

Documents scientifiques et techniques



Bétons fibrés à ultra-hautes performances *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes*

Recommandations provisoires
Interim Recommendations

Documents scientifiques et techniques

Bétons fibrés à ultra-hautes performances *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes*

Recommandations provisoires *Interim Recommendations*

Janvier 2002

2 - Recommandations provisoires

Le présent document a été préparé entre mars 1999 et janvier 2002, à la demande du Comité Scientifique et Technique de l'AFGC, par le groupe de travail AFGC / SETRA sur les "Bétons Fibrés à Ultra-hautes Performances" animé par Benoît Lecinq (alors qu'il était au SETRA) puis par Jacques Resplendino (CETE de Lyon).

La rédaction du document a été réalisée par les membres du groupe :

Paul ACKER
Charles BALOCHE
Véronique BAROGHEL-BOUNY
Mouloud BEHLOUL
Gérard BIRELLI

Hervé BLIECK
Yves BRUGEAUD
Myriam CARCASSES

Pascal CASANOVA
Gilles CAUSSE

Gilles CHANVILLARD
Danièle CHAUVEL
Jérôme DUGAT
Bernard FOURE
Ziad HAJAR
Benoît LECINQ
Jean-Marie PAILLE
Jérôme PETITJEAN

Jacques RESPLENDINO

Pierre ROSSI
Jean-Yves SABLON

Jean-François SIDANER
Alain SIMON
Thierry THIBAUX
François TOUTLEMONDE
Christian VERNET
Marc WASTIAUX

La version anglaise de ces « Recommandations provisoires » a été réalisée par Alex Greenland.

La coordination a été assurée par Jocelyne Jacob (SETRA), Responsable des publications au sein de l'AFGC et Jérôme Petitjean (SETRA), Secrétaire technique du groupe de travail.

On the request of the AFGC Scientific and Technical Committee, these recommendations were drawn up—from March 1999 to January 2002—by the AFGC / SETRA working group on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete chaired first by Benoît Lecinq (when he was at SETRA), then by Jacques Resplendino (CETE de Lyon).

The members of the working group were as follows:

(LAFARGE)
(CSTB)
(LCPC)
(BOUYGUES)
(EDF) **Animateur partie Matériau**
/ Chair for Materials section
(EDF)
(COMPOSANTS PRECONTRAINTS)
(LMDC INSA-UPS Toulouse) **Animateur partie Durabilité / Chair for Durability section**
(LAFARGE)
(BOUYGUES) **Animateur partie Structures**
/ Chair for Structural section
(LAFARGE)
(EDF)
(BOUYGUES)
(CEBTP)
(EIFFAGE)
(SETRA puis / then FREYSSINET INTERNATIONAL)
(SOCOTEC)
(SETRA) **Secrétaire technique du groupe**
/ Group Technical Secretary
(CETE de Lyon) **Animateur du groupe**
/ Group Chairman
(LCPC)
(SETRA puis / then DDE 77)
Secrétaire technique du groupe de mars 1999 à août 2000 / Group Technical Secretary from March 1999 to August 2000
(COGEMA)
(EIFFAGE)
(EIFFAGE)
(LCPC)
(LAFARGE)
(CAMPENON-BERNARD)

Translation by Alex Greenland.

Co-ordination by Jocelyne Jacob (SETRA), AFGC Publications Manager, and Jérôme Petitjean (SETRA), Technical Secretary of the Working Group.

SOMMAIRE / CONTENTS

Introduction	7
<i>Introduction</i>	
Partie 1 Comportement et caractéristiques mécaniques des BFUP	11
<i>Part 1</i> <i>Behaviour and mechanical characteristics of UHPFRC</i>	
1.1 Généralités	11
<i>General</i>	
1.2 Influence du traitement thermique	14
<i>Effect of heat treatment</i>	
1.3 Résistance à la compression	16
<i>Compressive strength</i>	
1.4 Comportement à la traction	17
<i>Tensile behaviour</i>	
1.4.1. Résistance à la traction par traction directe	19
<i>Direct tensile strength</i>	
1.4.2. Résistance à la traction par flexion	20
<i>Flexural tensile strength</i>	
1.4.3. Plaques minces	21
<i>Thin slabs</i>	
1.4.4. Plaques épaisses	22
<i>Thick slabs</i>	
1.4.5. Poutres	23
<i>Beams</i>	
1.4.6. Coques	26
<i>Shells</i>	
1.4.7. Récapitulatif	26
<i>Summary</i>	
1.5 Module d'élasticité statique	28
<i>Static modulus of elasticity</i>	
1.6 Coefficient de Poisson	28
<i>Poisson's ratio</i>	
1.7 Coefficient de dilatation thermique	28
<i>Thermal expansion coefficient</i>	

4 - Recommandations provisoires

1.8	Fluage – Retrait <i>Creep - Shrinkage</i>	29
1.9	Résistance aux chocs <i>Impact strength</i>	29
1.10	Etude, fabrication et mise en œuvre des BFUP <i>Design, mixing, and placement of UHPFRC</i>	33
1.10.1.	Prescriptions générales <i>General requirements</i>	33
1.10.2.	Composition <i>Mix design</i>	34
1.10.3.	Fabrication des BFUP <i>Production of UHPFRC</i>	34
1.10.4.	Transport des BFUP <i>Transport of UHPFRC</i>	36
1.10.5.	Mise en œuvre des BFUP <i>UHPFRC placement</i>	36
1.10.6.	Epreuves <i>Tests</i>	38
Partie 2 <i>Part 2</i>	Méthodes de dimensionnement des structures <i>Structural design methods</i>	45
2.1	Généralités <i>General</i>	45
2.2	Justifications sous sollicitations normales <i>Normal force verifications</i>	47
2.3	Justifications sous sollicitations tangentes <i>Shear force verifications</i>	61
2.4	Diffusion des efforts concentrés <i>Design of zones subject to concentrated loads</i>	70
2.5	Justifications par l'expérimentation <i>Verification by experimentation</i>	72

Partie 3	Durabilité des BFUP	73
Part 3	<i>Durability of UHPFRC</i>	
3.1	Introduction	73
	<i>Introduction</i>	
3.2	Dégradations considérées	74
	<i>Damage considered</i>	
3.3	Agressions « classiques » et indicateurs de durabilité liés à ces agressions	75
	<i>“Conventional” damage mechanisms and associated durability indicators</i>	
3.3.1.	Résumé des objectifs et du programme du groupe	75
	AFGC « Indicateurs de durabilité »	
	<i>Summary of objectives and of the programme of the</i>	
	<i>AFGC “Durability Indicators” group</i>	
3.3.2.	Porosité accessible à l’eau	76
	<i>Water porosity</i>	
3.3.3.	Perméabilité à l’oxygène	77
	<i>Oxygen permeability</i>	
3.3.4.	Coefficient de diffusion des ions chlore	77
	<i>Chloride-ion diffusion factor</i>	
3.3.5.	Teneur en portlandite	78
	<i>Portlandite content</i>	
3.3.6.	Conclusion	78
	<i>Conclusion</i>	
3.4	Indicateurs particuliers liés à la nature des BFUP	78
	<i>Indicators associated with specific features of UHPFRC</i>	
3.4.1.	Introduction	78
	<i>Introduction</i>	
3.4.2.	Stabilité des adjuvants	79
	<i>Stability of admixtures</i>	
3.4.3.	Reprise de l’hydratation	81
	<i>Resumption of hydration</i>	
3.4.4.	Corrosion des fibres métalliques	84
	<i>Corrosion of steel fibres</i>	
3.4.5.	Durabilité des fibres polymères	87
	<i>Durability of polymer fibres</i>	

3.5	Comportement au feu des BFUP <i>Fire performance of UHPFRC</i>	87
	Conclusion – Perspectives <i>Conclusion - Prospects</i>	89
	Bibliographie <i>Bibliography</i>	93
Annexe 1	Comportement en compression – Module d'élasticité <i>Annex 1 Compressive behaviour – Modulus of elasticity</i>	99
Annexe 2	Protocole expérimental des essais de flexion sur prismes et méthode d'exploitation <i>Annex 2 Experimental procedure for flexural tensile tests on prisms and analysis method</i>	103
Annexe 3	Caractérisation d'un BFUP utilisé en plaque mince à partir d'essais de flexion <i>Annex 3 Characterization of UHPFRC used for thin slabs, using flexural tests</i>	115
Annexe 4	Retrait – fluage <i>Annex 4 Shrinkage - Creep</i>	123
Annexe 5	Résistance aux chocs des BFUP <i>Annex 5 UHPFRC impact strength</i>	131
Annexe 6	Essais exigés dans le cadre des épreuves d'étude de la centrale de Cattenom <i>Annex 6 Tests required as design testing for the Cattenom nuclear power plant project</i>	135
Annexe 7	Caractéristiques indicatives de quelques BFUP <i>Annex 7 Characteristics of some UHPFRC mixes</i>	141
Annexe 8	Proposition de coefficients de passage K applicables aux BFUP : l'expérience de Bourg-lès-Valence <i>Annex 8 Proposed design safety factors for UHPFRC: the experience of Bourg-lès-Valence</i>	143
Annexe 9	Teneur en portlandite de différents types de bétons <i>Annex 9 Portlandite content of different types of concrete</i>	151

Introduction

Les présentes recommandations sur les Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances (BFUP) ont pour but la définition d'un référentiel destiné à permettre l'emploi de ces nouveaux matériaux dans les domaines du génie civil.

Par bétons fibrés à ultra-hautes performances, on entend des matériaux à matrice cimentaire, de résistance caractéristique à la compression supérieure à 150 MPa, et pouvant aller jusqu'à 250 MPa. Ces matériaux sont additionnés de fibres métalliques, en vue d'obtenir un comportement ductile en traction et de s'affranchir si possible de l'emploi d'armatures passives. Ils peuvent également comporter des fibres polymères.

Les BFUP se distinguent des bétons à hautes et très hautes performances :

- par leur résistance en compression, systématiquement supérieure à 150 MPa,
- par l'emploi systématique de fibres, qui assurent la non-fragilité du matériau et modifient le recours classique aux armatures actives ou passives,
- par leur fort dosage en liant et la sélection particulière dont les granulats font l'objet.

On recherche avec les BFUP un fonctionnement basé sur la résistance propre à la traction des fibres après fissuration de la matrice cimentaire. Lorsque cette résistance est suffisante, selon le fonctionnement de la structure et les charges auxquelles elle est soumise, on peut se dispenser d'armatures classiques. Dans le cas contraire, l'emploi de précontrainte par pré-tension ou post-tension permet aux poutres en BFUP de franchir de grandes portées, les fibres contribuant à la reprise des efforts de traction secondaires, ce qui peut permettre de se dispenser du ferrailage passif secondaire.

Introduction

These Recommendations on Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPRFC) are intended to constitute a reference document serving as a basis for use of this new material in civil engineering applications.

“Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrete” refers to materials with a cement matrix and a characteristic compressive strength in excess of 150 MPa, possibly attaining 250 MPa, and containing steel fibres in order to achieve ductile behaviour under tension and, if possible, to dispense with the need for passive (non-prestressed) reinforcement. They may also contain polymer fibres.

UHPRFC differs from high-performance and very-high-performance concretes :

- *by its compressive strength which is systematically greater than 150 MPa,*
- *by the systematic use of fibres, which ensures the material is not brittle and modifies the conventional requirements for passive and/or active reinforcement,*
- *by its high binder content and its special selection of aggregates.*

The aim of UHPRFC development is to achieve high tensile strengths through the participation of the fibres which provide tensile strength after the cement matrix has cracked. When the tensile strength is sufficiently high, it may be possible, depending on the way the structure works and the loads to which it is subject, to dispense with conventional reinforcement. If not, pre-tensioned or post-tensioned prestress will allow UHPRFC beams to span long distances since the fibres help take secondary tensile forces, making it possible to dispense with secondary passive reinforcement.

Les BFUP actuellement disponibles sur le marché sont :

- le béton spécial industriel BSI développé par Eiffage,
- les différents bétons Ductal[®], incluant le BPR, issus du programme de recherche entre Bouygues, Lafarge et Rhodia et commercialisés par Lafarge et par Bouygues.

En outre, des développements sont en cours chez la plupart des cimentiers, et des matériaux de laboratoire sont développés par EDF, le LCPC, etc., mais pas encore commercialisés.

Ce document intègre le retour d'expérience des premières applications industrielles (poutres EDF de Cattenom par exemple) et d'ouvrages expérimentaux ainsi que dix ans de recherches en laboratoire.

Le groupe de travail s'est appuyé sur des Recommandations concernant les bétons de fibres métalliques publiées par l'AFREM (Association Française de Recherche et d'Essais sur les Matériaux de Construction) en décembre 1995 [1.1], ainsi que sur le cahier des charges EDF pour les poutres en BFUP des centrales de Cattenom et Civaux.

Ces recommandations se composent de trois parties.

Une première partie, consacrée à la caractérisation du matériau BFUP, définit des spécifications portant sur les performances mécaniques à obtenir et des recommandations caractérisant les BFUP. Cette partie traite également du contrôle en cours de fabrication et sur produits finis ainsi que des modes opératoires de mise en œuvre.

Une deuxième partie porte sur la conception et le calcul de structures en BFUP ; elle est rédigée en suivant le plan des chapitres 6 et 7 du BPEL 91 révisé 99 [2.3] modifiés et complétés pour intégrer la participation des fibres et l'existence d'éléments non précontraints et/ou non armés.

The different kinds of UHPFRC currently marketed are:

- *BSI "Béton Spécial Industriel" (special industrial concrete) developed by Eiffage,*
- *different kinds of Ductal[®] concrete, including BPR (reactive powder concrete), resulting from joint research by Bouygues, Lafarge, and Rhodia, and marketed by Lafarge and Bouygues.*

In addition, most cement manufacturers are developing products, and materials are being developed in the laboratories of Electricité de France, LCPC, etc., but are not yet ready to be marketed.

This document integrates feedback from experience with the first industrial applications (beams at the EDF Cattenom nuclear power plant, for example) and experimental structures, as well as 10 years of laboratory research.

The UHPFRC working group based its work on the recommendations on steel-fibre-reinforced concretes published by AFREM (Association Française de Recherche et d'Essais sur les Matériaux de Construction) in December 1995 [1.1], and on the EDF specifications for the UHPFRC beams of the Cattenom and Civaux nuclear power plants.

These recommendations are made up of three parts, as outlined below.

The first part is devoted to characterization of UHPFRC, giving specifications on the mechanical performance to be obtained and recommendations for characterizing UHPFRC. This part also deals with checks and inspection of finished products and of the concrete as it is produced, and with the procedures used for UHPFRC placement.

The second part deals with the design and analysis of UHPFRC structures; it was drafted in accordance with the plan of Chapters 6 and 7 of the BPEL 91 design code (1991 edition of the Rules for Use of Prestressed Concrete at Ultimate Limit State revised in 1999 [2.3]) which it modifies and complements to integrate the participation of fibres and the existence of non-prestressed and/or non-reinforced elements.

Une troisième partie porte sur la durabilité des BFUP. Il s'agit en effet d'un des avantages potentiels majeurs de ces matériaux, qui, s'il est convenablement quantifié et vérifié, peut en permettre la valorisation, si l'on prend en compte une approche globale du coût pour l'utilisateur : légèreté, durabilité, liberté de forme, etc...

The third part deals with the durability of UHPFRC. Durability is one of the major potential advantages of this material which, if suitably quantified and validated, could result in UHPFRC becoming a market force, on condition that the whole-life cost for the user is taken into account, considering such things as lightness, durability, freedom of shaping, etc.

Pour faciliter l'utilisation des présentes recommandations, on distingue, dans l'ensemble du document :

To make it easier to use these Recommendations, different typefaces are used to distinguish different levels:

- en noir : ce qui est du domaine des Recommandations,
- en texte encadré : ce qui est donné à titre d'exemple, et relatif à un matériau mais qui ne peut être considéré comme une généralité,
- en bleu : les commentaires éventuels.

- *in black: the Recommendations proper,*
- *boxed text: examples relating to a specific concrete which cannot be considered as a general rule,*
- *in blue: comments.*

PARTIE 1

**COMPORTEMENT ET
CARACTERISTIQUES MECANQUES
DES BFUP**

1.1. Généralités

La caractérisation des BFUP nécessite la prise en compte de leur comportement particulier lié à la présence de fibres, qui couvre principalement deux aspects spécifiques :

- La nécessité d'une caractérisation précise de leur résistance en traction,
- Le processus de qualification qui doit prendre en compte les conditions de mise en œuvre et la géométrie de l'ouvrage à réaliser.

