit en vrac, livrés par camion citerne (pour être stockés en silos), soit en big-bags, soit en seaux, ou en sacs. La marque Ductal® figure sur tous les bordereaux de livraison du liant.

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

Les fibres organiques fournies avec le premix par la Société Lafarge Ciments sont livrées en sacs.

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

3 FABRICATION DU BETON Ductal®-FO

3.1 Centres de fabrication

Introduction

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

L'unité de production prend connaissance du protocole de fabrication remis par le technicien de l'assistance technique Ductal® 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®. 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 Lafarge Ciments à l'unité de production lors de la délivrance de la sous-licence Ductal®.

Sous-licence Ductal®

La remise de la sous-licence Ductal® fait suite à une visite préalable permettant de s'assurer que le niveau d'équipement convient pour la fabrication du béton Ductal®-FO.

Un technicien de Lafarge Ciments établit la formule du béton Ductal®-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 Ductal® au vu des résultats de cette validation et des conclusions de la visite préalable.

Le Licencié s'engage alors notamment :

- à utiliser un atelier et un matériel de mise en œuvre adaptés
- à suivre la formation à la mise en œuvre du Ductal
- à respecter les formules de mélange et conseils de mise en œuvre Lafarge.

Assistance technique

La Société Lafarge Ciments assure la formation théorique et pratique de chaque entreprise utilisatrice du matériau Ductal®-FO.

La Société Lafarge Ciments 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 Ciments 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 Lafarge Ciments.

En cas d'interruption de la production du béton Ductal® 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®-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

Les bétons Ductal®-FO Premix G2 ; Ductal®-FO Premix B2 ; Ductal®-FO premix G3 et Ductal®-FO premix B3 sont préparés par mélange des constituants de l'un des 4 "Full premix Ductal®". L'eau doit être conforme à la norme XP P 18 303. 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 0,26,
- dosage en fluidifiant F2 compris entre 2 et 6 % de la masse de ciment,
- dosage en accélérateur A2 compris entre 0 et 2 % de la masse de ciment,
- dosage en fibres organiques : 4,3% volumique.

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

3.3 Fabrication

Malaxage

Le malaxeur servant au gâchage du béton Ductal® 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 pour la formule Ductal®-FO Premix G2 est le suivant :

- premix G2 : malaxage pendant un temps t1
- eau + ½ quantité de fluidifiant F2 : malaxage pendant un temps t2
- ½ quantité de fluidifiant F2 : malaxage pendant un temps t3
- fibres organiques : malaxage pendant un temps t4
- accélérateur A2 éventuel : malaxage pendant un temps t5

L'ordre d'incorporation pour la formule Ductal®-FO Premix B2 est le suivant :

- premix B2 : malaxage pendant un temps t6
- eau + ½ quantité de fluidifiant F2 : malaxage pendant un temps t7
- ½ quantité de fluidifiant F2 : malaxage pendant un temps t8
- fibres organiques : malaxage pendant un temps t9
- accélérateur A2 éventuel : malaxage pendant un temps t10

L'ordre d'incorporation pour la formule Ductal®-FO premix G3 est le suivant :

- premix G3 : malaxage pendant un temps t11
- eau + ½ quantité de fluidifiant F2 : malaxage pendant un temps t12
- ½ quantité de fluidifiant F2 : malaxage pendant un temps t13
- fibres organiques : malaxage pendant un temps t14
- accélérateur A2 éventuel : malaxage pendant un temps t15

L'ordre d'incorporation pour la formule Ductal®-FO premix B3 est le suivant :

- premix B3 : malaxage pendant un temps t16
- eau + ½ quantité de fluidifiant F2 : malaxage pendant un temps t17
- ½ quantité de fluidifiant F2 : malaxage pendant un temps t18
- fibres organiques : malaxage pendant un temps t19
- accélérateur A2 éventuel : malaxage pendant un temps t20

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 t20) sont fixés par l'assistant technique de Lafarge Ciments 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®-FO au cône ASTM compris entre 150 mm et 250 mm à 3

minutes après levée du cône. Ils figurent dans le protocole de fabrication remis à l'unité de production par la Société Lafarge Ciments.

Mise en place dans les moules

La mise en place du Ductal®-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®-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®-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.

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

Traitement thermique

48 heures après coulage, l'élément en Ductal®-FO pourra subir éventuellement un traitement thermique correspondant à une maturation accélérée. Le traitement thermique préconisé est la conservation de l'élément pendant 72 heures à une température de 60 °C et 95% HR.

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®-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®-FO est compris entre 150 mm et 250 mm.

Béton durci

Le protocole standard est le suivant. A chaque campagne de fabrication, l'unité de production fait prélever 3 éprouvettes 4 cm x 4 cm x 16 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 résultats doit être cohérente par rapport aux valeurs du tableau 5.

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®-FO sont les suivantes :

- panneaux et coques architectoniques,
- modénatures,
- mobilier urbain,
- éléments soumis à des environnements agressifs.

5 RESULTATS EXPERIMENTAUX

5.1 Variations dimensionnelles

Les essais de variations dimensionnelles et pondérales ont été réalisés au CSTB [7] et [23]. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes de 2 dimensions différentes :

- 325 mm x 50 mm x 15 mm (dimension normalisée pour les essais sur composites ciment verre représentative des applications en panneaux de faible épaisseur),
- 40 mm x 40 mm x 160 mm (dimension normalisée pour les essais sur mortier).

Ces éprouvettes n'ont pas subi de traitement thermique.

Essais de retrait

Les essais ont été réalisés à $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ et $(50 \pm 10)\% \text{HR}$.

Essais de retrait-gonflement

Après stabilisation, les éprouvettes de retrait ont été conditionnées à $(33 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Celles destinées aux essais de gonflement ont été conditionnées dans l'eau à $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$.

Un exemple de l'évolution des variations dimensionnelles mesurées sur les éprouvettes de Ductal®-FO Premix B2 de dimension 325 mm x 50 mm x 15 mm est présenté dans la Figure 1.

La synthèse des résultats est présentée dans le Tableau 3. La durée des essais est indiquée entre parenthèse. Il est à noter que l'âge correspondant au démarrage des essais est différent (1 jour pour B2, B3 et G3 et 2 j pour G2). Ceci explique en partie les valeurs inférieures déterminées sur les éprouvettes G2.

Figure 1 : évolution dans le temps du retrait et du retrait-gonflement des éprouvettes de Ductal®-FO Premix B1 ou B2 de dimensions 325 mm x 50 mm x 15 mm non traitées thermiquement

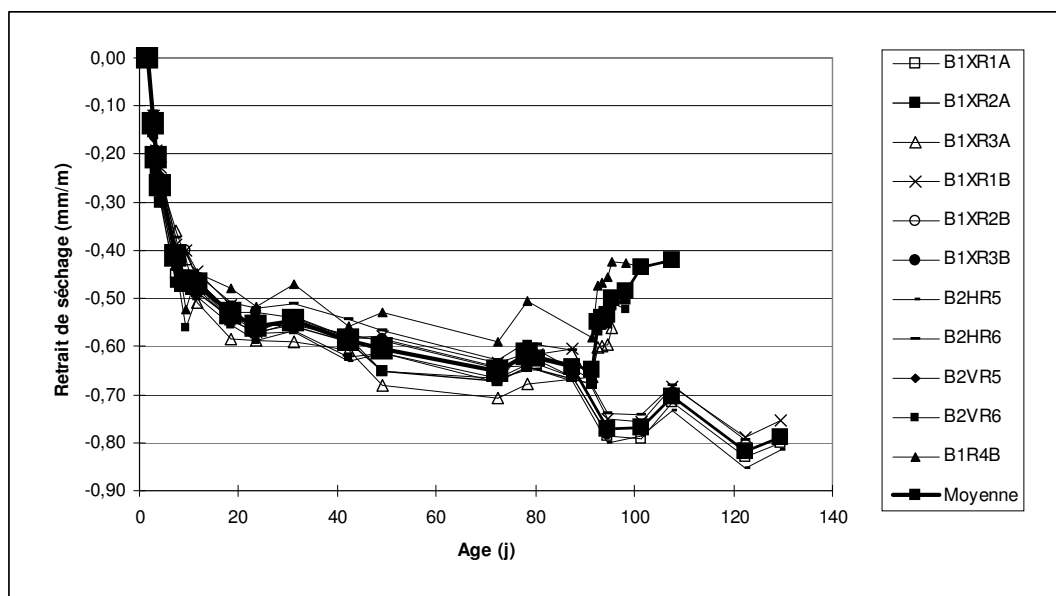


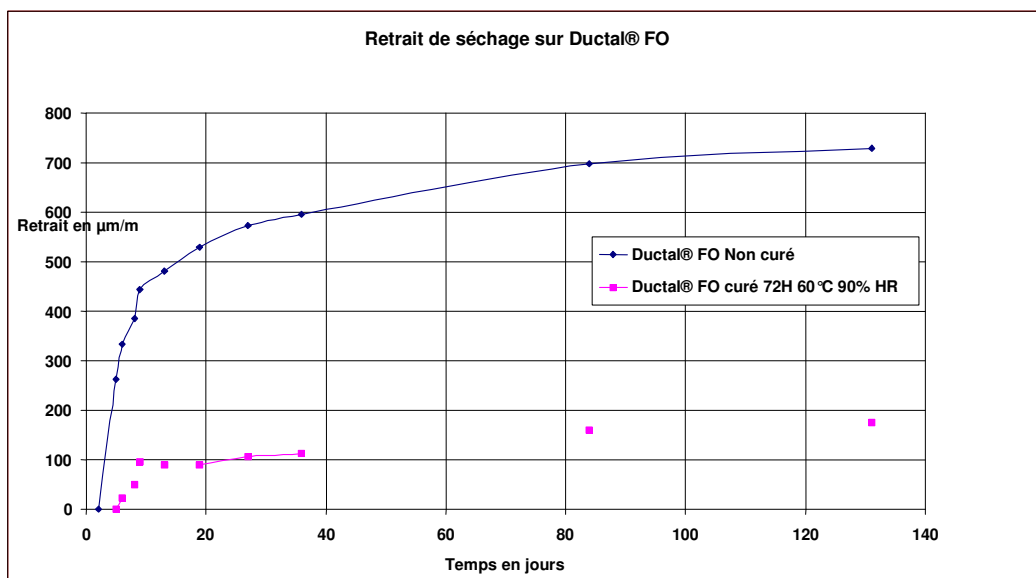
Tableau 3 : Tableau de synthèse des résultats des variations dimensionnelles des éprouvettes de Ductal® non traitées thermiquement

Type de Ductal®-FO	Premix B2 (âge début d'essai : 1 jour)		Premix G2 (âge début d'essai : 2 jours)		Premix B3 (âge début d'essai : 1 jour)	Premix G3 (âge début d'essai : 1 jour)
	325x50x15	40x40x160	325x50x15	40x40x160	325x50x15	325x50x15
Dimensions des éprouvettes (mm)	325x50x15	40x40x160	325x50x15	40x40x160	325x50x15	325x50x15
Retrait de séchage (mm/m)	0,62 (78 jours)	0,37 (123 jours)	0,47 (62 jours)	0,31 (107 jours)	0,26 (114 jours)	0,15 (114 jours)
Retrait endogène (mm/m)	0,32 (122 jours)	0,23 (123 jours)	0,19 (107 jours)	0,12 (107 jours)	0,21 (95 jours)	0,13 (95 jours)
Retrait à 33° C (mm/m)	0,79 (129 jours)	-	0,71 (114 jours)	-	0,42 (135 jours)	0,30 (135 jours)
Gonflement (mm/m)	0,42 (108 jours)	-	0,28 (107 jours)	-	0,18 (117 jours)	0,05 (117 jours)
Variations dimensionnelles entre états conventionnels extrêmes (mm/m)	0,37	-	0,43	-	0,24	0,25

5.2 Effet du traitement thermique sur le retrait de séchage

La Figure 2 présente l'influence de la cure thermique (72 h à 60°C, 90% HR), sur le retrait de séchage du Ductal®-FO.