La démarche globale de conception applicable à tout projet peut être résumée dans le logigramme ci-après :

PART 1

**BEHAVIOUR AND
MECHANICAL CHARACTERISTICS
OF UHPFRC**

1.1. General

Characterizing UHPFRC requires consideration of its specific behaviour resulting from the presence of fibres. This basically covers two aspects:

- *The need for a precise characterization of its tensile strength,*
- *The qualification process which has to take account of the way the concrete is placed and the geometry of the structure to be built.*

The overall design approach for any project is summed up in the flow chart overleaf:

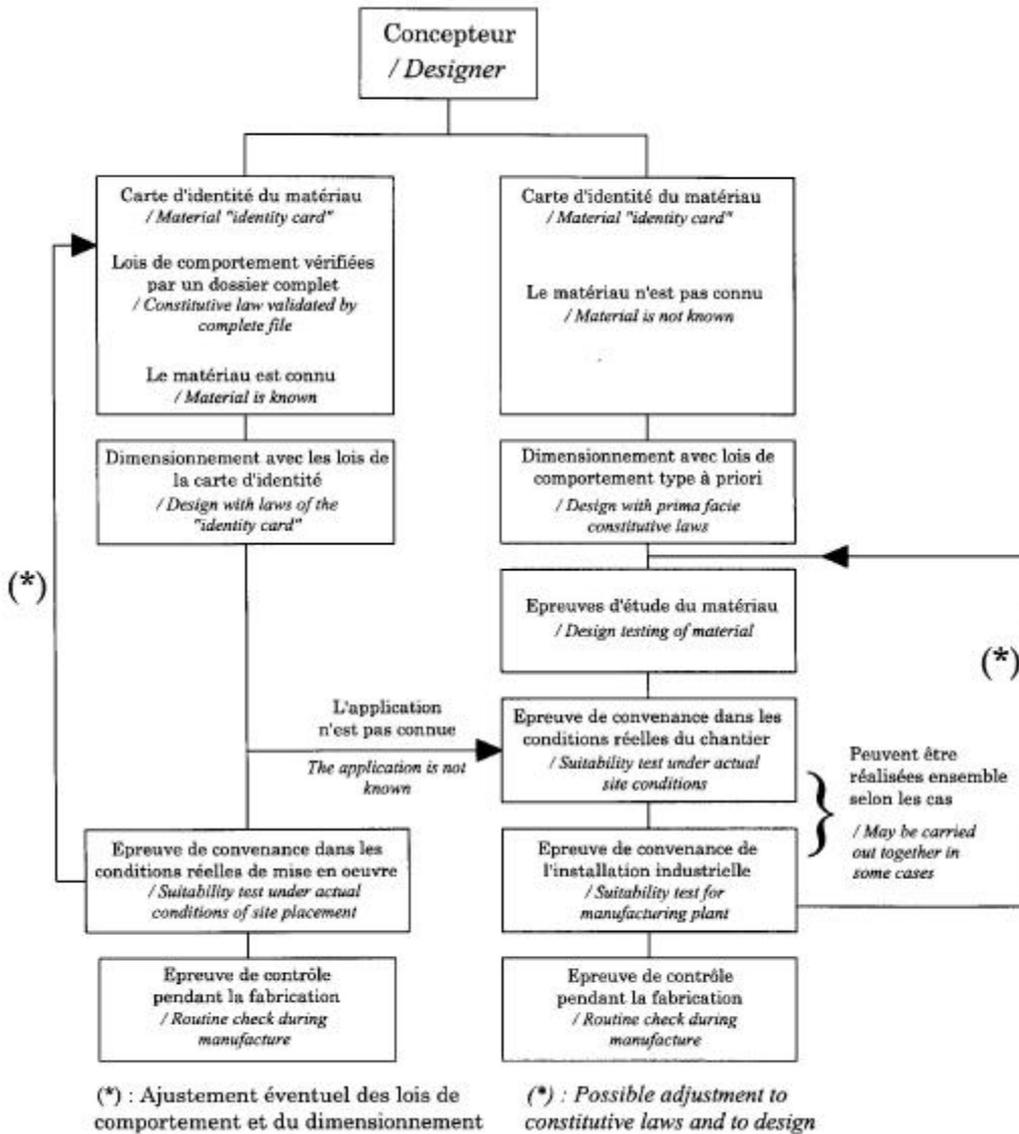


Figure 1.1 : Démarche globale de conception

Figure 1.1 : Overall design approach

Stade conception du projet

Le concepteur a besoin de certaines caractéristiques au niveau du projet. Pour cela il a deux possibilités :

- Soit il existe une carte d'identité complète du matériau désiré chez les fournisseurs de BFUP : c'est le cas de formules bien connues voire disponibles en pré-mélangé à sec (Prémix) ; le dimensionnement est alors effectué à partir de lois de comportement type figurant dans la fiche d'identité remise par le fournisseur.
- Soit il n'existe pas de carte d'identité du matériau désiré ; le dimensionnement est alors effectué à partir de lois types prédéfinies par le concepteur.
-

Stade Epreuve d'études du matériau

Le matériau est formulé en laboratoire afin d'atteindre les caractéristiques désirées par le concepteur pour l'application projetée.

Pour cela le matériau est caractérisé par des essais tenant compte de l'utilisation finale. Les effets de structure et du mode de coulage sont recréés à partir de maquettes de la structure finale ou selon les corps d'épreuve définis ci-après ; ceci permet de rechercher la formulation du matériau dans des conditions économiques raisonnables.

Les essais en vraie grandeur seront réalisés au stade de la convenance.

Il est donc proposé de faire des essais types pour :

- les plaques minces,
- les plaques épaisses,
- les poutres,
- les coques.

Project design stage

Designers need to know certain characteristics at the design stage. There are two possibilities:

- *Either UHPFRC manufacturers already have a full "identity card" for the required material: this is the case of well known mix designs or materials commercially available in the form of premixed bags of dry ingredients. Structural design is then done on the basis of standard constitutive laws in the identity card provided by the manufacturer.*
- *Or there is no identity card for the required material; in this case structural design is done on the basis of standard laws defined beforehand by the designer.*

Concrete design-test stage

The concrete mix is batched in the laboratory to attain the characteristics required by the designer for the proposed application.

To achieve this, the concrete is characterized by tests taking account of the end use. Structural effects and the effect of the placement method are recreated using mockups of the final structure, or using the test specimens defined hereafter. This means the concrete mix design can be developed reasonably economically.

Full-scale tests will be carried out at the suitability-test stage.

It is therefore proposed to conduct standard types of tests for:

- *Thin slab,*
- *Thick slabs,*
- *Beams,*
- *Shells.*

Les principes de ces essais figurent dans les paragraphes suivants.

Stade Epreuve de convenance du matériau

A ce stade on met en œuvre le matériau dans les conditions réelles du chantier sur une maquette représentative de la structure réelle, ou on fournit des résultats d'essais justifiant de la réalisation d'ouvrages similaires. C'est le cas des préfabrications en série ou prototype permettant de qualifier et essayer l'élément de structure dans les conditions réelles ou suffisamment enveloppes.

Les résultats des épreuves d'étude et de convenance permettent, le cas échéant, d'ajuster les lois de comportement adoptées et d'affiner le dimensionnement.

Stade Epreuve de contrôle de fabrication

Des essais spécifiques sont à définir pour assurer le contrôle de production. Le détail des essais préconisés est précisé dans l'article 1.10 du présent document.

1.2. Influence du traitement thermique

Certains BFUP font l'objet de traitements thermiques (TT) qui consistent à porter les éléments à une température relativement élevée (de l'ordre de 90°C) plusieurs heures après la prise du béton.

Ces traitements doivent intervenir après la fin de prise de manière à éviter tout risque de formation d'ettringite différée (DEF). Leur mise en œuvre nécessite ainsi une bonne connaissance et un dispositif de contrôle du temps de prise.

The principles of these tests are given in the following paragraphs.

Concrete suitability-test stage

At this stage the concrete is placed to form a representative mockup of the actual structure, under the actual conditions of site placement, or the results of tests substantiating the construction of similar works are presented. This is the case of runs of precast concrete products or prototypes for qualifying and testing structural elements under real-life conditions or sufficiently encompassing "envelope" situations.

The results of concrete design and/or suitability tests are used to adjust the constitutive laws adopted and refine the design.

Routine manufacturing-check stage

Special tests are to be defined for production control. A detailed account of the recommended tests is given in § 1.10.

1.2. Effect of heat treatment

Some UHPFRCs undergo heat treatment (HT) which consists in raising the temperature of components to a relatively high level (about 90°C) a few hours after the concrete has set.

This kind of treatment must be carried out only after the concrete has set in order to avoid any risk of Delayed Ettringite Formation (DEF). Heat treatment therefore requires good knowledge of the setting time and a means of checking it.

Les principaux effets de ces traitements sont les suivants :

- Atteinte plus rapide des résistances en compression et en traction,
- Diminution importante des effets différés de retrait et de fluage une fois le traitement thermique terminé,
- Amélioration très sensible des propriétés de durabilité.

The main effects of heat treatment are as follows:

- *The concrete strengthens faster (compressive and tensile strengths),*
- *Delayed shrinkage and creep effects reduce substantially once the heat treatment is finished,*
- *Durability is considerably improved.*

Exemple du traitement thermique des produits de la gamme Ductal[®] :

Les produits de la gamme Ductal[®] peuvent être utilisés comme des bétons traditionnels mais ils tirent avantage d'un traitement thermique qui peut être optimisé (en durée et température), en fonction des éléments à fabriquer. Le traitement thermique de référence le plus documenté (référence [1.15]) consiste à porter les éléments à une température de $90^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ pendant 48h. Ce traitement s'effectue traditionnellement à l'aide de vapeur d'eau dans une enceinte fermée. Le début du traitement peut intervenir à n'importe quel moment après la fin de la prise du matériau.

L'aiguille Vicat donne une bonne indication du temps de prise : la fin de prise au sens de cette méthode est proche de la fin de la prise mesurée, par exemple, par conductimétrie. Cette mesure dépend bien sûr de la température : dans le cas de pièces épaisses, il est intéressant d'utiliser la maturaométrie. Par sécurité, et en l'absence d'une mesure précise comme la conductimétrie, les éléments ne sont mis en cure qu'au plus tôt 24h après le temps de fin de prise indiqué par l'aiguille Vicat. Une méthode plus accessible en usine est la mesure de la variation de température dans un becher avec un échantillon de 20 cl : la fin de prise peut être considérée comme atteinte lorsque la différence de température avec l'extérieur est inférieure à $0,1^{\circ}\text{C}$.

Example of heat treatment of the Ductal[®] range of products:

The Ductal[®] range of products can be used in the same way as conventional concretes but they also benefit from heat treatment which can be optimized (duration and temperature), depending on the components to be made. The most documented heat treatment (reference [1.15]) consists in raising the temperature of components to $90^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ for 48 hours. It is traditionally performed with steam in a closed box. The treatment can start any time after the material has set.

The Vicat needle gives a good indication of setting time: the final set determined by this method is close to the final set as measured by conductimetry, for example. Of course this measurement depends on temperature: in the case of thick components, it is worth using a means of maturity measurement. To be on the safe side, and in the absence of precise measurement such as conductimetry, components should be cured no sooner than 24 hours after the final setting time given by the Vicat apparatus. A more practical method in a manufacturing plant is to measure the temperature variation in a beaker containing a 20 cl sample: final set can be considered to be attained when the difference between the inside and outside temperature is less than 0.1°C .

Les principaux effets du traitement thermique (TT) sont les suivants :

- Après ce process, les éléments ont atteint leur maturité finale et peuvent donc être utilisés comme tels sans attendre 28j ou plus comme pour les bétons traditionnels.
- La résistance à la compression et la résistance en traction après traitement thermique sont supérieures d'environ 10% à la résistance à 28j avec conservation sous eau.
- Le retrait total après TT est nul.
- Le fluage est fortement réduit : coefficient de fluage égal à 0,2 au lieu de 0,8 sans TT.

La durabilité est améliorée grâce à une réduction de la porosité.

The main effects of heat treatment (HT) are as follows:

- *Heat-treated components have reached their final maturity and can therefore be used without waiting 28 days or more as is the case with conventional concretes.*
- *Compressive and tensile strengths after heat treatment are about 10% higher than the 28-day strength with storage in water.*
- *Total shrinkage after HT is zero.*
- *Creep is significantly reduced: the creep coefficient is 0.2 instead of 0.8 without HT.*

Durability is improved as a result of a reduction in the voids ratio.

1.3. Résistance à la compression

Le comportement en compression est défini par la résistance caractéristique en compression et le module d'élasticité.

Pour les calculs réglementaires en flexion à l'ELU, on adopte une loi de comportement conventionnelle linéaire avec un palier plastique.

Le début du palier plastique correspond à une contrainte maximale égale à $0,85 f_{c28} / \theta \gamma_b$.

Un exemple de courbe de comportement en compression est donné en annexe 1.

Essai :

L'éprouvette est un cylindre de $\varnothing 7 \times 14$ cm ou de $\varnothing 11 \times 22$ cm. L'essai de compression est piloté en force. La valeur caractéristique f_{c28} de la résistance à la compression est obtenue selon la même méthode que celle des bétons ordinaires telle que décrite dans le fascicule 65A. Un surfaçage lapidaire est indispensable pour effectuer les essais, et celui-ci doit faire l'objet d'un soin particulier.

1.3. Compressive strength

Compressive behaviour is defined by the characteristic compressive strength and the modulus of elasticity.

For the regulatory calculations regarding ULS bending, a conventional linear constitutive law with a yield plateau will be used.

The start of the yield plateau will correspond to a maximum stress of $0.85 f_{ck} / \alpha \gamma_b$.

An example of a compressive behaviour test curve is given in annex 1.

Test :

The test specimen shall be a $\varnothing 7 \times 14$ cm or $\varnothing 11 \times 22$ cm cylinder. The compressive-strength test load shall be force-controlled. The characteristic value f_{ck} of compressive strength shall be obtained using the same method as that used for ordinary concretes, as described in fascicule 65A (General Technical Specifications – Construction of Reinforced or Post-Tensioned Prestressed Concrete Civil Engineering Structures).

S'il est nécessaire de faire une étude non-linéaire de stabilité de forme, un pilotage en déplacement est nécessaire afin d'obtenir le comportement post-pic.

The surface must be carefully polished prior to testing.

If non-linear buckling calculations are needed, a displacement-controlled test shall be used in order to determine post-peak behaviour.

1.4. Comportement à la traction

1.4. Tensile behaviour

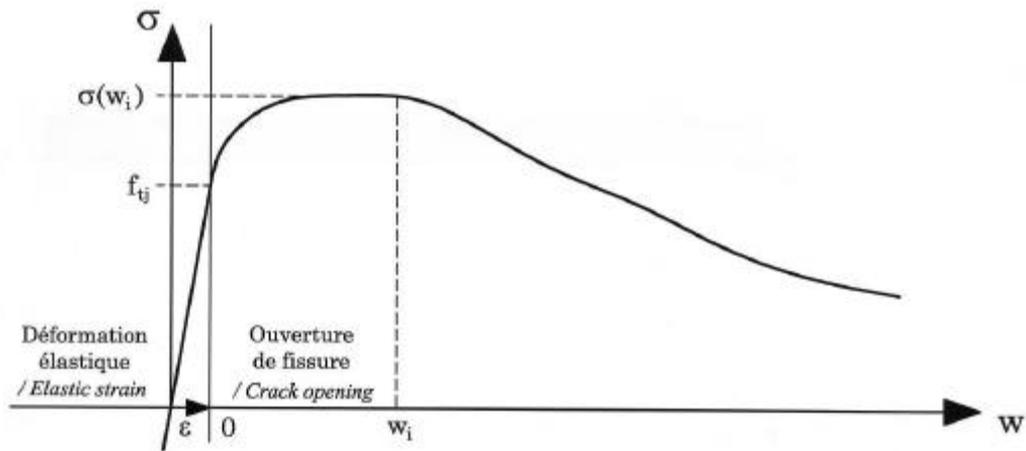


Figure 1.2 : Exemple de loi de comportement en traction d'un BFUP (cas d'un matériau écrouissant)

Figure 1.2 : Example of tensile constitutive law of a UHPFRC (case of a strain-hardening material)

Le comportement en traction du matériau est caractérisé par :

- Un domaine de déformation élastique limitée par la résistance en traction de la matrice cimentaire f_{tj} ,
- Un domaine post-fissuration caractérisé par la résistance en traction du matériau fibré obtenue après fissuration de la matrice.

Si un temps de malaxage suffisant et des conditions de mise en œuvre assez traditionnelles permettent de garantir une faible dispersion de la résistance en traction de la matrice cimentaire f_{tj} , la résistance en traction apportée par les fibres est en revanche très sensible aux conditions de réalisation :

The tensile behaviour of UHPFRC is characterized by:

- *an elastic stage limited by the tensile strength of the cement matrix, f_{tj} ,*
- *a post-cracking stage characterized by the tensile strength of the composite material after the matrix has cracked.*

Although sufficient mixing time and quite traditional placing conditions ensure low scatter of the tensile strength of the cement matrix, f_{tj} , fibre tensile strength depends very much on the mixing and placement process:

- Tout écoulement éventuel lors de la mise en œuvre tend à orienter les fibres dans le sens de l'écoulement,
 - Les fibres proches des parois sont naturellement orientées parallèlement aux coffrages. Ce phénomène n'intervient que sur une profondeur inférieure ou égale à la longueur des fibres. Il a ainsi d'autant plus d'influence sur la résistance en traction effective des pièces que l'épaisseur des structure est proche de la dimension des fibres.
 - Une orientation privilégiée des fibres dans le sens de la gravité peut parfois se produire, liée au comportement naturel des fibres dans la phase liquide visqueuse que constitue le béton avant la prise.
- *Any flow during concrete placing tends to align fibres in the direction of flow,*
 - *Fibres close to formwork walls are naturally aligned parallel to them. This phenomenon ceases beyond a distance from the formwork in excess of the fibre length. The closer component thicknesses are to the length of fibres, the greater is the effect on the effective tensile strength of the parts.*
 - *Preferential gravitational orientation of fibres can sometimes occur, due to the natural behaviour of fibres in the viscous-liquid phase of concrete before it sets.*

Les méthodes développées dans les présentes recommandations permettent d'intégrer l'ensemble de ces phénomènes qui sont dissociés en deux approches.