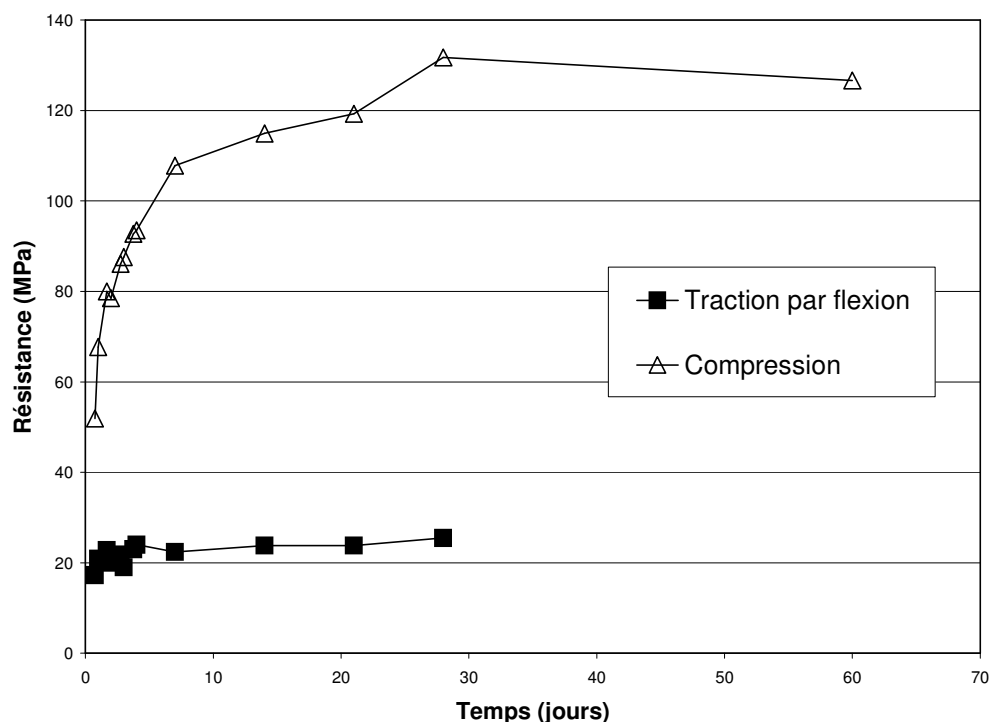
Figure 2 : influence du traitement thermique sur le retrait de séchage des éprouvettes de Ductal®



5.3 Cinétique de durcissement au jeune âge

La Figure 3 présente l'évolution avec l'âge de la résistance en compression déterminée sur Ductal®-FO Premix B2 sans traitement thermique.

Figure 3 : évolution avec l'âge de la résistance en compression déterminée sur Ductal®-FO Premix B2 sans traitement thermique



5.4 Résistance à la compression

Les essais de compression ont été réalisés au CSTB [8] et [23] sur des cylindres $\varnothing 7$ H 14 n'ayant pas subi de traitement thermique.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : résistances en compression (moyenne et valeurs minimum et maximum entre parenthèses) déterminées sur éprouvettes non traitées thermiquement

Type de Ductal®-FO	Ductal® FO- Premix B2	Ductal® FO – Premix G2	Ductal®-FO Premix B3	Ductal®-FO Premix G3
Résistance après 28 j dans l'eau (MPa)	151,0 (3 ep. : 142,0 – 158,0)	129,0 (3ep. : 125,5 – 132,0)	132,5 (4 ep. : 130,5 – 134,0)	134,0 (4 ep. : 132,5 – 135,5)
Résistance après 28 j dans l'air à 20 °C, 50 % HR (MPa)	-	-	124,0 (4 ep. : 121,5 – 125,5)	118,5 (4 ep. : 117,5 – 120,0)
Résistance après 90 j dans l'air à 20 °C, 50 % HR (MPa)	132,0 (6 ep. : 128,5 – 134,5)	116,5 (6 ep. : 114,5 – 117,5)	-	-