A partir d'essais de caractérisation qui dépendent du type de structure étudié (plaques minces, plaques épaisses, poutres ou coques), et qui peuvent être de deux types (traction directe ou traction par flexion), les recommandations donnent les coefficients permettant de passer des résultats des essais à une loi de comportement en traction « intrinsèque », à savoir qui ne dépend pas de la taille des éprouvettes et du type d'essai réalisé. Dans ce chapitre, et pour chaque protocole d'essais proposé, les recommandations donnent les coefficients correcteurs à appliquer pour aboutir aux lois de comportement intrinsèques.

Une fois la loi de comportement en traction intrinsèque déterminée, les recommandations donnent les éléments permettant d'intégrer l'influence des méthodes de mise en œuvre sur les valeurs de résistance réelle à prendre en compte dans les calculs. Cette correction à apporter aux courbes de résistances intrinsèques consiste à appliquer un coefficient correcteur $1/K$, qui est le coefficient de passage entre la loi intrinsèque et celle issue d'essais sur éprouvettes prélevées dans la structure réelle.

The methods outlined in these Recommendations take account of all these phenomena which are dissociated in two approaches.

Using characterization tests depending on the type of structure studied (thin slabs, thick slabs, beams, shells), and which can be of two types (direct tensile test or flexural tensile test), these Recommendations give the transfer factors to go from test results to an "intrinsic" curve for tensile behaviour which does not depend on test specimen size or on the type of test used. This chapter gives the corrective factors to be applied with each proposed test procedure to get intrinsic constitutive laws.

The Recommendations also give instructions for taking account of the effect placement methods have on the real strength values to be considered in calculations (once the intrinsic curve for tension has been determined). This correction of the intrinsic strength curves consists in applying a reduction coefficient $1/K$ representing the difference between the intrinsic curve and what would have been obtained on specimens taken from an actual structural element.

Pour déterminer ce coefficient K, plusieurs alternatives sont possibles :

- soit les méthodes de mise en œuvre prévues ont déjà été validées sur des ouvrages similaires réalisés de façon analogue à la structure projetée. Dans ce cas le projeteur utilise les coefficients de passage de la référence connue,
- soit il est prévu ultérieurement de justifier les méthodes de mises en œuvre sur la base d'épreuves de convenance réalisées sur un modèle représentatif de la structure réelle. Dans ce cas, le projeteur peut utiliser en première approche les valeurs de K obtenues sur des ouvrages similaires connus. Dans le chapitre 2 et dans les annexes du présent document, sont ainsi indiquées, à titre d'exemple, les valeurs et la méthodologie d'obtention du coefficient K dans le cas des ouvrages expérimentaux de Bourg-lès-Valence.

1.4.1 Résistance à la traction par traction directe

Protocole d'essai

Le protocole de réalisation de l'essai de traction directe est défini dans les Recommandations de l'A.F.R.E.M (référence [1.1]).

Sur la base de ces recommandations et à partir des résultats d'essais des chantiers de Chinon et Cattenom avec le BPR et le BSI il est apparu que le processus de traction directe sur éprouvette entaillée était très pénalisant et pas forcément représentatif du comportement du matériau dans la structure.

En effet le prélèvement est très local et de plus la taille du ligament du corps d'éprouvette est telle que la dispersion est grande.

There are two possible alternatives for determining this K factor:

- *Either the concrete placement methods have already been validated on similar works built in a manner similar to that proposed for the project, in which case the designer uses the K factors for the known reference,*
- *Or it is proposed to substantiate the placement methods at a later date, on the basis of suitability tests conducted on a representative model of the actual structure. In this case, the designer can approximate using the K values obtained on similar works. The K values obtained on the innovative Bourg-lès-Valence works, and the way they were obtained, are given as examples in Chapter 2 and in the annexes.*

1.4.1 Direct tensile strength

Test procedure

The direct tensile-strength test procedure is defined in the AFREM recommendations (reference [1.1]).

From these recommendations and the results of testing of BPR and BSI concretes at the Chinon and Cattenom nuclear power plants, it was seen that the direct tensile test using notched specimens is extremely unfavourable and not necessarily representative of the behaviour of the material in a structure.

This is because sampling is very localized, and because the size of the necked section induces broad scatter of results.

Dans [1.3], vingt essais de traction directe ont été réalisés sur du Ductal®. Les éprouvettes sont des prismes 7*7*28 cm usinés en partie centrale (section centrale 7*5 cm).

Les résultats obtenus étaient les suivants :

- Moyenne des résistances en traction directe (effort maximal divisé par la section): 10,27 MPa,
- Ecart type : 1,19 MPa,
- Valeur caractéristique réellement obtenue : 8.2 MPa

Valeur caractéristique de calcul : 8 MPa.

Les résultats de ces essais viennent corroborer les valeurs déduites des essais de flexion.

*In [1.3], twenty axial tensile-strength tests were carried out on Ductal®. The specimens were 7*7*28 cm prisms machined at the centre (central section measuring 7*5 cm).*

Results obtained:

- *Mean direct tensile strength (maximum force divided by sectional area): 10.27 MPa*
- *Standard deviation: 1.19 MPa*
- *Characteristic value actually obtained: 8.2 MPa*

Design value : 8 MPa.

The results of these tests corroborate the values deduced from flexural tests.

1.4.2 Résistance à la traction par flexion

Protocole d'essai

Le protocole de réalisation de l'essai de traction par flexion est défini en annexe 2.

Lors du chantier Cattenom, les essais de flexion de contrôle sur 196 éprouvettes 4*4*16 testées en flexion 3 points ont conduit aux résultats suivants :

- Résistance moyenne : 41,8 MPa
- Ecart type : 4,6 MPa
- Valeur caractéristique réellement obtenue : 33,9 Mpa
-

La résistance à la traction est déduite de cette valeur en utilisant une modélisation [1.3].

On obtient alors $f_t = 33,9 / 4,2 = 8,1$ MPa

d'où la valeur caractéristique de 8 MPa pour f_t .

1.4.2 Flexural tensile strength

Test procedure

The flexural tensile-strength test procedure is given in annex 2.

*Flexural tensile-strength checks carried out during the works at the Cattenom nuclear power plant on 196 specimens measuring 4*4*16 cm tested on a centre-point bending press gave the following results:*

- *Mean strength: 41.8 MPa*
- *Standard deviation : 4.6 MPa*
- *Characteristic value actually obtained: 33.9 MPa*

The tensile strength is deduced from this value by means of modelling [1.3].

This gives $f_t = 33.9 / 4.2 = 8.1$ MPa

whence the design value of 8 MPa for f_t .

1.4.3 Plaques minces

Corps d'épreuve

Les plaques minces sont des éléments dont l'épaisseur e est telle que :

$$e \leq 3 L_f \quad \text{avec } L_f = \text{longueur de la fibre}$$

et

$$\frac{L}{e} \geq 50 \quad \text{avec } L = \text{portée de la structure}$$

Pour ce genre de plaque, le mode caractéristique de travail étant la flexion, le comportement en traction est caractérisé par un essai de flexion 4 points sur des bandes prismatiques rectangulaires d'épaisseur égale à celle de la structure, de longueur **20** fois l'épaisseur e et de largeur au moins égale à **8** L_f .

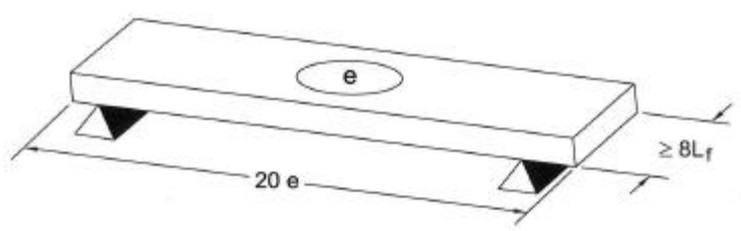


Figure 1.3 : Plaques minces : définition du prisme d'essai
 Figure 1.3 : Thin slabs : definition of the test prism

Protocole d'essai

L'essai de flexion est piloté en déplacement. Le résultat de l'essai (courbe effort – flèche au centre) est analysé de manière inverse avec une loi de comportement de type contrainte – déformation, car on peut considérer que pour ce type de structure, de sollicitation et de matériau, une multi-fissuration diffuse sera obtenue.

La minceur des plaques et leur mode de coulage sont susceptibles d'influencer l'orientation des fibres. On peut donc s'attendre à des performances post-fissuration qui varient selon la direction considérée d'une plaque. Les essais doivent mettre en évidence cette éventuelle anisotropie.

1.4.3 Thin slabs

Specimen

Thin slabs are elements whose thickness e is such that :

$$e \leq 3 L_f \quad \text{where } L_f = \text{length of individual fibres}$$

and

$$\frac{L}{e} \geq 50 \quad \text{where } L = \text{span of slab}$$

Since this kind of slab characteristically works in bending, the tensile strength is characterized by a third-point flexural test using rectangular prismatic specimens. The specimens are the same thickness as the structure; their length is **20** times thickness e , and their width is greater than **8** L_f .

Test procedure

The flexural tensile-strength test is displacement-controlled. The result of the test (force–mid-span deflection curve) is back-analyzed using a stress-strain type constitutive law since it can be considered that for this kind of structure, loading, and material, diffuse multiple cracking will occur.

The thinness of the slabs and the way the concrete is placed are likely to affect the orientation of fibres. It can therefore be expected that post-cracking performance will vary, depending on the direction tested. Testing must reveal any such anisotropy.

Le détail du protocole d'essai recommandé est donné en annexe 3.

L'objectif principal de la démarche est de n'avoir besoin, à terme, que des résultats d'essais sur bandes pour justifier les performances de structures de type plaques minces.

Si l'on a besoin de caractéristiques du comportement au poinçonnement il est recommandé d'utiliser l'un des essais suivants :

- l'essai AFTES (pour béton projeté) ou essai SNCF.
- l'essai de flexion sous charge ponctuelle centrée d'une dalle circulaire [1.17]
- l'essai pour plaques de faux planchers (4 appuis ponctuels) – Norme NF P 67-101

1.4.4 Plaques épaisses

Corps d'épreuve

Les plaques épaisses sont des éléments dont l'épaisseur e est telle que :

$$e > 3 L_f \quad \text{où } L_f = \text{longueur de la fibre}$$

et

$$\frac{L}{e} \geq 10 \quad \text{où } L = \text{portée de la dalle}$$

Trois types d'essais sont envisageables :

- Essais de flexion 3 points sur prisme entaillé piloté en déplacement avec une mesure de la flèche au centre et analyse inverse pour obtenir une courbe contrainte – ouverture de fissure en traction. Cet essai est considéré comme pénalisant.
- Essais de traction directe sur des éprouvettes entaillées prismatiques sciées ou cylindriques carottées dans des prismes.
-
-

The recommended test procedure is described in annex 3.

The main objective of the procedure is to eventually need only test results on strips to check the performance of thin-slab type structures.

If the characteristics of punching behaviour are required, it is recommended to use one of the following tests:

- *the French Tunnelling Association (AFTES) test or the French Rail (SNCF) test, both for sprayed concrete.*
- *the flexural test with a point load centred on a circular slab [1.17]*
- *the raised-flooring test (4 point bearings) – French standard NF P 67-101*

1.4.4 Thick slabs

Specimen

Thick slabs are elements whose thickness e is such that:

$$e > 3 L_f \quad \text{where } L_f = \text{length of individual fibres}$$

and

$$\frac{L}{e} \geq 10 \quad \text{where } L = \text{span of slab}$$

Three types of test may be used:

- *Centre-point flexural test using notched prisms (displacement controlled), with measurement of mid-span deflection and back analysis to derive a “stress - crack opening under tension” curve. This test is deemed to give unfavourable results.*
- *Direct tensile-strength test on notched sawn prismatic specimens or cylindrical specimens cored from prisms.*

- Essais de traction directe sur éprouvettes non entaillées. Cet essai ne permet d'obtenir une information fiable que pour de très faibles ouvertures de fissures.

Six éprouvettes au minimum doivent être testées. Les dimensions des prismes proposés sont fonction de la taille des fibres :

- $L_f \leq 15$ mm : 7 x 7 x 28 cm,
- $15 < L_f \leq 20$ mm : 10 x 10 x 40 cm,
- $20 < L_f \leq 25$ mm : 14 x 14 x 56 cm,
- $25 < L_f$: largeur $> 5 L_f$, hauteur $> 5 L_f$ ou égale à l'épaisseur de la structure si celle-ci est connue, longueur = 4 fois la hauteur.

Protocole d'essai par flexion 3 points

Les éprouvettes sont testées face coffrée en bas. Les éprouvettes utilisées pour les essais de traction sont prélevées de manière à ce que la direction de traction directe soit parallèle à l'axe longitudinal du prisme.

Le prisme est coulé depuis une seule extrémité afin de garantir une répétabilité de réalisation. Les moules sont vibrés sur une table et arasés à la règle vibrante.

Le détail du protocole d'essai et son exploitation sont donnés en annexe 2.

1.4.5 Poutres

Les cas de charge à considérer pour calculer une poutre sont très nombreux :

- flexion longitudinale,
- flexion transversale,
- effort tranchant,
- torsion,
- diffusion de la précontrainte,
- efforts localisés.

- *Direct tensile-strength tests on un-notched specimens. This test produces reliable information only for very small crack widths.*

Test at least six specimens. The dimensions of the test prisms proposed depend on the size of fibres:

- *$L_f \leq 15$ mm : 7 x 7 x 28 cm,*
- *$15 < L_f \leq 20$ mm : 10 x 10 x 40 cm,*
- *$20 < L_f \leq 25$ mm : 14 x 14 x 56 cm,*
- *$25 < L_f$: width $> 5 L_f$, height $> 5 L_f$ or equal to the thickness of the structure, if known, length = 4 times the height.*

Centre-point flexural test procedure

Test the specimens with the moulded face downwards. Take the specimens used for tensile-strength tests such that the direction of axial tension is parallel to the longitudinal axis of the prism.

Cast the prism from one end only to ensure good casting repeatability. Vibrate the moulds on a table and level the concrete with a vibrating striker.

A description of the test procedure and its interpretation method are given in annex 2.

1.4.5 Beams

There are many load cases to be considered for designing beams:

- *longitudinal bending*
- *transverse bending*
- *shear strength*
- *torsion*
- *distribution of prestress*
- *localized forces.*

La démarche de caractérisation adoptée est ainsi la suivante :

Réalisation d'un essai de flexion sur prisme coulé entaillé à partir duquel une analyse inverse conduit à une loi de traction post-fissuration contrainte – ouverture de fissure ($\sigma-w$).

La loi issue de cet essai est corrigée pour intégrer les effets d'échelles et de parois, liés à la géométrie et au mode de confection des éprouvettes.

La loi de comportement obtenue est ensuite pondérée par un coefficient réducteur $1/K$ représentant l'écart entre la loi issue d'essais sur prisme coulé et celle qu'on obtient en prélevant des prismes dans l'élément de structure fabriqué.

Afin de déterminer un coefficient de passage K exact pour l'application particulière considérée, il est nécessaire de réaliser des éléments de géométrie et de mode de fabrication représentatifs de la structure réelle, puis de prélever des éprouvettes dans les directions des contraintes principales.

Les dimensions des prismes sont celles proposées pour le cas des dalles épaisses si la géométrie de la poutre n'est pas connue a priori. Dans le cas contraire on pourra choisir comme largeur et hauteur des prismes deux fois le rayon moyen de la poutre.

Les prismes sont coulés de manière à limiter au maximum une orientation préférentielle des fibres. Après remplissage, ils sont vibrés si nécessaire.

Les prismes sont testés en flexion en les ayant tourné d'un quart de tour par rapport au sens de coulage afin de limiter les effets de la paroi inférieure.

Résistance en traction f_{tj}

Cette résistance est obtenue à partir d'essais de flexion 4 points sur prismes non entaillés (dimensions définies en annexe 2). La résistance est déterminée par la perte de linéarité du comportement initial, relevée sur les courbes effort en fonction de la flèche.

The characterization procedure adopted is as described below.

Cast and notch a prism. Perform a flexural test with it. Conduct back analysis to determine a post-cracking stress-crack width ($\sigma-w$) law.

Correct the law derived from this test so as to integrate scale and face effects associated with the specimen shape and casting method.

Weight this law with a reduction coefficient $1/K$ representing the difference between a flexural test result for a cast prism and what would have been obtained on prisms sawn from an actual structural element.

To determine an exact transfer factor K for the particular application considered, make components that are representative of the actual geometry and manufacturing method used for the structure, and take specimens along the directions of principal stress.

The dimensions of the prisms are those proposed for thick slabs if the shape of the beam is not known. Otherwise, the width and height of the prism can be twice the mean radius of the beam.

Cast prisms so as to limit preferential orientation of fibres as much as possible. After filling, vibrate the prisms if necessary.

For flexural-strength testing, turn the prisms 90° from the casting position in order to limit the effects of the underside.

Tensile strength f_{tj}

Tensile strength f_{tj} is given by third-point flexural tests on un-notched prisms (dimensions defined in annex 2). It is the strength read at the end of the initial linear behaviour on force-deflection curves.

Le détail du protocole d'essai est donné en annexe 2.

Test procedure details are given in annex 2.

Loi de comportement post-fissuration

Post-cracking constitutive law

Cette partie de la loi de comportement en traction, est déterminée par des essais de flexion 3 points sur prismes entaillés. Ces essais correspondent au protocole défini dans l'annexe 2.

This part of the tensile constitutive law is given by centre-point flexural tests on notched prisms. The procedure for these tests is given in annex 2.

L'entaille, pratiquée en section centrale sur une hauteur équivalente à 10% de la hauteur du prisme, localise la fissure.

The notch is made at mid-span, to a depth of 10% of the total prism height, to induce cracking at a known location.

Au minimum 6 essais sont réalisés et analysés en termes de moyenne et de courbe caractéristique.

Carry out at least 6 tests and analyze their results (mean value and characteristic curve).

La loi caractéristique contrainte – ouverture de fissure ($\sigma - w$) peut être obtenue soit par analyse inverse ([1.11], [1.12], [1.13]) décrite en annexe 2, soit par calculs itératifs avec la méthode directe de flexion en section fissurée en cherchant à égaler les surfaces sous les courbes moment-ouverture de fissure.

The characteristic stress-crack width ($\sigma-w$) law can be derived either by back analysis ([1.11], [1.12], [1.13]) as described in annex 2, or by iterative calculation with the direct tensile-strength method for cracked sections, aiming to make the areas below the bending moment-crack width curves the same.

La loi caractéristique obtenue est exploitée de manière à déterminer une loi en traction simplifiée (linéarisée) munie de valeurs caractéristiques telle que proposée ci-dessous :

The characteristic law obtained is used to determine a simplified (linearized) tensile-strength law such as that proposed below:

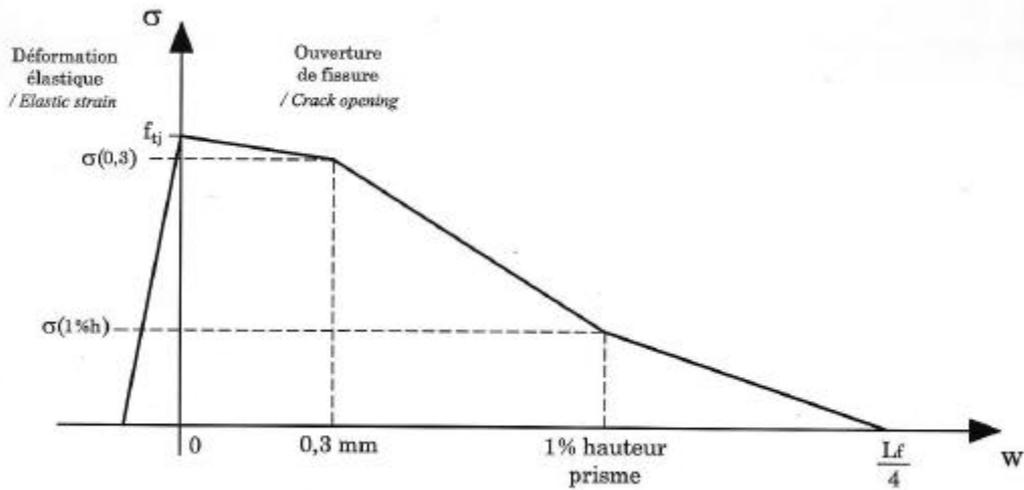


Figure 1.4 : Loi simplifiée en traction

Figure 1.4 : Simplified tensile-strength law

1.4.6 Coques

Les coques ne sont pas considérées comme un type particulier de structures :

- Les coques épaisses sont traitées comme des poutres : les éprouvettes sont alors des prismes,
- Les coques minces sont traitées comme des dalles minces.

1.4.7 Récapitulatif

L'ensemble des essais de caractérisation qui viennent d'être évoqués peut être résumé de la façon suivante :

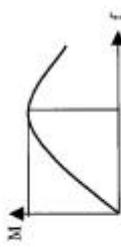
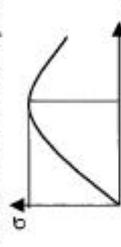
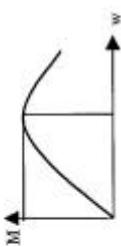
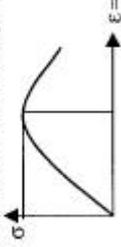
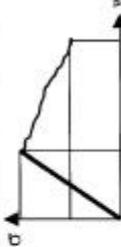
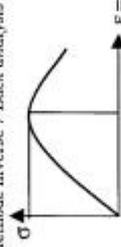
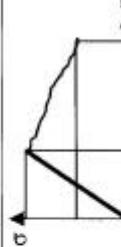
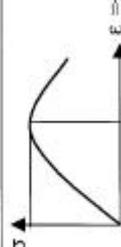
1.4.6 Shells

Shells are not considered to be a separate kind of structural element:

- *thick shells are designed in the same way as beams: the test specimens are prisms*
- *thin shells are designed in the same way as thin slabs*

1.4.7 Summary

All the characterization tests described above are summed up overleaf:

Type de Structure / Type of structure	Essais / Tests	Résultats d'essais / Test result	Résultats exploitables / Usable result
PLAQUES MINCES / THIN SLABS	Essai de flexion 4 points sur éléments représentant l'élément réel. / <i>Third-point flexural tests on specimens representing actual elements</i>		 Méthode inverse / <i>Back analysis</i> :
PLAQUES EPAISSSES / THICK SLABS	Essai de flexion 3 points sur éprouvette entaillée. / <i>Centre-point test on notched specimens</i>		 Méthode inverse / <i>Back analysis</i> :
	Ou essai de traction directe sur éprouvette entaillée. / <i>Or direct tensile-strength test on notched specimens</i>		 $\epsilon = \frac{w}{0,6H}$
	Ou essai de traction sur éprouvette non entaillée / <i>Or direct tensile-strength test on un-notched specimens</i>		
POUTRES / BEAMS	Essai de flexion 3 points sur éprouvette entaillée. / <i>Centre-point test on notched specimens</i>		 Méthode inverse / <i>Back analysis</i> :
	Ou essai de traction directe sur éprouvette entaillée. / <i>Or direct tensile-strength test on notched specimens</i>		 $\epsilon = \frac{w}{0,6H}$

1.5. Module d'élasticité statique

Les résultats expérimentaux avec les différents BFUP connus à ce jour montrent :

- qu'il n'y a pas de formule simple utilisable (Cf annexe 1, chapitre 2),
- qu'on peut utiliser la théorie de l'homogénéisation (modèle tri-sphère du LCPC [1.20]) qui donne de bons résultats,
- sinon on fait un essai de mesure directe du module.

Si rien n'est connu lors des phases d'études préliminaires de projet, il est suggéré de considérer la valeur indicative de 55 GPa.

Lors de phases d'étude plus détaillées, le module pris en compte doit résulter d'un essai.

1.6. Coefficient de Poisson

Les valeurs du coefficient de poisson de divers BFUP connus sont données dans le tableau de l'annexe 7.

A défaut d'autre valeur, on peut prendre $\nu = 0,2$

1.7. Coefficient de dilatation thermique

Les valeurs du coefficient thermique de divers BFUP connus sont données dans le tableau de l'annexe 7.

A défaut, une valeur de $1,1 \cdot 10^{-5}$ m/m/°C peut être prise en compte.

1.5. Static modulus of elasticity

The experimental results with different kinds of UHPFRC known to date demonstrate that:

- *there is no usable simple formula (see annex 1, §2),*
- *the LCPC homogenization model theory (tri-sphère [1.20]) can be used, giving good results,*
- *otherwise, tests should be run to directly measure the modulus of elasticity.*

If nothing is known at the preliminary project design stage, a guideline value of 55 GPa can be considered.

At more detailed design stages, the modulus taken into account must be the result of a test.

1.6. Poisson's ratio

The Poisson's ratios of different known UHPFRC mixes are given in annex 7.

A value of $\nu = 0.2$ can be considered if no other figure can be determined.

1.7. Thermal expansion coefficient

The thermal expansion coefficients of different known UHPFRC mixes are given in a table in annex 7.

A value of $1.1 \cdot 10^{-5}$ m/m/°C can be considered if no other figure can be determined.

1.8. Fluage - Retrait

Retrait

Dans le cas des BFUP, le retrait est essentiellement endogène. Dans le cas d'un traitement thermique, l'ensemble du retrait est effectué entièrement à la fin de celui-ci.

Si rien n'est connu lors des phases d'études préliminaires de projet, il est suggéré de considérer la valeur indicative de 550 $\mu\text{m}/\text{m}$

Fluage

Un exemple détaillé de caractérisation est donné en annexe 4.

Dans le cas d'un traitement thermique, le fluage est fortement réduit.

Si rien n'est connu lors des phases d'études préliminaires, une valeur de coefficient de fluage à long-terme Φ de 0,8 sans traitement thermique, 0,2 dans le cas d'un traitement thermique peut être prise en compte.

Résistance à long terme

Les essais de fluage de BPR sous une contrainte soutenue importante ont permis de vérifier la tenue dans le temps du matériau sous fortes charges et s'assurer sur la valeur du facteur d'abattement de 0,85 du BAEL [2.2].

1.9. Résistance aux chocs

Le comportement en dynamique rapide des BFUP a été étudié dans le cadre d'une application à des conteneurs [1.37], soumis par hypothèse dans leur cahier des charges à un essai de chute, ce qui correspond à un choc assez intense et à des vitesses de déformation locales élevées (de l'ordre de 1 s^{-1} , à comparer aux vitesses de déformation atteintes pour des ouvrages sous sollicitations de trafic, de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-4} s^{-1}).

1.8. Creep - Shrinkage

Shrinkage

UHPFRC shrinkage is mainly autogenous. When it has been heat treated, UHPFRC has no further shrinkage.

If nothing is known at the preliminary design stages, a guideline value of 550 $\mu\text{m}/\text{m}$ can be considered.

Creep

A detailed example of characterization is given in annex 4.

Heat treatment significantly reduces creep.

If nothing is known at the preliminary design stages, guideline long-term creep coefficients, Φ , of 0.8 can be considered if there is no heat treatment, and 0.2 with heat treatment.

Long-term strength

For reactive powder concrete, creep tests under high stress checked the long-term strength of the material under high sustained loads and gave reassurance regarding the 0.85 reduction factor of the BAEL code (limit state design of reinforced concrete structures [2.2])

1.9. Impact strength

The behaviour of UHPFRC subjected to rapid dynamic loading was studied in connection with application to radioactive-waste containers [1.37]. The specifications for these containers called for a drop test, which amounts to a quite intense impact and high rates of localized strain (about 1 s^{-1} , compared to the strain rates around 10^{-6} to 10^{-4} s^{-1} on works subject to road-traffic loading).

Ces données permettent de donner quelques informations sur la résistance au choc de ce type de matériaux. Comme la plupart des bétons de fibres, les BFUP ont une importante capacité de dissipation d'énergie, ce qui est a priori intéressant vis-à-vis des sollicitations dynamiques. De plus, leur résistance en traction élevée peut aussi permettre de maîtriser la fissuration et l'intégrité de la structure y compris en cas de choc relativement dur. En revanche, il n'y a pas à l'heure actuelle de données très accessibles sur l'emploi de BFUP vis-à-vis des problèmes de pénétration.

Comme pour les matériaux cimentaires en général, les vitesses de déformation élevées entraînent, pour le milieu poreux qu'est le béton, une augmentation de la résistance en traction et en compression, le fluide visqueux (l'eau) contenu dans les pores du béton s'opposant pour une part importante à la déformation imposée du squelette [1.34].

Il a été démontré que pour les vitesses "courantes" des chocs et chargements accidentels sur les structures de génie civil (conduisant à des vitesses de déformation typiquement comprises entre 10^{-3} à 1 s^{-1}), ce phénomène conduit à des augmentations de résistance pouvant atteindre un facteur 2 en traction et un facteur 1,5 en compression. Compte tenu de cet ordre de grandeur, notamment en traction, il peut être intéressant de modéliser assez précisément le comportement dynamique du matériau, pour mieux en tirer parti dans des créneaux d'applications particuliers.

La description empirique simplifiée, qui s'applique à l'ensemble des bétons de 30 à 120 MPa, et se transpose aussi aux BFUP, correspond à une augmentation de résistance en traction linéaire par rapport au logarithme de la vitesse de sollicitation (prise comme constante dans les essais d'identification).

On trouve pour les BFUP connus une augmentation de f_{ij} de l'ordre de $0,8 \text{ MPa} / u \cdot \log_{10}$, la valeur courante pour les bétons classiques étant d'environ $0,7 \text{ MPa} / u \cdot \log_{10}$.

This data gives information about the impact strength of UHPFRC. Like most fibre-reinforced concretes, UHPFRC has a high energy-dissipation capacity, which is of interest when dynamic loads are involved. Moreover, because of its high tensile strength, cracking and structural integrity can be controlled even in the case of relatively strong impact. On the other hand no data on the use of UHPFRC for penetration problems is currently easily available.

As for cementitious materials generally, high rates of strain in a porous material such as concrete engender an increase in tensile and compressive strength since the viscous fluid (water) in the pores of the concrete puts up considerable opposition to imposed deformation of the skeleton [1.34].

It has been demonstrated that for "common" rates of accidental loading and impact on civil engineering structures (which amounts to strain rates between 10^{-3} and 1 s^{-1}), this phenomenon results in tensile strength increases of up to two times and compressive strength increases of 1.5 times. With these values, especially with regard to tensile strength, it is interesting to model the dynamic behaviour of UHPFRC quite precisely so that it can be put to full effect in special applications.

The empirical simplified description which applies to concretes with compressive strengths ranging from 30 to 120 MPa, and which can be transposed to UHPFRC, corresponds to a linear increase in tensile strength versus a logarithmic increase in load rate (considered to be constant in identification tests).

For known UHPFRCs, the tensile strength f_{ij} increases by about $0.8 \text{ MPa} / \log_{10}$ unit, compared to $0.7 \text{ MPa} / \log_{10}$ unit for conventional concretes.

On note que ce mécanisme "visqueux" est prépondérant par rapport à des phénomènes d'inertie locale s'opposant à la propagation très rapide des fissures, et qui conduisent à des augmentations apparentes de résistance bien supérieures, aux vitesses de déformation très élevées qu'on atteint dans les problèmes de pénétration par exemple. Pour les bétons de fibres, l'augmentation de résistance de la matrice intervient directement sur la résistance en compression et sur la limite de fissuration, et indirectement dans la partie post-pic en traction, puisque l'arrachement progressif des fibres qui couture une fissure mobilise la résistance de la matrice environnante. Dans cette phase post-pic cependant, la matrice où s'effectue l'ancrage est déjà a priori endommagée, d'où une augmentation moins importante sur la contrainte post-fissuration que sur la résistance proprement dite. Ainsi pour les BFUP, les données fournies ci-après à titre d'exemple, indiquent une augmentation de σ_{bt} de l'ordre de $0,5 \text{ MPa} / u \cdot \log_{10}$.

Les résultats publiés actuellement sur les BFUP [1.37], [1.31], [1.35] ont été obtenus sur un "BPR 200" (matériau repris actuellement dans la gamme Ductal[®]) et confirment l'analyse ci-dessus. On en donne un récapitulatif dans le tableau 1.2 ci-dessous et des détails plus complets, avec notamment des courbes $\sigma(w)$ en statique et en dynamique dans différentes orientations, dans la référence [1.37] et en annexe 5.

It can be seen that this "viscous" mechanism outweighs local-inertia phenomena opposing very rapid crack propagation and resulting in much higher apparent strength increases at the very high rates of deformation encountered in penetration problems, for example. For fibre-reinforced concrete, the increase in the strength of the matrix has a direct effect on the compressive strength and on the cracking point, and an indirect effect on the post-peak tensile strength since the progressive pull-out of the fibres stitching cracks together mobilizes the strength of the surrounding matrix. However, in this post-peak phase, the matrix in which the fibres are anchored is presumably already damaged, whence a smaller increase in the post-cracking stress than in strength generally. Thus for UHPFRC, the data given below as an example indicates that the post-cracking tensile strength s_{bt} increases by about $0,5 \text{ MPa} / \log_{10}$ unit.

The results concerning UHPFRC which have been published to date [1.37], [1.31], [1.35] were obtained with a "BPR 200" concrete (part of the Ductal^a range); they confirm the above analysis. They are summed up in Table 1.2 below, and fuller details—particularly with $s(w)$ curves for static and dynamic situations, in different directions—can be found in reference [1.37] and in annex 5.

	Valeur quasi-statique de référence (0,05 MPa/s) <i>Quasi-static reference value</i>	Variation avec la vitesse <i>Variation with loading rate</i>
Résistance en traction <i>Tensile strength</i>	8 MPa	+ 0,8 MPa / u. log.
Contrainte seuil éq. pour une ouverture de fissure de 1 mm <i>Equivalent stress for 1 mm crack width</i>	7 MPa	+ 0,5 MPa / u. log.
Module d'Young <i>Modulus of elasticity</i>	52 000 MPa	env. + 450 MPa / u. log.