5.5 Comportement mécanique en flexion

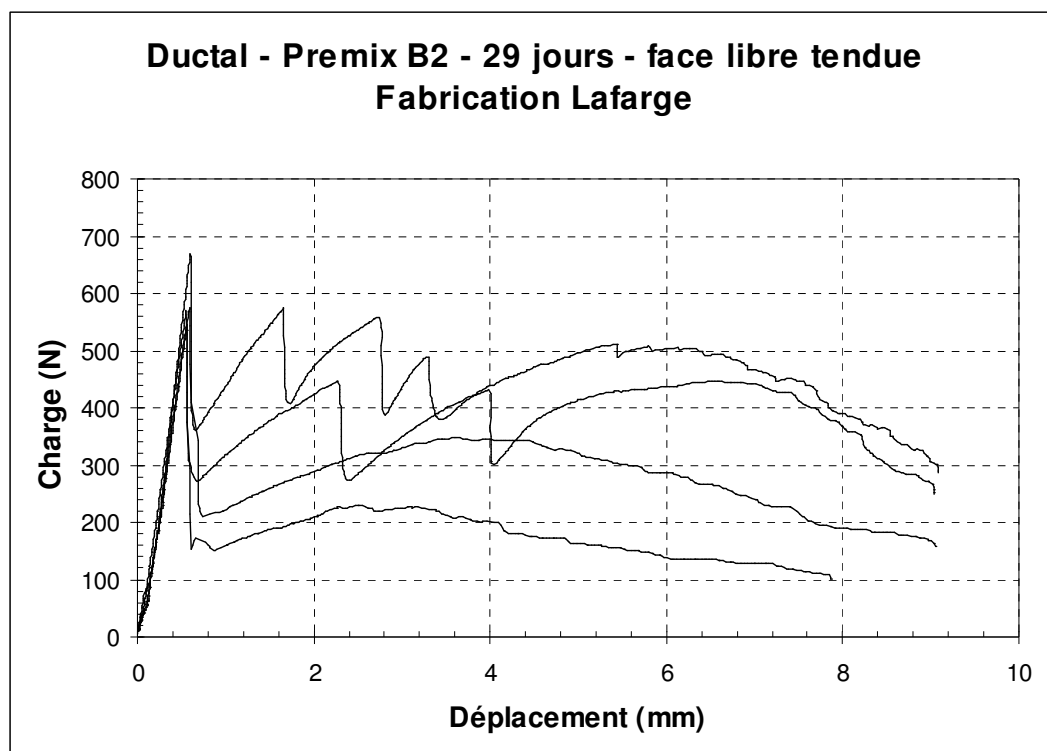
Les essais de flexion 4 points ont été réalisés par le CSTB [7] et [23] en s'inspirant des modalités décrites dans la norme européenne NF EN 1170-5. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes de 325 mm x 50 mm x 15 mm fabriquées en usine et dans le laboratoire de Lafarge Ciments (TCEA). Ces éprouvettes n'ont pas subi de traitement thermique. Les déformations et contraintes ont été calculées comme décrit dans la norme en considérant le matériau élastique, isotrope et homogène. Un exemple d'allure des courbes est donné dans la Figure 4. Les résultats sont donnés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Résultats des essais de flexion sur éprouvettes non traitées thermiquement

Type de Ductal®-FO	Ductal® FO – Premix B2		Ductal® FO - Premix G2		Ductal®-FO Premix B3	Ductal®-FO Premix G3
	Usine	TCEA	Usine	TCEA	TCEA	TCEA
Déformation LDP* (mm/m)	0,5	0,5	0,9	0,4	0,5	0,5
Contrainte LDP* (MPa)	15,2	16,0	13,2	13,3	13,4	14,5
Déformation rupture (mm/m)	0,5	0,5	1,2	0,4	0,5	0,6
Contrainte rupture (MPa)	15,2	16,0	13,3	13,3	14,5	14,8
E (MPa)	36 500	40 000	39 000	39 000	33 000	34 000

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

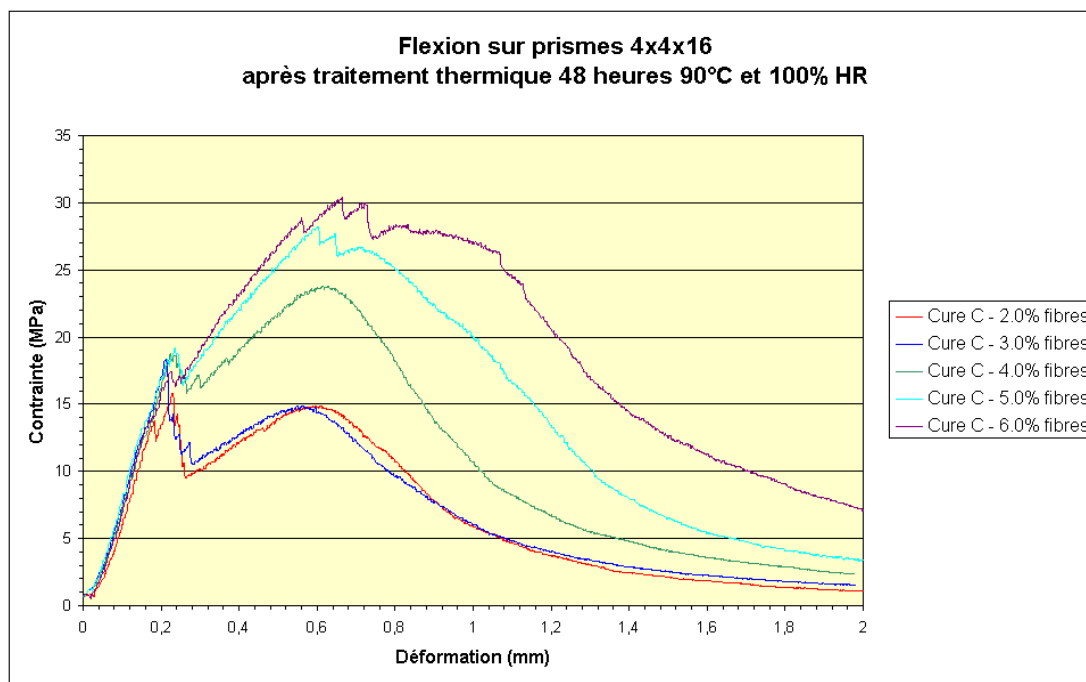
Figure 4 : exemple de courbe de flexion sur éprouvette de Ductal®-FO de 325 mm x 50 mm x 15 mm - Ductal®-FO Premix B2 non traité thermiquement



5.6 Influence du taux de fibres sur le comportement en flexion

Le dosage volumique en fibres organiques des formules Ductal®-FO Premix B2 et Ductal®-FO Premix G2 est fixé à $4,3 \pm 0,2$ %. Les performances en flexion du Ductal®-FO dépendent fortement du taux de fibres incorporé dans la matrice. La Figure 5 présente le comportement en flexion de différentes formulations de Ductal®-FO contenant entre 2 et 6 % en volume de fibres. Ces éprouvettes ont subi un traitement thermique.