Tableau 1.2 (d'après Réf [1.37]) : Caractéristiques de calcul pour le BPR des conteneurs, déduites de la caractérisation en traction directe à différentes vitesses

Table 1.2 (after Ref [1.37]) : Design characteristics of reactive-powder concrete for waste containers, deduced from the characterization of direct tensile performance at different loading rates

Une méthodologie de calcul a été définie et validée pour les BFUP, par comparaison avec les résultats sur une structure modèle à échelle réduite, assimilant le comportement en traction à un comportement élasto-plastique parfait. Cette méthodologie peut être transposée à différents cas de calcul au choc qui présenteraient un intérêt dans telle ou telle perspective d'utilisation des BFUP. Dans le cas étudié, pour lequel une étude de sensibilité détaillée a été conduite [1.31], les principaux paramètres du matériau intervenant de façon importante sur le résultat de tenue au choc sont :

A methodology for calculation of UHPFRC mixes has been defined and validated by comparing it with the results obtained on a scale model, assimilating tensile behaviour to perfect elastoplastic behaviour. This methodology can be transposed to different cases of impact calculation which would be of some interest for different uses of UHPFRC. In the case studied, for which a detailed sensitivity study was carried out [1.31], the main parameters of the material with a major effect on impact strength are:

- la capacité de dissiper de l'énergie par plastification et endommagement dans la zone d'écrasement local sous l'impact, sous un état de contrainte fortement triaxial,
- la courbe de résistance en traction caractéristique dans les directions principales de la coque.
- *the capacity to dissipate energy by plastification and damage in the zone where local crushing occurs under impact, in a highly triaxial state of stress,*
- *the characteristic tensile strength curve in the main directions of the container shell.*

Un premier calcul (avant fissuration) utilise une résistance "de type f_{tj} ", il convient alors de vérifier que les déformations restent inférieures à une limite correspondant à l'initiation des fissures. Un deuxième calcul (décrivant une possible fissuration en traction) utilise une résistance "de type σ_{btu} ", il convient alors de vérifier que les déformations restent limitées à une valeur correspondant à l'ouverture de fissure limite spécifiée. Pour ces deux types de grandeurs caractéristiques en dynamique, les paramètres caractéristiques de "l'effet de vitesse" ont été identifiés expérimentalement, et le calcul aux éléments finis 3D a donné une bonne représentation des phénomènes observés.

1.10. Etude, fabrication et mise en œuvre des BFUP

1.10.1 Prescriptions générales

Grâce à l'emploi d'adjuvants tels que les plastifiants-réducteurs d'eau, et les superplastifiants-fluidifiants, les formules de BFUP présentent généralement un faible rapport eau sur liant $E_{eff} / (C+kA)$.

La maîtrise des quantités d'eau apportées dans le béton par les différents constituants fait l'objet d'une attention particulière (eau d'ajout, eau absorbée par les granulats, eau des adjuvants).

L'utilisation des BFUP est faite sous la forme de formulation pré-mélangé à sec ou à partir de constituants séparés comme pour les BHP courants. Dans tous les cas un soin particulier doit être apporté au suivi de la régularité des constituants.

D'une façon générale la composition des BFUP suit la démarche suivante :

- établissement de la formulation nominale par le biais d'essais d'étude,
- confirmation de la formulation par des essais de convenance,
- suivi de fabrication par des essais de contrôle.

A first analysis (before cracking) uses a "type f_j " strength, and it should therefore be checked that deformation stays below the point at which cracking is initiated. A second analysis (describing possible tensile cracking) uses a "type σ_{btu} " strength, and it should therefore be checked that deformation stays below a value corresponding to the specified limit crack width. For these two kinds of characteristic dynamic quantities, the characteristic values describing "rate effects" have been identified through testing, and 3D finite-element analysis has given a good representation of the phenomena observed.

1.10. Design, mixing, and placement of UHPFRC

1.10.1 General requirements

Due to the use of admixtures such as plasticizers/water reducers and superplasticizers, UHPFRC mixes generally have a low water-binder ratio, $E_{eff} / (C+kA)$.

Special attention should be paid to controlling the quantities of water added to the concrete by the different ingredients (mix water, water in aggregate and admixtures).

UHPFRC is used either in the form of premixed dry ingredients or as separate ingredients, in the same way as standard HPC mixes. In all cases the regularity of the ingredients provided must be carefully monitored.

Generally speaking, the mix design of UHPFRC should follow the following procedure:

- *establish the nominal mix design on the basis of design studies,*
- *confirm the mix design by means of suitability tests,*
- *follow-up manufacture by means of routine checks.*

1.10.2 Composition

La formule nominale d'un BFUP est fixée pour obtenir un mètre cube de béton en œuvre.

Elle est proposée par le fournisseur qui s'engage sur une approche performancielle répondant au cahier des charges.

La composition rendue contractuelle est définie :

- soit par la quantité de prémix, d'adjuvants complémentaires, d'eau et de fibres, dans le cas de BFUP avec prémélange des poudres,
- soit la quantité de chaque composant dans le cas d'absence de prémélange.

Dans ce dernier cas, la formule nominale indique :

- la dénomination et le poids des diverses catégories de granulats (matériaux secs),
- la dénomination et le poids du ciment (avec indication de la quantité de fumée de silice dans le cas d'un ciment pré-dosé en fumée de silice),
- la dénomination et le poids sec de chaque addition (fumée de silice, filler, cendres volantes, laitier),
- le volume total d'eau : volume d'eau de gâchage plus volume d'eau apporté par les différents constituants (granulats, additions éventuelles, adjuvants),
- la dénomination et le poids d'extraits secs des adjuvants éventuels.
-

1.10.3 Fabrication des BFUP

Tolérances sur les Prémix

Les tolérances sur le Prémix sont fixées et contrôlées conformément à la fiche qualité du producteur qui doit accompagner chaque lot livré.

1.10.2 Mix design

A UHPFRC nominal mix design is defined to obtain one cubic metre of concrete in place.

It is proposed by the manufacturer who commits to performance-based requirements corresponding to the contract specifications.

The contractually-binding mix design is defined:

- *either by the overall quantity of premix, supplementary admixtures, water, and fibres in the case of UHPFRC made from premixed ingredients,*
- *or by the quantities of the individual ingredients in the case of UHPFRC made without premixed ingredients,*

In the latter case, the nominal mix design gives:

- *the designation and weight of each class of aggregates (dry ingredients),*
- *designation and weight of cement (indicating the quantity of silica fume in the case of a cement with premixed silica fume),*
- *designation and dry weight of each addition (silica fume, filler, flyash, slag),*
- *total volume of water: volume of mix water and volume of water in each ingredient (aggregate, any additions, admixtures),*
- *designation and weight of dry extracts of any admixtures.*

1.10.3 Production of UHPFRC

Tolerances for premix

Tolerances for premix are determined and checked in accordance with the manufacturer's quality sheet which must come with each batch delivered.

Il est recommandé d'effectuer des prélèvements conservatoires sur chaque fourniture.

Tolérances sur les matières premières

La qualité des matériels de dosage et les méthodes de conduite doivent permettre de satisfaire une tolérance de $\pm 2\%$ de chaque composant pesé.

Pour les épreuves d'étude, ces tolérances devraient être réduites sur les poudres à $\pm 1\%$ si le fournisseur de prémélange sec est capable de garantir cette précision sur chaque constituant entrant dans le prémix lors de sa fabrication.

Exigences particulières sur la matériel de fabrication

Dans le cas de formulation sans prémélange à sec, des mesures de teneur en eau des sables, des gravillons et cailloux sont effectuées régulièrement pour permettre la correction des quantités d'eau à introduire.

La saturation, sans excès d'eau, des gravillons et cailloux peut faciliter une meilleure maîtrise de la teneur en eau.

Les balances ont des portées appropriées à la capacité nominale C exprimée en m^3 du malaxeur. Les portées (en tonnes) sont inférieures à :

- pour les granulats, ciment, eau, ou prémix, une valeur permettant d'obtenir une précision de $\pm 2\%$
- fumée de silice pesée séparément : $0,1 C$
- autre addition pesée séparément : $0,15 C$
- ciment et une ou plusieurs additions pesées simultanément (dans ce cas, le ciment est introduit en premier sur la balance) : $0,6 C$

It is recommended that samples of each delivery be conserved.

Tolerances for raw materials

The quality of the batching plant and the way it is used should enable it to meet a tolerance of $\pm 2\%$ for each weigh-batched ingredient.

For powders these tolerances should be reduced to $\pm 1\%$ at the design-test stage if the premix manufacturer is able to guarantee this accuracy for each ingredient going into the premix.

Special requirements for batching plant

In the case of a mix design not using premixed dry ingredients, measure the water content of sand and other aggregates at regular intervals so that the quantities of mix water to be added can be corrected.

Saturation (without excess water) of coarse aggregates (as opposed to sand) can facilitate better control of water content.

The measuring range of weigh batchers should be consistent with the nominal capacity C of the mixer in cubic metres. Measuring ranges (in tonnes) should be less than:

- aggregate, cement, water, a value allowing to obtain a precision of $\pm 2\%$ of mass for each ingredient
- silica fume weighed separately: $0.1 C$
- other addition weighed separately: $0.15 C$
- cement and one or more other additions weighed together (in this case, the cement is put on the weigh batcher first): $0.6 C$

1.10.4 Transport des BFUP

La durée entre la fabrication du BFUP et sa mise en place doit rester compatible avec, d'une part les moyens de production et de mise en œuvre, et d'autre part les conditions de vibration.

Aucun ajout d'adjuvant ou d'eau n'intervient après la fabrication du béton.

1.10.5 Mise en œuvre des BFUP

Mise en œuvre - Vibration

La mise en œuvre des BFUP est à faire avec précautions compte tenu de la fluidité de certains d'entre eux (auto-plaçants).

Des hauteurs de chute supérieures à 0,50 m ne sont pas recommandées. Si celles-ci ne peuvent être évitées, il convient de mener une étude justificative préalable démontrant la non ségrégation des fibres de la pâte de ciment et l'absence de formation d'oursins. Les moyens de vibration doivent être adaptés à la fluidité et à la consistance particulière des BFUP.

Un coulage en continu est également recommandé. Dans le cas d'un phasage discontinu avec interruptions de bétonnage, ou d'un délai important entre coulages successifs, une croûte superficielle est susceptible de se former en surface de la dernière couche coulée. La dessiccation de surface doit être évitée et un mariage des couches doit alors être effectué (par piquage ou autres) afin d'assurer la continuité des fibres.

Bétonnage par temps froid

Lorsque la température extérieure descend au-dessous de + 5°C, tout bétonnage est déconseillé sauf dispositions spéciales telles que:

1.10.4 Transport of UHPFRC

The time between batching of UHPFRC and completion of placement must be consistent with, on one hand, the batching and placing plant, and on the other, with the vibration conditions.

Neither water nor admixtures may be added after concrete batching.

1.10.5 UHPFRC placement

Placement - Vibration

UHPFRC should be placed with care, given the flowability of some mixes (self-compacting).

Drop heights in excess of 0.50 m are not recommended. If these drops cannot be avoided, it is recommended that a substantiative study be carried out beforehand to demonstrate that there is no segregation of fibres from the cement paste nor formation of fibre clusters. Vibration systems should be adapted to the fluidity and special consistency of UHPFRC.

It is also recommended that concrete be poured without interruption. In the case of a discontinuous process with interruptions of concreting, or in the case of along delay between two batches, a skin may form on the surface of the last concrete layer poured. Surface dessiccation must be avoided and concrete layers must be joined together (by raking the interface surface for example) to ensure fibre continuity.

Concreting in cold weather

When the outdoor temperature falls below + 5°C, it is not recommended that any concreting be done unless special arrangements are made, such as:

- réchauffage des granulats et/ou de l'eau de gâchage,
- utilisation de coffrages en bois épais ou isolé,
- utilisation d'un adjuvant accélérateur de prise et de durcissement.

Lorsque la température extérieure est comprise entre + 5°C et + 10°C au moment du bétonnage, des éprouvettes d'information sont confectionnées pendant le bétonnage, et sont conservées dans des conditions climatiques identiques à celles de l'ouvrage. Une éprouvette est testée en compression juste avant le décoffrage qui n'est autorisé que si la résistance le permet et l'opération est répétée si nécessaire.

Tous les produits doivent être stockés conformément aux prescriptions des fournisseurs.

Lorsque la température extérieure est supérieure à 35°C, des précautions particulières doivent être prises pour éviter des températures trop importantes au cœur des pièces. Ces précautions sont analogues aux dispositions qui peuvent être retenues pour des bétons classiques (refroidissement de l'eau de gâchage, ...).

Cure du béton

La cure des BFUP doit être systématique et particulièrement soignée, en raison d'un ressuage très faible à inexistant.

Les dispositions retenues doivent être validées par les épreuves de convenance.

La cure des reprises est systématique : elle doit empêcher notamment la dessiccation du béton avant sa prise, et sa micro-fissuration pendant la prise. Elle doit être soignée et validée par une épreuve de convenance spécifique.

- *heating of aggregate and/or mix water,*
- *use of thick timber or insulated forms,*
- *use of setting and hardening accelerators.*

When the outdoor temperature is between + 5°C and + 10°C at the time of concreting, 3 follow-up specimens should be made during concreting and kept in climatic conditions identical to those of the works. The compressive strength of one specimen should be tested just before the forms are to be struck, striking being authorized only if the concrete strength is suitable. The other specimens are used to repeat the test subsequently, if necessary.

All the products must be stored in accordance with the supplier's instructions.

When the outdoor temperature is higher than 35°C, special precautions should be taken to avoid high temperatures inside thick components. These precautions are similar to those which can be adopted for conventional concretes (cooling of mixing water, etc.).

Concrete curing

Special attention should be paid to the curing of UHPFRC because of its very low—or even complete absence of—bleeding.

Measures adopted must be validated by concrete suitability tests

Construction joints should be systematically cured, particularly in order to prevent the concrete drying out before it has set and micro-cracking as it sets. Curing must be carried out with care and the process must be validated by a special concrete suitability test.

1.10.6 Epreuves

Epreuve d'étude

Pour les matériaux connus disposant d'une carte d'identité chez le fournisseur (cas par exemple de formules disponibles en pré-mélange à sec), les épreuves d'étude se réduisent à la fourniture au client de l'ensemble des résultats d'essais récents permettant de justifier les caractéristiques annoncées dans la fiche d'identité du produit. Si certaines spécifications imposées par le marché ne sont pas justifiées dans les fiches du produit, des essais spécifiques sont réalisés pour répondre à la commande.

Outre le rappel de la composition prévue et des tolérances envisageables sur les divers constituants, les épreuves d'études ont pour objectifs de vérifier que la formule nominale du béton permet de satisfaire les spécifications du marché.

Les éléments de base exigés lors de ces études sont les suivants :

- courbe de comportement en compression (résistance caractéristique, module, et allongement à rupture),
- courbe de comportement en traction (valeur de f_{ij} et loi de comportement post-fissuration),
- densité, coefficient de dilatation thermique, valeurs du retrait, et du fluage.

D'autres exigences particulières peuvent être imposées :

- résistance au gel dégel,
- résistance au feu,
- mesure directe de chaux libre et pH à cœur.

Les épreuves d'études peuvent par ailleurs vérifier que l'ensemble des exigences sont encore respectées si les proportions des constituants atteignent les valeurs limites tolérées compte-tenu des moyens prévus pour la mise en oeuvre. Dans ce cas, il est possible d'effectuer à partir de la formule nominale deux formulations dérivées :

1.10.6 Tests

Design test

For a well known UHPFRC with a full "identity card" (this is the case of materials commercially available in the form of premixed bags of dry ingredients), design tests amount to giving the client all the recent test results substantiating the characteristics indicated on the product identity card. If any of the contractual requirements are not substantiated in the product ID card, special tests corresponding to the contract specifications should be carried out.

The purpose of design tests is to mention the proposed mix design and tolerances for the different ingredients but also to check that the nominal mix design meets the contract specifications.

The basic data required during design testing is:

- compressive strength curve (characteristic strength, modulus of elasticity, elongation at fracture)
- tensile strength curve (f_{ij} value and post-cracking constitutive law),
- density, thermal expansion coefficient, creep and shrinkage values.

Other specifications may be imposed :

- *resistance to freeze/thaw*
- *fire resistance*
- *direct measurement of free lime and internal pH.*

The purpose of design testing is also to check that the contract requirements are still met if, taking account of the expected conditions of site placement, the proportions of any ingredients reach the tolerated limit values.

In this case, it is proposed that two mixes derived from the nominal mix design be batched, varying ingredients by the full amount of the applicable tolerances:

- l'une pour laquelle on ajoute une fois la tolérance à chaque constituant solide et on retranche une fois la tolérance à chaque constituant liquide,
- l'autre pour laquelle on ajoute une fois la tolérance à chaque constituant liquide et on retranche une fois la tolérance à chaque constituant solide.

La liste des essais exigés dans le cadre des épreuves d'étude de la centrale de Cattenom est donnée à titre d'exemple dans les tableaux 1 et 2 de l'annexe 6. Les essais effectués sont ceux du tableau 3 de la même annexe.