Figure 5 : courbes de flexion de Ductal®-FO Premix B2 traité thermiquement en fonction du taux de fibres



5.7 Chargement de longue durée en flexion

Des essais de flexion sous charge constante ont été réalisés au CSTB [9] sur 4 éprouvettes prismatiques préfissurées de Ductal®-FO ayant subi un traitement thermique.

Les dimensions étaient les suivantes : épaisseur 4 cm x largeur 5 cm x longueur 90 cm.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 6 qui donne la durée des essais en fonction du rapport charge appliquée/Smax. Smax la charge maximale après le premier pic déterminé lors de l'essai réalisé pour préfissurer l'éprouvette. Les essais réalisés sur les éprouvettes chargées à 75 à 78 % ont été arrêtés du fait de la rupture des éprouvettes. L'essai réalisé sur l'éprouvette 99 173 chargée à 56 % a été arrêté après 322 jours d'essai sans rupture d'éprouvette.

Tableau 6 : Résultats des essais des essais de chargement de longue durée en flexion sur éprouvettes traitées thermiquement

N° d'éprouvette	Charge de longue durée (daN)	Rapport charge de longue durée/smax	Durée du chargement avant rupture (jours)
99170	77,6	75 %	96 (rupture)
99 171	77,6	77 %	6 (rupture)
99 172	64,8	78 %	123 (rupture)
99 173	54,6	56 %	322 (arrêt de l'essai)

5.8 Comportement au choc sur grandes plaques

Des essais de choc ont été réalisés au CSTB [10] sur une grande plaque de Ductal®-FO de 186 cm x 156 cm x 2 cm en partie courante, ayant subi un traitement thermiquement.

Trois essais de 400 joules et 3 essais de 900 joules ont été réalisés. Les résultats sont présentés dans le Tableau 7.

Tableau 7 : résultats des essais de choc sur une grande plaque sur éprouvettes traitées thermiquement

Energie appliquée (J)	N° d'essai	Emplacement du choc	Observations
400	1	Centre	Pas de désordre observé
	2	Angle	Pas de désordre observé
	3	Angle	Pas de désordre observé
900	4	Centre	Pas de désordre observé
	5	Angle	Pas de désordre observé
	6	Angle	Pas de désordre observé

5.9 Essais de choc (CNR)

Des essais de choc ont été effectués par le Laboratoire d'Hydraulique et d'Essais de Matériaux de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) sur des blocs en Ductal®-FO ayant subi un traitement thermique [11]. La dimension des éprouvettes testées était de 25 x 25 x 10 cm³.

Le test mis au point par la CNR a pour objet de reproduire les conditions de choc rencontrées dans les ouvrages hydrauliques. Il consiste à soumettre la surface d'un bloc à 2 700 chocs provoqués par la chute d'une boule métallique. Le volume en cm³ de l'empreinte laissée par les impacts est ensuite mesuré. Ce volume permet de déduire l'indice I, exprimé en cm³.

L'indice I déterminé est de **60**.

5.10 Essais d'abrasion (CNR)

Des essais d'abrasion ont été effectués par le Laboratoire d'Hydraulique et d'Essais de Matériaux de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) sur des blocs en Ductal®-FO ayant subi un traitement thermique [12]. La dimension des éprouvettes testées était de 10 x 10 x 40 cm³.

Le test d'abrasion mis au point par la CNR a pour objet de reproduire les conditions d'abrasion rencontrées dans les ouvrages hydrauliques. Le corps d'épreuve immergé dans un bassin est soumis à un jet d'eau chargée de sable sous pression. Deux autres corps d'épreuve de référence (plaques de verre épaisses) sont également testés dans les mêmes conditions. La résistance à l'usure par abrasion du matériau testé est donnée sous la forme d'un indice d'abrasion I ; I est le rapport du volume de l'empreinte mesurée sur le matériau, sur le volume moyen des empreintes mesurées sur les deux plaques de verre.

La valeur déterminée est : **1,69**.

5.11 Essais d'usure (indice U)

Des essais d'usure sur Ductal®-FO n'ayant pas subi de traitement thermique ont été réalisés par CSTB [13].

Résistance à l'usure – Essai de Stuttgart selon la norme NF EN 660-1

Le principe est de simuler les mouvements de rotation associés à l'effort de glissement provoqués par des chaussures. L'abrasif utilisé est un papier émeri. Cette norme s'applique normalement à des revêtements de sol en PVC.

Les pertes d'épaisseur moyenne mesurée sont :

- Ductal®-FO Premix B2 : de 0.11 mm,
- Ductal®-FO Premix G2 : de 0.08 mm,
-

Résistance à l'abrasion profonde – Essai de Capon selon la norme NF EN ISO 10545-6

Un disque rotatif en acier de diamètre 200 mm et d'épaisseur 10 mm frotte la surface de l'échantillon en présence d'un abrasif (poudre d'alumine). La longueur de l'empreinte est mesurée après 150 tours.

Les longueurs de l'empreinte mesurées sont :

- Ductal®-FO Premix G2 : de 24,5 mm,
- Ductal®-FO Premix B2 : de 29,0 mm,

5.12 Essais d'arrachement d'inserts

Des essais d'arrachement d'inserts métalliques dans des plaques de Ductal®-FO (premix G2) ayant subi un traitement thermique et d'épaisseur 33 mm épaisseurs ont été réalisés au CSTB [14]. Les essais ont été réalisés conformément à la norme NF B10-514. La moyenne des résultats obtenus sur 22 essais est de 351 daN. L'écart type est de 37 daN.