L'épreuve d'étude est considérée comme probante si les conditions suivantes sont toutes remplies :

- tous les résultats de consistance sont dans la fourchette requise,
- les résultats des essais de résistance à la compression et la traction vérifient les exigences décrites ci-dessous :

A / Réception des essais de résistance à la compression

- la moyenne arithmétique (f_{cE}) des 3 essais (neuf mesures) de résistance à la compression à 28 jours (ou plus tôt, le cas échéant, lorsqu'un traitement thermique a été effectué), effectués sur les gâchées répondant à la formule nominale, satisfait aux conditions suivantes :

$$f_{cE} \geq f_{c28} + C_E - (C_{moy.} - 3 S)$$

$$f_{cE} \geq 1,1 f_{c28}$$

Dans ces inégalités (les valeurs étant exprimées en MPa):

- f_{c28} est la valeur caractéristique requise de la résistance à la compression à 28 j,
- C_E est la résistance à la compression à 28 jours du ciment utilisé pour l'épreuve d'étude,
- $C_{moy.}$ est la valeur moyenne de la résistance à la compression à 28 jours du ciment, observée par le fournisseur au cours des six mois précédant l'épreuve d'étude,

- *add the tolerance for each solid ingredient and deduct the tolerance for each liquid ingredient,*
- *add the tolerance for each liquid ingredient and deduct the tolerance for each solid ingredient.*

The list of the tests required during the design tests of Cattenom nuclear power plant is given (for information only) in Tables 1 and 2 of annex 6. The tests to be carried out are those of Table 3 in the same annex.

The design study is considered to be conclusive if all the following conditions are met:

- *all the consistency results are in the required range,*
- *results of the compressive-strength and tensile-strength tests meet the following conditions:*

A / Acceptance of compressive strength tests

- *the arithmetic mean (f_{cE}) of the three compressive-strength tests (nine measurements) carried out on batches corresponding to the nominal mix design at 28 days or after heat treatment, where applicable, meet the following conditions:*

$$f_{cE} \geq f_{ck} + C_E - (C_{mean} - 3 S)$$

$$f_{cE} \geq 1.1 f_{ck}$$

In these inequalities (values expressed in MPa):

- *f_{ck} is the required characteristic value for 28-day compressive strength,*
- *C_E is the 28-day compressive strength of the cement used for the design test,*
- *C_{mean} is the mean 28-day compressive strength of the cement observed by the manufacturer over the six months prior to the design test,*

- S est l'écart type des valeurs utilisées pour déterminer C_{moy} .

B/ Réception des essais de résistance à la traction

A partir des résultats d'essais corrigés en fonction des effets de bord et de la taille des éprouvettes, on détermine la courbe caractéristique de comportement en traction en appliquant la loi de Student avec un fractile de 5% (cf. AFREM [1.1]) sur l'ensemble des essais réalisés dont le nombre doit être supérieur ou égal à six. La courbe caractéristique ainsi obtenue doit être supérieure ou égale à la loi de comportement prise en compte dans les calculs de l'ouvrage.

Epreuve de convenance

L'épreuve de convenance est effectuée dans le but de vérifier que le béton fabriqué en application de la formule nominale avec les matériaux et les matériels du chantier est dans les tolérances des épreuves d'études.

Trois gâchées de béton correspondant à la formule nominale donnent lieu à des prélèvements et essais identiques définis dans le tableau 3 de l'annexe 6. Les résultats de ces essais sont jugés satisfaisants pour la résistance en compression si les deux inégalités suivantes sont remplies

$$f_{CE} \geq f_{c28} + C_E - (C_{moy} - 2S)$$

$$f_{CE} \geq 1,1 f_{c28}$$

L'épreuve de convenance comprend en outre la réalisation d'un élément témoin représentatif de l'ouvrage réel, et qui permet de valider les éléments suivants :

- la méthodologie de mise en œuvre, et les dispersions attendues sur l'orientation des fibres (coefficient K),
- les dispositions prévues pour réaliser la cure du béton,
- les dispositions prévues pour préparer les zones de reprise de bétonnage éventuelles,

- *S is the standard deviation of the values used to determine C_{mean} .*

B / Acceptance of tensile strength tests

From test results corrected for edge effects and specimen sizes, the characteristic tensile behaviour curve is determined by applying Student's law with a 5% quantile (see AFREM [1.1]) to all the tests (at least six). The characteristic curve obtained must be no lower than the constitutive law used for the structural calculations.

Suitability test

The suitability test is carried out to check that the concrete produced using the nominal mix design and the materials and equipment of the site falls within the tolerances of the design tests.

Three concrete batches corresponding to the nominal mix design will provide test specimens for identical testing as defined in Table 3 of annex 6. The results of these tests are deemed to be satisfactory if the following two inequalities are true:

$$f_{CE} \geq f_{ck} + C_E - (C_{mean} - 2S)$$

$$f_{CE} \geq 1.1 f_{ck}$$

The suitability test also includes manufacture of a representative mockup of the actual structure in order to validate the following requirements:

- *placement methodology and the expected disparity of fibre orientation (K factor),*
- *proposed methods for concrete curing,*
- *proposed methods for preparing any construction joints,*

- la mise en œuvre correcte du matériau dans les zones éventuelles de forte densité d'armatures ou de géométrie complexe,
- éventuellement la conformité des parements à la qualité requise,
- éventuellement l'absence de problèmes dans les zones d'efforts concentrés de diffusion de précontrainte,
- l'obtention des tolérances dimensionnelles et d'enrobage.

Pour déterminer le coefficient K relatif à la dispersion sur l'orientation des fibres, des prélèvements sont réalisés dans l'élément témoin suivant un plan de découpage défini en fonction de l'orientation des sollicitations principales étudiées.

Les essais de caractérisation de la résistance en traction réalisés sur ces prélèvements, une fois corrigés des effets de bord et des effets d'échelle liés à la taille des éprouvettes, sont comparés aux résultats obtenus sur des éprouvettes coulées en même temps que l'élément témoin.

L'analyse de la dispersion obtenue sur les valeurs extrêmes, et sur les valeurs moyennes dans une direction principale de sollicitation, donne les valeurs locale et globale du coefficient K à prendre en compte dans les calculs de la structure.

A titre d'exemple, le détail de cette démarche appliquée aux ouvrages expérimentaux de Bourg-lès-Valence est fourni en annexe 8.

- *concrete placement methods in areas with dense reinforcement or of complex shape,*
- *as required, conformity of the facing with the required quality,*
- *as required, absence of problems in areas with concentrated prestress force distribution.*
- *compliance with tolerances on dimensions and reinforcement cover*

To determine the K factor representing disparity in fibre orientation, samples are taken from the mockup along the directions of principal stress.

Tensile strength characterization tests carried out on these samples—corrected for edge effects and scale effects due to specimen sizes—are then compared to the results of tests carried out on test specimens cast at the same time as the mockup.

Analysis of the scatter of extreme values and mean values along one direction of principal stress gives the local and global value of the K factor to be taken into account in structural analysis.

An example of such an analysis carried out on the innovative Bourg-lès-Valence works is given in annex 8.

Epreuve de contrôle

Prélèvements - Essais

L'épreuve de contrôle constitue le contrôle de conformité du béton aux spécifications du projet. Elle est réalisée sur des prélèvements de béton frais effectués au moment de l'utilisation du béton, au point le plus près possible de sa mise en œuvre dans l'ouvrage, par exemple au déversement du camion mélangeur.

Il est effectué au minimum un prélèvement par 10 m³ de béton.

A partir de ce prélèvement, sont réalisés :

- une mesure de consistance ,
- un essai de détermination de la résistance à la compression à 28 j ; le résultat retenu est pris égal à la moyenne arithmétique des mesures effectuées sur trois éprouvettes,
- les essais de détermination de la résistance en traction, réalisés sur au moins six éprouvettes,
- les essais relatifs aux autres caractéristiques requises.

Critères de conformité

Consistance :

Le béton est réputé conforme si le résultat de l'essai de consistance se trouve dans la fourchette requise.

Si le résultat sort de la fourchette, la gâchée correspondante est éliminée et la gâchée suivante fait l'objet d'un prélèvement pour un nouvel essai.

Si le résultat sort encore de la fourchette, le bétonnage est arrêté jusqu'à la détermination des causes de la non-conformité et la modification des réglages.

Routine checks

Sampling - Testing

Routine checks are a means of checking that the concrete conforms to the project specifications.

They are carried out on samples of fresh concrete taken as the concrete is placed, as close as possible to where it is placed in the works, for example as it is discharged from the truck mixer.

At least one sample should be taken from every 10 m³ of concrete.

Each sample is used for:

- *one consistency measurement,*
- *one 28-day compressive strength test; the result used is the arithmetic mean of the measurements on three specimens,*
- *tensile strength tests made on at least six specimens,*
- *tests for the other required characteristics.*

Conformity criteria

Consistency:

The concrete is deemed to be conform if the result of the consistency test is within the required range.

If the result is outside the range, the corresponding batch should be rejected and a sample taken from the following batch for another test.

If the second result is still outside the range, concreting should be stopped until the causes of non-conformity have been identified and adjustments made.

Résistance à la compression :

a) Pour un ouvrage déterminé, à chaque essai relatif à un béton d'une composition donnée, trois conditions doivent être simultanément remplies :

- $S \leq 10 \% f_{c28}$
- $f_c \geq f_{c28} + 1,3 S$
- $f_{cl} \geq f_{c28} - 7,5$

Dans ces inégalités (les valeurs étant exprimées en MPa) :

- f_c est la moyenne arithmétique de dix résultats de la résistance à la compression à 28 j se rapportant au béton de l'ouvrage considéré : résultat de l'essai en cause et des neuf essais antérieurs,
- f_{c28} est la valeur requise de la résistance caractéristique,
- f_{cl} est la valeur de la résistance à la compression à 28 j donnée par l'essai en cause,
- S est l'écart type des dix résultats précités.

b) Pour le suivi du bon fonctionnement de la centrale à béton, on applique les inégalités précitées, en considérant les résultats correspondants à dix prélèvements consécutifs d'un béton de composition donnée, quel que soit l'ouvrage auquel ce béton est destiné.

Si l'une des trois conditions n'est pas remplie, le fonctionnement de la centrale est présumé défectueux et l'on recherche la cause pour y remédier.

c) Dans les deux cas, au début des travaux, quand le nombre de résultats est inférieur à 10, la deuxième inégalité est appliquée en remplaçant $1,3 S$ par S .

Pour les pièces en BFUP soumises à traitement thermique, les essais sont réalisés sur des cylindres soumis au même traitement, à une échéance éventuellement inférieure à 28 jours. Les mêmes vérifications sont effectuées.

Compressive strength:

a) For a given structure, three conditions must be met simultaneously for each test concerning a particular concrete mix design:

- $S \leq 10 \% f_{ck}$
- $f_c \geq f_{ck} + 1.3 S$
- $f_{cl} \geq f_{ck} - 7.5$

In these inequalities (values are in MPa):

- f_c is the arithmetic mean of ten 28 day compressive strength tests concerning the concrete of the works concerned: result of the test in question and of the nine previous test,
- f_{ck} is the required characteristic strength,
- f_{cl} is the 28-day compressive strength given by the test concerned,
- S is the standard deviation of the ten results referred to above.

b) To monitor the correct operation of the batching plant, apply the above inequalities, considering the results for ten consecutive samples of a concrete of a given mix design, irrespective of the works for which the concrete is intended.

If any of these three conditions is not met, assume the operation of the batching plant to be defective, and seek out and remedy the cause.

c) In both cases, at the start of works, when the number of results is less than ten, apply the second inequality with S instead of $1.3 S$.

In the case of heat-treated UHPFRC parts, carry out test on cylinders which have also been treated in exactly the same way, possibly at less than 28 days. Carry out the same checks.

Résistance à la traction :

La courbe de résistance caractéristique à la traction obtenue à partir d'une exploitation des résultats d'essais doit être supérieure en tout point à la loi de comportement prise en compte dans les calculs.

Tensile strength :

The characteristic tensile behaviour curve obtained from test results must at all points be higher than the constitutive law used for the structural calculations.

PARTIE 2

METHODE DE DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES

2.1. Généralités

Les méthodes de dimensionnement exposées ci-après s'appuient sur le plan du BPEL [2.3], mais le cas échéant, les articles du BAEL [2.2] sont également transposés dans le texte dans les cas où cela est nécessaire.

Les articles inchangés du BPEL non utiles à la compréhension des modifications ne sont pas repris, la mention "Pas de modification" est alors précisée.

Les articles subissant des modifications sont repris intégralement en incluant les parties de texte inchangées du BPEL.

Dans les justifications qui suivent, le comportement en traction des BFUP est caractérisé par une courbe intrinsèque en traction caractéristique dont la détermination expérimentale a été définie dans la partie 1.

Les calculs peuvent être faits en utilisant une loi $\sigma-w$ selon la méthode AFREM [2.1] (la loi intrinsèque en traction peut alors être prise comme une courbe lissée définie point par point) ou en $\sigma-\epsilon$ (la loi de comportement intrinsèque en traction peut alors être prise comme une courbe simplifiée linéaire par morceaux).

Prise en compte de la dispersion de la répartition des fibres

Les règles suivantes sont établies en supposant l'hypothèse d'isotropie dans la répartition des fibres au sein de la structure. Afin de couvrir la disparité réelle d'orientation des fibres due à la mise en œuvre, les différentes justifications sont affectée d'un "coefficient d'orientation" $1/K$. Pour chaque vérification, il est indiqué s'il convient de prendre en compte la valeur locale ou globale de ce coefficient.

PART 2

STRUCTURAL DESIGN METHODS

2.1. General

The design methods presented below are based on the French "BPEL" code [2.3] (limit state design of prestressed concrete structures), but, where applicable, articles from the "BAEL" code [2.2] (limit state design of reinforced concrete structures) have been transposed into this document.

Those articles of the BPEL which have remained unchanged and which are not necessary to understand the modifications are not given here; where this applies, it is indicated by the words "No change".

Articles which have been changed are given here in full, including the unchanged parts of the terms of the BPEL document.

In the design procedures which follow, the tensile behaviour of UHPFRC is characterized by an intrinsic curve for characteristic tension whose experimental determination is defined in Part 1.

The calculations can be performed using a $s-w$ law in accordance with the AFREM method [2.1] (the intrinsic tensile-strength law can then be taken as a smoothed curve defined point by point) or a $s-\epsilon$ law (the intrinsic tensile-strength law can then be taken as a simplified segmental linear curve).

Taking dispersion in fibre distribution into account

The following rules were drawn up assuming isotropic distribution of fibres throughout the structure. In order to allow for actual disparity in fibre orientation due to placement, the design formulae are allocated an "orientation coefficient" $1/K$. For each check, it is stated whether the local or global value of this coefficient should be taken into account.

En dehors de conceptions qui prévoient d'utiliser la résistance en traction dans des zones très ponctuelles, le coefficient local n'intéresse que les effets de diffusion de première régularisation (surface et éclatement), ainsi que l'effet de tirant de la bielle d'about en l'absence d'armatures, et dans le cas de dimensions réduites d'appareils d'appuis. Les effets de diffusion générale intéressent des zones de matériau de dimensions sensiblement égales à la taille des pièces étudiées, ce qui devrait permettre de s'affranchir des problèmes d'effets locaux sauf pour les pièces de dimensions modestes.

Si les méthodes de mise en œuvre sont justifiées sur la base de résultats d'essais sur un modèle représentatif de la structure réelle, le coefficient K est établi à partir des résultats d'essais avec une valeur minimale supérieure à 1.

Dans le cas d'un projet établi dans la perspective d'un tel processus de validation, le projeteur peut en première approche, utiliser les valeurs de K suivantes :

$K = 1,25$ pour l'ensemble des sollicitations en dehors des effets locaux

$K = 1,75$ pour les effets locaux

Pour les plaques minces, on adopte une loi de comportement de type σ - ε et la caractérisation du matériau sur un élément représentatif de la structure réelle permet de considérer $K = 1$.

Coefficient partiel de sécurité γ_{bf}

Un coefficient partiel de sécurité dénommé γ_{bf} relatif au béton fibré en traction a été introduit pour les vérifications aux ELU. Ce coefficient tient compte d'éventuels défauts de fabrication.

Sa valeur est la suivante (règles AFREM) :

$\gamma_{bf} = 1,3$ dans le cas de combinaisons fondamentales

$\gamma_{bf} = 1,05$ dans le cas de combinaisons accidentelles

Apart from designs which propose to use tensile strength in very specific places, the local coefficient concerns only the effects of stress distribution in the lead length (surface and bursting) and the tie effect of the end-block compression strut if there is no reinforcement and in the case of small bearings. General stress-distribution effects concern zones of material of comparable size to the parts studied, which should make it possible to overcome problems of local effects, except for small parts.

If the placement methods are validated on the basis of the results of tests on a representative model of the actual structure, the K coefficient is determined from those results, with a minimum value greater than 1.

In the case of a project drawn up ahead of such a validation process, the designer may, as a preliminary measure, use the following K values:

$K = 1.25$ for all loading other than local effects

$K = 1.75$ for local effects

For thin plates, a σ - ε constitutive law is used, and characterization of the concrete with a representative element of the actual structure shows that $K=1$.

Partial safety factor \mathcal{G}_{bf}

A partial safety factor, \mathcal{G}_{bf} , for fibre-reinforced concrete under tension has been introduced in ULS verifications. It takes account of any manufacturing defects.

Its value is as follows (AFREM rules):

$\mathcal{G}_{bf} = 1.3$ in the case of fundamental combinations

$\mathcal{G}_{bf} = 1.05$ in the case of accident combinations.

2.2. Justifications sous sollicitations normales

Article 6.0 - Généralités

6.0,0 LONGUEUR CARACTERISTIQUE

La longueur caractéristique l_c est une grandeur permettant de passer de la loi de comportement de type $\sigma = f(w)$ (contrainte - ouverture de fissure), à la loi de comportement de type $\sigma = f(\epsilon)$ (contrainte - déformation), à titre de simplification des calculs.

On adopte :
$$\epsilon = \frac{f_{tj}}{E_{ij}} + \frac{w}{l_c}$$

La valeur de l_c dépend de la taille de la section. Pour une section rectangulaire ou en T é on peut prendre $l_c = \frac{2}{3} h$,

où h est la hauteur de la section.

6.0,1 TAUX MINIMAL DE FIBRES

Afin de garantir une ductilité suffisante du matériau en flexion, il faut vérifier le critère suivant sur la courbe intrinsèque du matériau $\sigma = f(w)$:

$$\frac{1}{3.10^{-4}} \int_0^{3.10^{-4}} \sigma(w) dw \geq \frac{f_{t28}}{2,5}$$

avec w ouverture de fissure exprimée en mètres.

Commentaires : Le coefficient 2,5 de ce critère permet de garantir pour une section rectangulaire que le moment de fissuration de la matrice cimentaire est bien inférieur au moment résistant intégrant la participation des fibres. Dans le cas de la traction pure, ce coefficient pourrait être pris égal à 1. Ce critère est normalement plus dimensionnant que la vérification de non-fragilité définie au 6.1,31 dans le cas de matériaux peu fibrés.

2.2. Normal force verifications

Article 6.0 - General

6.0,0 CHARACTERISTIC LENGTH

The characteristic length, l_c , is a quantity used to go from a constitutive law of the $\mathbf{s} = f(w)$ (stress - crack width) type to a constitutive law of the $\mathbf{s} = f(\epsilon)$ (stress - strain), type in order to simplify computation.

This gives:
$$\epsilon = \frac{f_{tj}}{E_{ij}} + \frac{w}{l_c}$$

The value of l_c depends on the sectional area. For a rectangular or tee cross section, a value of $l_c = \frac{2}{3} h$ can be used,

where h is the depth of the section.

6.0,1 MINIMUM FIBRE CONTENT

In order to guarantee sufficient flexural ductility, the following criterion must be applied to the intrinsic $\mathbf{s} = f(w)$ curve of the material:

$$\frac{1}{3.10^{-4}} \int_0^{3.10^{-4}} \sigma(w) dw \geq \frac{f_{t28}}{2,5}$$

where w is crack width in metres.

Comment: The coefficient 2.5 in this criterion guarantees that, for a rectangular section, the cracking moment of the cement matrix is less than the resisting moment integrating the contribution of fibres. In the case of pure tension, this coefficient could be 1. This design criterion is normally more critical—in the case of materials with low fibre contents—than the check of non-brittleness described in § 6.1,31.

Article 6.1 - Etats limites de service

6.1,1 HYPOTHÈSES DE CALCUL

Les calculs en section courante sont conduits moyennant les deux hypothèses fondamentales suivantes :

- les sections droites restent planes,
- les contraintes dans la zone de béton non fissurée sont proportionnelles à la déformation.

6.1,11 PRÉCONTRAİNTE ADHÉRENTE

Selon le type de vérification envisagé, les hypothèses complémentaires sont indiquées ci-après :

a) Calcul en section non fissurée :

- le béton tendu résiste à la traction,
- les matériaux ne subissent aucun glissement relatif.

Cette dernière hypothèse entraîne que les contraintes normales dues à toutes les actions autres que les actions permanentes peuvent être calculées sur la section entière homogénéisée.

On prendra alors $n_i = 4$, $n_v = 8$ sans traitement thermique et $n_v = 5$ avec traitement thermique.

b) Calcul en section fissurée :

- les matériaux ne subissent aucun glissement relatif,
- lorsque la déformation du béton s'annule au niveau d'une armature, la tension dans cette dernière vaut :

0 s'il s'agit d'une armature passive,
 $\sigma_{pd} + n_i \sigma_{bpd}$ (avec $n_i = 4$) s'il s'agit d'une armature de précontrainte, σ_{bpd} représentant la contrainte du béton, au niveau de l'armature considérée sous l'effet des actions permanentes et de la précontrainte prise avec la valeur P_d ,

Article 6.1 - Serviceability limit states

6.1,1 DESIGN ASSUMPTIONS

The analysis for standard sections is carried out with the following two fundamental assumptions:

- *plane sections remain plane,*
- *stresses in the uncracked part of the concrete are proportional to strains.*

6.1,11 PRE-TENSIONED PRESTRESS

The additional assumptions for different kinds of checks are given below.

a) *Calculation for uncracked section:*

- *the concrete withstands tensile stress,*
- *the constituent materials are subject to no relative slippage.*

The latter assumption means that normal stresses due to all actions other than permanent actions can be calculated for the entire section made uniform using equivalence ratios n_i and n_v .

In this case, it is assumed that $n_i = 4$ and $n_v = 8$ without heat treatment and $n_v = 5$ with heat treatment.

b) *Calculation for cracked section*

- *the constituent materials are subject to no relative slippage,*
- *when the strain of the concrete is eliminated at a reinforcement bar, the tension in the reinforcement is:*

*0 if it is passive reinforcement,
 $s_{pd} + n_i s_{bpd}$ (with $n_i = 4$) if it is prestressing reinforcement, s_{bpd} representing the concrete stress at the reinforcement considered, under the effect of permanent actions and prestress assumed to be P_d ,*

- la contrainte dans les aciers passifs aussi bien que la variation de surtension dans les aciers de précontrainte qui se manifestent après décompression du béton sont évaluées à partir du coefficient d'équivalence $n_v = 8$ sans traitement thermique et $n_v = 5$ avec traitement thermique.
- comportement du béton tendu :

On utilise la loi du béton ci-après, définie de la façon suivante :

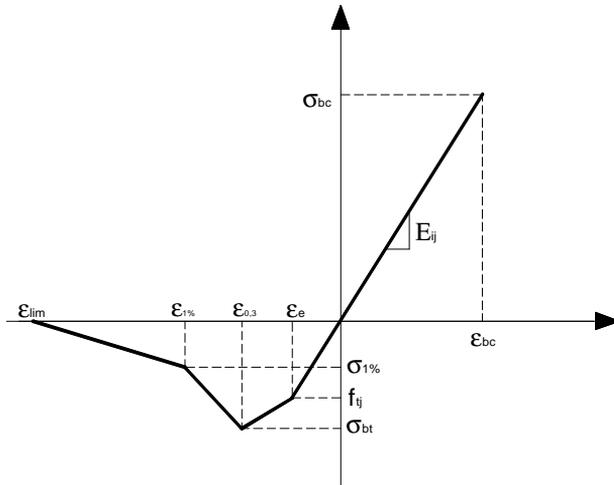
- les points caractéristiques sont déduits des essais décrits en Partie 1,
- la contrainte correspondant à une ouverture de fissure de 0,3 mm, $\sigma(w_{0,3})$, sur la loi caractéristique σ - w , est prise comme base de la résistance en traction post-fissuration du matériau fibré,
- la loi considérée est plafonnée à $\sigma(w_{0,3})$,
- la loi de calcul se déduit de celle expérimentale, dans le domaine post-fissuration, par une affinité de rapport $1/K$, parallèlement à l'axe des contraintes, où K est le coefficient d'orientation pour les effets généraux dans le cas d'éléments de coques, de dalles, ou de nervures larges, le coefficient pour effets locaux si on sollicite la résistance en traction des fibres dans des zones de dimension réduite (talon étroit d'une poutre en milieu de travée).

- *the stress in passive reinforcement and the variation of overstress in the prestressing reinforcement which appear after decompression of the concrete are evaluated from the equivalence coefficient $n_v = 8$ without heat treatment and $n_v = 5$ with heat treatment.*
- *behaviour of concrete under tension:*

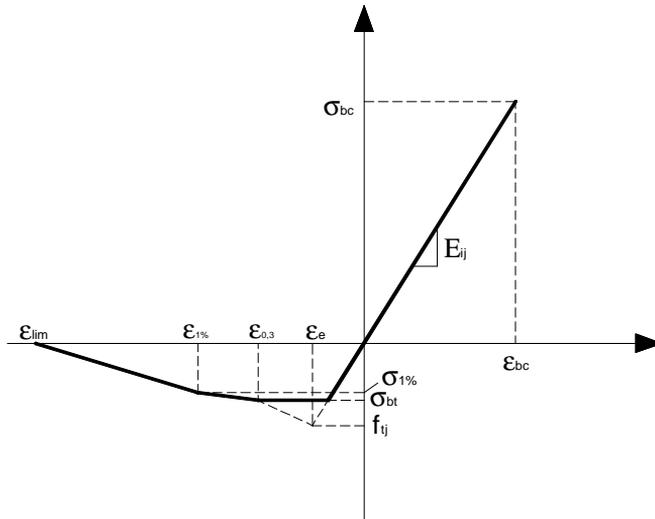
The concrete law shown below is used:

- *The characteristic points are deduced from the tests described in Part 1,*
- *The stress corresponding to a 0.3 mm crack width, $\sigma(w_{0,3})$, on the characteristic σ - w law is taken as the basis for fibre tensile strength,*
- *The law considered has a ceiling at, $\sigma(w_{0,3})$,*
- *The calculation law is deduced from the experimental law in the post-cracking range by means of affine transformation with a ratio of $1/K$, parallel to the stress axis, where K is either the orientation coefficient for general effects in shell elements, slabs, or broad ribs, or the coefficient for local effects if use is made of the tensile strength of fibres in small areas (narrow flange of a beam, at mid span).*

- Loi écrouissante - *Strain hardening law* :



- Loi adoucissante - *Strain softening law* :



avec :

- $\epsilon_e = \frac{f_{tj}}{E_{ij}}$
- $\epsilon_{0,3} = \frac{w_{0,3}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{E_{ij}}$, avec $w_{0,3} = 0,3 \text{ mm}$

where :

- $\epsilon_e = \frac{f_{tj}}{E_{ij}}$
- $\epsilon_{0,3} = \frac{w_{0,3}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{E_{ij}}$, with $w_{0,3} = 0.3 \text{ mm}$

- $\epsilon_{1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \frac{f_{ij}}{E_{ij}}$, avec $w_{1\%} = 0,01H$,

H étant la hauteur du prisme d'essai de flexion associé aux dimensions de la structure (Cf. 1.4.4)

- $\epsilon_{lim} = \frac{l_f}{4l_c}$, l_f étant la longueur d'une fibre
- l_c = la longueur caractéristique ($\frac{2}{3}h$ dans le cas général)
- $\sigma_{bc} = 0,6 f_{cj}$
- $\sigma_{bt} = \frac{\sigma(w_{0,3})}{K}$ et $\sigma_{1\%} = \frac{\sigma(w_{1\%})}{K}$, $\sigma(w)$ étant la courbe intrinsèque caractéristique du matériau,

6.1.12 CAS DES ARMATURES DE PRÉCONTRAİNTE NON ADHÉRENTES

Les hypothèses du BPEL sont reconduites en utilisant la loi du 6.1,11 b)

6.1.2 CLASSES DE VERIFICATION

Pour les sections courantes comportant de la précontrainte, les vérifications se répartissent en trois classes (classes I, II et III) auxquelles correspondent des contraintes limites des matériaux.

Pour les sections courantes ne comportant pas de précontrainte, armées ou non par des aciers passifs, les vérifications se font suivant une classe particulière nommée classe IV.

6.1.21 EXIGENCES COMMUNES AUX CLASSES I, II, III ET IV

Quelle que soit la classe de vérification retenue, les contraintes de compression du béton sont, en règle générale, limitées aux valeurs suivantes :

- 0,50 f_{c28} sous l'effet de la combinaison quasi permanente,
- 0,60 f_{c28} sous l'effet des combinaisons rares et des combinaisons fréquentes,

- $\epsilon_{1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \frac{f_{ij}}{E_{ij}}$, with $w_{1\%} = 0.01H$,

H being the height of the bending test specimen, in accordance with the structure dimensions (in § 1.4.4)

- $\epsilon_{lim} = \frac{l_f}{4l_c}$, l_f being the length of a fibre
- l_c = the characteristic length (generally $\frac{2}{3}h$)
- $\sigma_{bc} = 0.6 f_{cj}$
- $\sigma_{bt} = \frac{\sigma(w_{0.3})}{K}$ and $\sigma_{1\%} = \frac{\sigma(w_{1\%})}{K}$, $\sigma(w)$ being the characteristic intrinsic curve of the material,

6.1.12 CASE OF POST-TENSIONED PRESTRESSING REINFORCEMENT

The assumptions of the BPEL specifications are to be used, applying the law of § 6.1,11 b).

6.1.2 CLASSES OF CHECK

For standard sections with prestressing reinforcement, the checks may be one of three categories (classes I, II, and III) for different limit stresses of the materials.

For standard sections without prestressing reinforcement, whether or not they contain passive reinforcement, checks shall be performed in accordance with a special category (class IV).

6.1.21 COMMON REQUIREMENTS OF CLASSES I, II, III, AND IV

Irrespective of the class of check, compressive stress in the concrete is generally limited to the following values:

- 0.50 f_{ck} under the effect of the quasi-permanent combination,
- 0.60 f_{ck} under the effect of rare and frequent combinations,

- $0,60 f_{cj}$ en cours d'exécution, ramenée à $0,55 f_{cj}$ si j est inférieur à trois jours, sauf pour les pièces fabriquées industriellement faisant l'objet d'une procédure de contrôle interne approuvée par un organisme officiel de contrôle ou de certification. Dans ce cas, la contrainte limite de compression est fixée à une valeur comprise entre $0,6 f_{cj}$ et $2/3 f_{cj}$.

Dans le cas de pièces soumises à la fatigue, il y a lieu de limiter la contrainte de traction à :

- $\min(\sigma_{bt} ; f_{t28})$ sous les combinaisons fréquentes,
- $\min(\sigma_{bt} ; f_{ij})$ en construction, dans les zones ultérieurement tendues en service.

Commentaires : C'est en particulier le cas des ponts. Dans le bâtiment, cette limitation ne s'applique pas, sauf indication contraire du maître d'œuvre. Cette limitation permet de s'affranchir du calcul en fatigue. Cette condition n'est pas restrictive dans le cas des classes I et II. La limite retenue est établie conformément à la bibliographie sur les BFUP, les essais disponibles étant en nombre assez limité.

6.1,22 CLASSE I

Pas de modification

6.1,23 CLASSE II

Pas de modification

6.1,24 CLASSE III

Pas de modification

6.1,25 CLASSE IV

En classe IV, les contraintes normales sont calculées uniquement sur la section fissurée et en utilisant la loi du 6.1,11 b). Il y a lieu de vérifier que :

- en fissuration préjudiciable, la limite en traction des aciers est limitée à la valeur fixée dans le BAEL 99, article A.4.5,33
- en fissuration très préjudiciable, la limite en traction des aciers est limitée à la valeur fixée dans le BAEL 99, article A.4.5,34

- $0.60 f_{cj}$ during construction, reduced to $0.55 f_{cj}$ if j is less than 3 days, except for industrially manufactured parts subject to an internal production control procedure approved by an official control or certification body, in which case the limit compressive stress shall be between $0.6 f_{cj}$ and $2/3 f_{cj}$.

In the case of parts subject to fatigue, the tensile stress should be restricted to:

- $\min(\sigma_{bt} ; f_{t28})$ for frequent combinations,
- $\min(\sigma_{bt} ; f_{ij})$ during construction, in areas subsequently under tension in service.

Comment: This is the case for bridges in particular. For buildings, this limitation does not apply, unless stated otherwise by the designer. This limitation serves to dispense with the need for fatigue calculations. This condition is not restrictive for classes I and II. The limitation adopted is established in accordance with the bibliography on UHPFRC since the test results available at the moment are limited.

6.1,22 CLASS I

No change

6.1,23 CLASS II

No change

6.1,24 class III

No change

6.1,25 CLASS IV

In class IV, normal stresses are calculated solely on the cracked section, using the law in § 6.1,11 b). It should be checked that:

- in the case of detrimental cracking, the limit tensile stress of reinforcement is no greater than the value given in article A.4.5,33 of BAEL 99,
- in the case of highly detrimental cracking, the limit tensile stress of reinforcement is no greater than the value given in article A.4.5,34 of BAEL 99,

- en l'absence d'armatures passives, l'ouverture de fissure est limitée à :
 - 0,3 mm en fissuration normale, soit $\epsilon < 0,003 / l_c$
 - 0,2 mm en fissuration préjudiciable, soit $\epsilon < 0,002 / l_c$
 - 0,1 mm en fissuration très préjudiciable, soit $\epsilon < 0,001 / l_c$

6.1,3 REGLES COMPLEMENTAIRES RELATIVES AUX FIBRES

Pour les bétons fibrés satisfaisant au critère du 6.0,1, il est loisible de ne pas mettre en œuvre les ferraillements minimums définis aux articles 6.1,31 et 6.1,32 du BPEL.