5.13 Durabilité – porosité à l'eau

Des essais de porosité à l'eau ont été réalisés par le CSTB [8] et au LCPC [24] sur des éprouvettes de Ductal®-FO non traités thermiquement. Les éprouvettes ont été placées dans un récipient et soumises à une dépression de 25 mbars durant 24 h. Toujours soumises à la dépression de 25 mbars, elles ont ensuite été recouvertes d'eau durant 24 heures supplémentaires. Les résultats sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8 : porosité à l'eau sur éprouvettes non traitées thermiquement

Porosité à l'eau (%)	Conservé dans l'eau	Conservé dans air
Ductal®-FO Premix B2	11,2	10,9
Ductal®-FO Premix G2	11,6	10,2
Ductal®-FO Premix B3	12,4	-
Ductal®-FO Premix G3	11,3	-

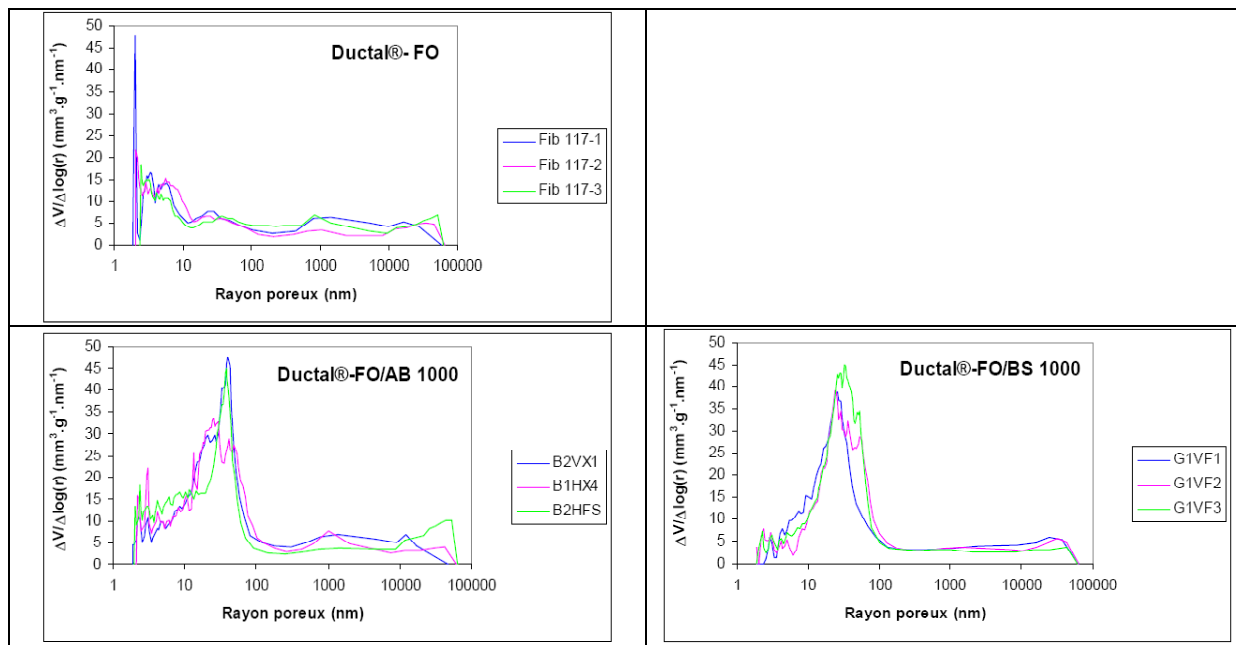
5.14 Durabilité - porosité par intrusion de mercure

Des essais de porosité par intrusion de mercure ont été réalisés par le LCPC [15]. Les résultats sont présentés dans le Tableau 9. Les courbes de porosimétrie sont présentées dans la Figure 6.

Tableau 9 : porosité totale par intrusion de mercure - moyenne sur 3 échantillons

	Porosité totale (%)
Ductal®-FO traité thermiquement	6,0
Ductal®-FO Premix B2non traité thermiquement	9,5
Ductal®-FO Premix G2non traité thermiquement	8,3

Figure 6 : courbes de porosité par intrusion de mercure, Ductal®-FO traité thermiquement (haut), Ductal®-FO Premix B2 non traité thermiquement (bas gauche) et Ductal®-FO Premix G2 non traité thermiquement (bas droite)



5.15 Durabilité – migration des chlorures

Des essais de migration des chlorures en régime non-stationnaire ont été réalisés au LCPC sur des éprouvettes de Ductal®-FO non traités thermiquement [16]. La tension appliquée a été de 60 Volts. Elle est de 20 Volts dans le cas des bétons courants. Malgré cela, les essais n'ont pas permis d'observer une migration des chlorures.

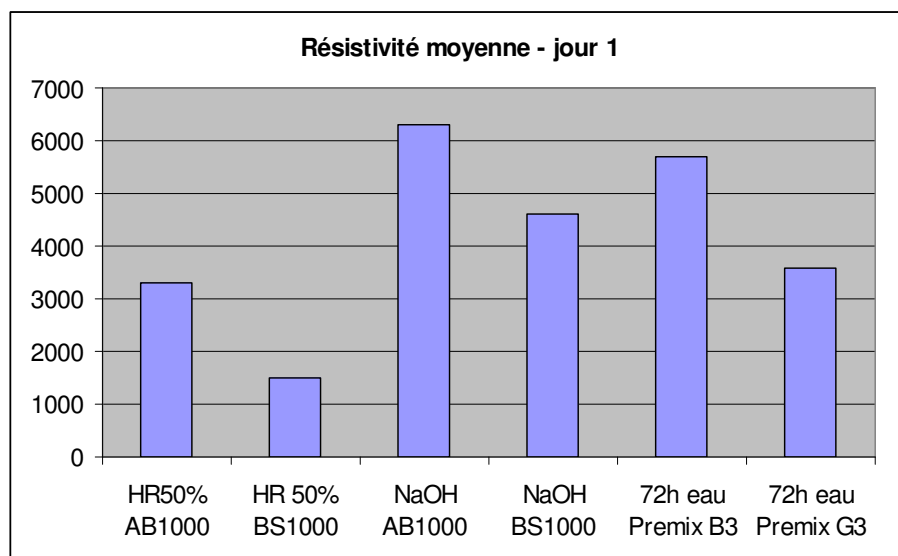
5.16 Durabilité - résistivité électrique du béton saturé

Des essais de résistivité électrique du béton saturé ont été réalisés au LCPC sur des éprouvettes de Ductal®-FO non traités thermiquement [16] et [24]. Les éprouvettes ont été soumises à 3 modes de conservations différents avant essai :

- 2 mois à l'air à 20 °C, 50 % HR,
- 3 mois dans une solution de soude ($[NaOH] = 4 \text{ g.L}^{-1}$),
- 3 mois en eau (20 ± 2) °C.

Les résultats sont présentés dans la Figure 7.

Figure 7 : valeurs moyennes de résistivité électrique mesurées à l'issue de la saturation (jour 1) pour les 2 formules de Ductal® non traitées thermiquement et les 3 modes de conservation



5.17 Durabilité - résistance au gel-dégel

Ductal®-FO non traités thermiquement

Des essais de gel-dégel ont été réalisés dans le cadre de la campagne réalisée au CSTB [7]. Les résultats de flexion sur les éprouvettes non vieilles ont été présentés dans un paragraphe précédent. Les éprouvettes de Ductal®-FO non traitées thermiquement ont été fabriquées au laboratoire de Lafarge Ciments (CTEO). Les éprouvettes de 325 mm x 50 mm x 15 mm ont été soumises à 100 cycles de gel-dégel (3h à 20 °C et 3 h à -20 °C). Les éprouvettes ont ensuite été soumises aux mêmes essais de flexion que décrits précédemment. Les résultats sont donnés dans le Tableau 10. La comparaison des résultats avec ceux présentés au Tableau 5 montre que l'application des cycles gel-dégel ne diminue pas les performances mécaniques en flexion du matériau.

Tableau 10 : Résultats des essais de résistance au gel-dégel sur Ductal®-FO non traité thermiquement

Type de Ductal®-FO	Premix B2	Premix G2
Déformation LDP (mm/m)	0,5	0,5
Contrainte LDP (MPa)	15,8	13,4
Déformation rupture (mm/m)	0,9	2,4
Contrainte rupture (MPa)	15,9	13,5
E (MPa)	42 000	39 500

Ductal®-FO traité thermiquement

Des essais de gel-dégel ont été réalisés au CSTB sur des éprouvettes de DUCTAL®-FO traité thermiquement [17]. Les éprouvettes soumises à 50 et 100 cycles de gel-dégel en s'inspirant de la norme ASTM 666-90 (2 h gel dans l'air à -18 °C, 2 h de montée en température, 2 h de dégel dans l'eau à 15 °C, 2 h de descente en température). Les résultats sont présentés dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Résultats des essais de résistance au gel-dégel sur Ductal®-FO traité thermiquement

	Résistance à la flexion (MPa)	Module d'élasticité (GPa)
Référence	14,1 ± 1,5	50,7 ± 0,7
50 cycles	11,7 ± 1,4	48,8 ± 0,5
100 cycles	14,7 ± 0,2	49,3 ± 0,7

5.18 Durabilité - Essais de vieillissement accéléré

Ductal®-FO non préfissuré

Des essais de vieillissement accéléré (cycles dits HRT) ont été réalisés au CSTB [17] sur des éprouvettes de Ductal®-FO traités thermiquement. Les éprouvettes ont été d'abord soumises à 100 cycles chaud-froid (3 heures à 80°C, 3 heures à -20°C) dans une enceinte ventilée, puis à 100 cycles d'immersion-séchage (6 heures dans l'eau à 15°C, 6 heures dans l'air à 60°C). Les résultats sont donnés dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Résultats des essais de flexion après vieillissement accéléré sur Ductal®-FO traité thermiquement

	Résistance à la flexion (MPa)	Module d'élasticité (GPa)
Référence	14,1 ± 1,5	50,7 ± 0,7
100 cycles chaud - froid	14,9 ± 2,7	49,9 ± 1,0
100 cycles chaud - froid + 50 cycles immersion séchage	14,4 ± 2,5	50,6 ± 1,1
100 cycles chaud - froid + 100 cycles immersion séchage	14,3 ± 2,2	50,4 ± 0,5

Ductal®-FO préfissuré

Des essais de vieillissement accéléré ont été réalisés au CSTB [18] sur des éprouvettes de Ductal®-FO traités thermiquement et préalablement préfissurées. La préfissuration a été réalisée par traction par flexion jusqu'à une ouverture totale des fissures de 300 µm. Les éprouvettes ont été ensuite soumises à 2 types de vieillissement accéléré :

- cycles immersion séchage (18h dans l'eau à température ambiante, 6 h de séchage à 60 °C et 20 % HR) durant 90 jours,
- immersion dans l'eau à 60 °C durant 90 jours.

Les éprouvettes ont ensuite été soumises à un essai de flexion. Les résultats de ces essais sont donnés dans le Tableau 13.

Tableau 13 : moyennes des résultats des essais de flexion après vieillissement accéléré sur Ductal®-FO traité thermiquement et préfissuré

Type de vieillissement accéléré	Charge maximale (daN)	Flèche correspondante (mm)
Référence	30,5	12,2
Eau à 60 °C	36,0	11 ,0
Immersion séchage	35,5	8,6

5.19 Réaction au feu

Les essais de réaction au feu ont été réalisés par le CSTB [20] sur des éprouvettes de Ductal®-FO ayant subi un traitement thermique. Le classement valable pour les épaisseurs comprises entre 10 et 40 mm est M0.

5.20 Résistance au feu

Des essais de résistance au feu ont été effectués 3 type d'éléments en Ductal®-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®-FO de 2,4 m x 2 m x 2 cm d'épaisseur [21]. 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 13^{ème} et la 27^{ème} 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®-FO de 400 mm x 300 mm x 25 mm [22].

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®-FO de dimension 20 cm x 20 cm x 70 cm et 30 cm x 30 cm x 90 cm ont été réalisés [22].

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

Panneaux et coques architectoniques de faibles épaisseurs

- Panneaux acoustiques de la gare TGV de Monaco
- Panneaux de vêtture Phoenix
- Panneaux de façade du siège de Rhodia (Aubervilliers)
- Rénovation de façade d'immeuble (Pantin)
- Sculpture de l'Arbre Martel (Boulogne)
- Panneaux d'habillage intérieur du Pavillon de l'Arsenal (Paris)
- Panneaux d'habillage intérieur du parking P0 d'Orly
- Panneaux de façade du centre bus de la RATP à Thiais
- Panneaux de façade de la crèche (rue de Belleville) à Paris
- Panneaux ajourés d'un bâtiment de logement à Paris (ZAC Masséna)
- Panneaux ajourés d'une maison de quartier à Sedan
- Panneaux ajourés du musée d'art brut de Villeneuve d'Ascq
- Panneaux d'habillage intérieur des salons VIP du Stade de France
- Dalles de sol d'une boutique Yves Saint-Laurent à Paris

Modénatures

- Lames pare-soleil à la gare TGV d'Arbois (Aix-en-Provence)
- Lames pare-soleil à l'Université de la Douai (Lyon)
- La Flower Tower, pots de fleurs et garde corps (Paris, Porte d'Asnières)
- Lames pare-soleil de l'hôtel de police de Nantes
- Lames pare-soleil de la maison du département de Vannes
- Casquettes pare-soleil d'un bâtiment de logement en Avignon
- Lames pare-soleil de l'ENSIACET à Toulouse

Mobilier urbain

- Bancs et jardinières de la place de la République (Rennes)

7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] AFGC. Bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP) - Recommandations provisoires (janvier 2002)
- [2] TAZAWA E. et MIYAZAWA S. Autogenous shrinkage caused by self desiccation in cementitious material. 9^{ème} congrès de chimie des ciments. New Delhi. 1992.
- [3] AFGC. Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages. Juillet 2004
- [4] VERNET C. Enseignements tirés des recherches sur les BFUP. Chapitre ACI de Paris. Journées d'étude « Durabilité des ouvrages en béton ». Synthèse de la présentation du 20.09.2002
- [5] BEHLOUL M., DURUKAL A., BATOZ J.F., CHANVILLARD G. Ductal® : Ultra High-Performance concrete technology with ductility. Rilem Symposium on fibre reinforced concrete, BEFIB2004, 20-22 Septembre 2004, Varenna, Italy, pp1281-1290.
- [6] LAFARGE CEMENTS Ductal®. Procédure LC-Ductal® 001-rev1 : Contrôle qualité des premix Ductal®-G2/G3 et Ductal®-B2/B3
- [7] CSTB. Rapport d'essais n° ES 553 02 0092 du 20 juillet 2004.
- [8] CSTB. Rapport d'essais n° ES 552 05 1041 du 1er juillet 2005.
- [9] CSTB. Rapport d'essais n° ER 553 97 017 Partie 4. 1 février 2001.
- [10] CSTB. Rapport d'essais n° ER 553 97 017 Partie 2. 21 décembre 1999.

- [11] Laboratoire d'Hydraulique et d'Essais de Matériaux de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR). PV d'essai de choc n° 12 066. 20/07/99.
- [12] Laboratoire d'Hydraulique et d'Essais de Matériaux de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR). PV d'essai d'abrasion n° 12 066. 20/07/99.
- [13] CSTB. Rapport d'essais n° RE 02-084. 24 juillet 2002.
- [14] CSTB. Rapport d'essais n° ER 553 97 017 Partie 3. 21 décembre 1999.
- [15] LCPC. Procès verbal d'essais n° 1F 53B040025. 26 mai 2004.
- [16] LCPC. Procès verbal d'essais n° 1F 53B05020. Août 2005.
- [17] CSTB. Rapport REACTIF, tâche 3. n° SM/00-98/PK/VF. Février 2000.
- [18] CSTB. Rapport d'essais n° ES 553 01 0522 du 22 octobre 2003.
- [19] CSTB. Rapport d'essais n° ER 553 97 017 Partie 4. 1er février 2001.
- [20] CSTB. Procès-verbal de classement de réaction au feu d'un matériau n° RA00-368. 24 août 2000.
- [21] CSTB. Rapport d'essais n° RS00-022. 15 février 2000.
- [22] CSTB. Rapport d'essais n° RS00-023. 17 mars 2000.
- [23] CSTB. Rapport d'essais n° EEM 07 2600913717 mars 2008.
- [24] LCPC. Rapport d'essais n°33N07P95. 28 février 2008.