6.1,31 VERIFICATION DE LA NON-FRAGILITE

Elle consiste à s'assurer que le domaine résistant dont la frontière est constituée par l'ensemble des sollicitations résistantes élastiques S_{el} est intérieur au domaine résistant, dont la frontière est constituée par l'ensemble des sollicitations résistantes ultimes $S_{lim u}$, calculées selon la loi du 6.1,11 b).

Il est loisible de ne faire cette vérification que dans la zone du diagramme (M,N) correspondant aux sollicitations de la section.

Dans le cas de la flexion simple, cette vérification se résume à la vérification suivante :

- calcul du moment résistant élastique M_{el} de la section obtenu avec un calcul en section non fissurée en supposant le comportement du béton décrit par la loi élastique linéaire, la traction étant limitée à f_{ij} et la compression à $0,6f_{cj}$.
- calcul du moment résistant de la section fissurée M_{fis} avec prise en compte de la résistance apportée par les fibres. Dans ce cas, la loi de comportement du matériau après la fissuration est établie depuis les essais, après un traitement statistique approprié. Le calcul est fait à partir de la loi σ -w ainsi obtenue, ou la loi équivalente en σ - ϵ .

- *in the absence of passive reinforcement, the crack width is less than:*

- *0.3 mm for normal cracking, i.e. $e < 0.003 / l_c$*
- *0.2 mm for detrimental cracking, i.e. $e < 0.002 / l_c$*
- *0.1 mm for highly detrimental cracking, i.e. $e < 0.001 / l_c$*

6.1,3 ADDITIONAL RULES CONCERNING FIBRES

For fibre-reinforced concretes meeting the criterion of § 6.0,1, it may be possible not to use the minimum reinforcement ratios defined in articles 6.1,31 and 6.1,32 of BPEL.

6.1,31 NON-BRITTLENESS CHECK

The non-brittleness check consists in checking that the resistance range whose border is the set of elastic resistance effects S_{el} is within the resistance range whose border is the set of ultimate resistance effects $S_{lim u}$ calculated with the law of § 6.1,11 b).

It may be possible to do this check only for the area of the diagram (M,N) corresponding to the effects of the section.

In the case of simple bending, this check amounts to the following verification:

- *calculation of the elastic resistance moment M_{el} for the section, obtained with calculation for the uncracked section assuming the concrete to behave as described by the linear elastic law, tension being limited to f_{ij} and compression to $0.6f_{cj}$.*
- *calculation of the resistance moment of the cracked section M_{fis} , taking account of the strength provided by the fibres. In this case, the constitutive law of the material after cracking is determined from testing, after appropriate statistical processing. The calculation is done with the s -w law thus obtained, or with the equivalent s - e law.*

On vérifie ensuite que le moment résistant élastique M_{el} est inférieur au moment résistant de la section fissurée $M_{lim u}$.

It is then checked that the elastic resistant moment M_{el} is less than the resistance moment of the cracked section $M_{lim u}$.

6.1,4 SECTIONS DE JOINT OU DE REPRISE

6.1,4 CONTRACTION OR CONSTRUCTION JOINTS

On applique les règles du BAEL et BPEL sans prendre en compte la résistance des fibres car celles-ci ne traversent pas les surfaces de reprise.

The BAEL and BPEL rules are applied without consideration of the strength of fibres since they do not bridge joints.

Article 6.2 - Calcul des déformations. Etats limites de service vis-à-vis des déformations

Article 6.2 - Calculation of deformation. Serviceability limit states relative to deformation.

6.2,1 OBJET

6.2,1 PURPOSE

6.2,11 CONSTRUCTIF

6.2,11 CONSTRUCTIVE

Pas de modification

No change

6.2,12 FONCTIONNEL

6.2,12 FUNCTIONAL

Pas de modification

No change

6.2,2 HYPOTHESES DE CALCUL DES DEFORMATIONS

6.2,2 ASSUMPTIONS FOR DEFORMATION CALCULATIONS

6.2,21 DEFORMATIONS PROBABLES ET DEFORMATIONS POSSIBLES

6.2,21 PROBABLE AND POSSIBLE DEFORMATION

Pas de modification

No change

6.2,22 HYPOTHESES FONDAMENTALES

6.2,22 FUNDAMENTAL ASSUMPTIONS

Pas de modification

No change

6.2,23 CALCUL DES DEFORMATIONS DES PIECES JUSTIFIEES EN CLASSE I OU EN CLASSE II

6.2,23 CALCULATION OF DEFORMATION OF PARTS CHECKED FOR CLASS I OR CLASS II

Pas de modification

No change

6.2,24 CALCUL DES DEFORMATIONS DES PIECES JUSTIFIEES EN CLASSE III

6.2,24 CALCULATION OF DEFORMATION OF PARTS CHECKED FOR CLASS III

On évalue la flèche par intégration des courbures de la poutre, en tenant compte de la fissuration, selon la loi de comportement du matériaux donnée au 6.1,11 b).

Deflection is assessed by integrating the curvature of the beam, taking account of cracking, in accordance with the constitutive law of the material given in § 6.1,11 b).

6.2,25 CALCUL DES DEFORMATIONS DES
PIECES JUSTIFIEES EN CLASSE IV

On évalue la flèche par intégration des courbures de la poutre, en tenant compte de la fissuration, selon la loi de comportement du matériaux donnée au 6.1,11 b).

6.2,3 ÉTATS LIMITES DE DÉFORMATION

Pas de modification

Article 6.3 - Etats limites ultimes

6.3,1 SOLLICITATIONS DE CALCUL

Elles sont évaluées conformément aux articles 4.3, 4.4 et 4.5 du BPEL, compte tenu pour les systèmes hyperstatiques des indications suivantes :

- Dans la mesure où le marché ne prescrit pas une analyse non linéaire, les sollicitations sont calculées en utilisant, pour l'ensemble de la structure, un modèle élastique et linéaire.
- Le calcul utilisant les rotules plastiques tel que proposé dans le BPEL n'est autorisé que si les armatures passives ou de précontrainte sont aptes à assurer la reprise des efforts en négligeant la participation des fibres . Il est cependant loisible d'utiliser un modèle non linéaire utilisant la loi de comportement du matériau.

Commentaires : Cette restriction par rapport au BPEL est justifiée par la diminution du moment résistant après plastification de la section, qui est constatée dans la plupart des cas.

6.3,2 PRINCIPE DES JUSTIFICATIONS

Elles consistent à s'assurer que les sollicitations de calcul S_u sont intérieures à un domaine résistant dont la frontière est constituée par l'ensemble des efforts résistants ultimes $S_{lim u}$, calculables selon les règles énoncées dans les paragraphes qui suivent.

6.2,25 CALCULATION OF DEFORMATION OF
PARTS CHECKED FOR CLASS IV

Deflection is assessed by integrating the curvature of the beam, taking account of cracking, in accordance with the constitutive law of the material given in § 6.1,11 b).

6.2,3 LIMIT STATES OF DEFORMATION

No change

Article 6.3 - Ultimate limit states

6.3,1 DESIGN LOADS

Design loads are assessed in accordance with articles 4.3, 4.4, and 4.5 of BPEL, taking account of the following for statically indeterminate systems:

- *If the contract does not call for a non-linear analysis, loads are calculated using a linear elastic model for the whole structure.*
- *Design involving plastic hinges as proposed in BPEL is authorized only if the passive or prestressing reinforcement is capable of withstanding the forces and moments when the participation of fibres is overlooked. However, it may be possible to use a non-linear model using the constitutive law of the material.*

Comment: *This restriction relative to BPEL is justified by the reduction in the resistance moment after plastification of the section which is observed in most cases.*

6.3,2 PRINCIPLE OF VERIFICATION

Verification consists in checking that the design loading S_u remains within a resistance range whose border is the set of ultimate resistance effects $S_{lim u}$, which can be calculated with the rules given in the following paragraphs.

6.3.3 CALCUL DES SOLLICITATIONS RESISTANTES ULTIMES

6.3.31 HYPOTHESES DE CALCUL

Les hypothèses de calcul sont les suivantes :

- les sections droites restent planes,
- le béton, les armatures passives éventuelles et les armatures de précontrainte adhérentes ne subissent aucun glissement relatif,
- le diagramme contraintes-déformations du béton fibré est celui du paragraphe 6.3,313,
- les diagrammes contraintes-déformations de calcul des aciers se déduisent de ceux de l'annexe 2 du BPEL en effectuant une affinité parallèlement à la tangente à l'origine dans le rapport $1/\mathcal{N}_s$ (resp. $1/\mathcal{N}_p$), avec $\gamma_s = \gamma_p = 1,15$ sauf vis-à-vis des combinaisons accidentelles pour lesquelles on adopte $\gamma_s = \gamma_p = 1$.

La vérification de la résistance de la section se fait de la façon suivante :

- On n'impose pas de pivot et on recherche le moment résistant maximal sous effort normal imposé. Compte tenu du comportement adoucissant post-fissuration, le maximum est atteint avant d'avoir des fissures trop ouvertes.

A titre de simplification, dans le cas où des armatures passives ou actives sont présentes, on pourra utiliser la méthode simplifiée exposée dans le paragraphe 6.3,312 ci-dessous.

6.3.312 METHODE SIMPLIFIEE : DISTRIBUTION DES DEFORMATIONS LIMITES

On utilise les pivots A, B et C ; cette méthode plus simple est cependant pessimiste, car on n'exploite pas tout le potentiel des fibres.

On distingue les trois domaines décrits dans le BPEL.

Les limites des pivots sont les suivantes :

6.3.3 CALCULATION OF ULTIMATE RESISTANCE EFFECTS

6.3.31 GENERAL DESIGN ASSUMPTIONS

The design assumptions are as follows:

- *plane sections remain plane,*
- *the concrete, any passive reinforcement and the pre-tensioned prestressing reinforcement are not subject to any relative slippage,*
- *the stress-strain diagram for UHPFRC is that of 6.3,313,*
- *the stress-strain diagrams for designing reinforcement are deduced from those of Annex 2 of BPEL by carrying out an affine transformation parallel to the tangent at the origin, with a ratio of $1/\mathcal{E}_s$ (or $1/\mathcal{E}_p$), with $\mathcal{E}_s = \mathcal{E}_p = 1.15$, except for accidental combinations when $\mathcal{E}_s = \mathcal{E}_p = 1$.*

The strength of the section is checked as follows:

- *No ultimate strain is imposed and the maximum resisting moment under the normal force applied is sought. Bearing post-cracking softening behaviour in mind, the maximum value is obtained before the cracks are too wide.*

As a first approach, if there is passive or active reinforcement, the simplified method detailed in § 6.3,312 below can be used.

6.3.312 SIMPLIFIED METHOD: DISTRIBUTION OF LIMIT STRAIN

Ultimate strains A, B, and C are used; this simpler method is somewhat pessimistic, for it does not make use of the full potential of the fibres.

The three ranges described in the BPEL rules are applied.

The limits of the ultimate strains are as follows:

- Point A : le diagramme passe par le point A qui correspond pour l'armature la plus excentrée à un accroissement d'allongement de 10 ‰ au-delà du retour à 0 de la déformation du béton adjacent.

Si $\frac{l_f}{4l_c} + \frac{f_{tj}}{E_{ij}} < 10 \text{ ‰}$, on néglige la

participation du béton fibré tendu (cas des poutres de très grande hauteur).

- Point B : raccourcissement de 3 ‰ du point extrême de la section le plus comprimé.
- Point C : raccourcissement de $\frac{\sigma_{bc}}{E_{ij}}$ du béton à une distance du point extrême le plus comprimé égale à $(1 - \frac{1000\sigma_{bc}}{3E_{ij}})h$, où h est la hauteur totale de la section.

6.3.313 DIAGRAMME CONTRAINTES-DEFORMATIONS DU BETON

Le diagramme contrainte – ouverture de fissure se déduit du diagramme ELS du 6.1.11,b) par une affinité de rapport γ_{bf} parallèlement à l'axe des contraintes :

- *Point A: the diagram goes through point A which, for the reinforcement furthest from the centre, corresponds to a 10‰ increase in elongation after the return to zero of the strain in the adjacent concrete.*

If $\frac{l_f}{4l_c} + \frac{f_{tj}}{E_{ij}} < 10\text{‰}$, the participation of FRC

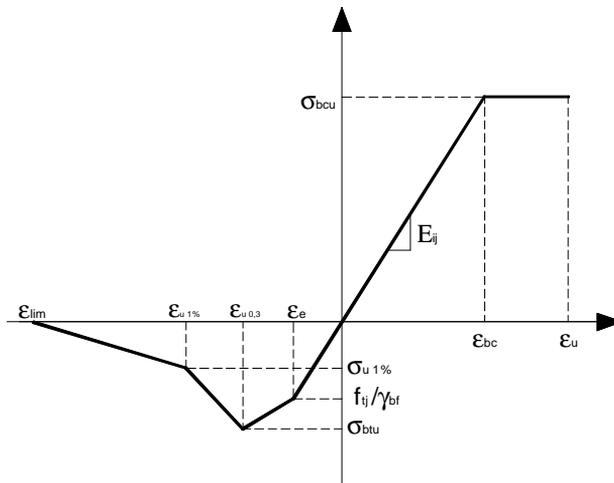
is neglected (case of very deep beams).

- *Point B: 3‰ shortening of the most severely compressed outermost point of the section.*
- *Point C: shortening of the concrete by $\frac{\sigma_{bc}}{E_{ij}}$ at a distance of $(1 - \frac{1000\sigma_{bc}}{3E_{ij}})h$ from the most severely compressed outermost point, h being the total depth of the section.*

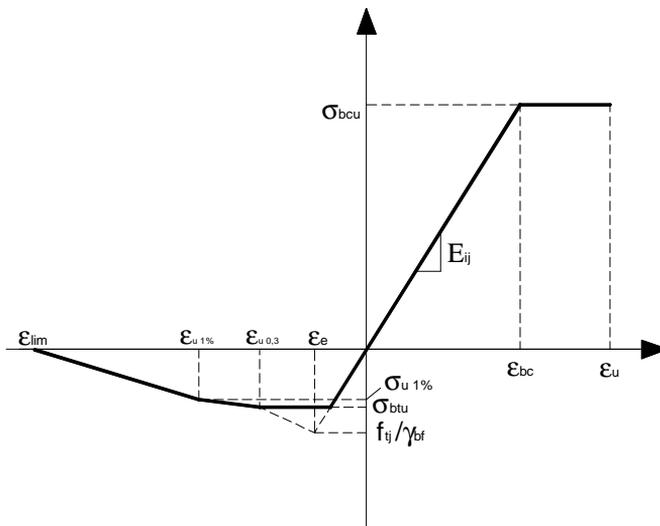
6.3.313 STRESS-STRAIN DIAGRAM FOR THE CONCRETE

The stress-crack width diagram is deduced from the SLS diagram given in § 6.1.11,b) by means of an affine transformation with a ratio of γ_{bf} parallel to the stress axis:

- Loi écouissante - *Strain hardening law*:



- Loi adoucissante - *Strain softening law* :



On prendra les limites suivantes :

The following limits will be used:

- $\epsilon_u = 3 \text{ ‰}$
- $\epsilon_{u,0.3} = \frac{w_{0,3}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{\gamma_{bf} E_{ij}}$, avec $w_{0,3} = 0.3 \text{ mm}$
- $e_u = 3 \text{ ‰}$
- $\epsilon_{u,0.3} = \frac{w_{0,3}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{\gamma_{bf} E_{ij}}$, with $w_{0,3} = 0.3 \text{ mm}$

- $\varepsilon_{u1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{\gamma_{bf} E_{ij}}$, avec $w_{1\%} = 0,01H$,

H étant la hauteur du prisme d'essai de flexion associée à l'épaisseur de la structure

- $\varepsilon_{lim} = \frac{l_f}{4l_c}$, l_f étant la longueur d'une fibre

- l_c la longueur caractéristique

- $\sigma_{bcu} = \frac{0,85}{\theta \gamma_b} f_{Cj}$

- $\sigma_{btu} = \frac{\sigma(w_{0,3})}{K \gamma_{bf}}$ et $\sigma_{u1\%} = \frac{\sigma(w_{1\%})}{K \gamma_{bf}}$,

$\sigma(w)$ étant la courbe intrinsèque expérimentale caractéristique du matériau.

Il est loisible de négliger la résistance en traction du béton de fibres dans le cas de la précontrainte adhérente.

6.3.32 REGLE DU DECALAGE

Pas de modification

Article 6.4 - Etat limite de stabilité de forme

6.4.1 DOMAINE D'APPLICATION

Pas de modification

6.4.2 PRINCIPE DES JUSTIFICATIONS

Pas de modification

6.4.3 SOLLICITATIONS DE CALCUL

Pas de modification

- $\varepsilon_{u1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{\gamma_{bf} E_{ij}}$, with $w_{1\%} = 0.01H$,

H being the height of the bending test specimen in accordance with the thickness of the structure

- $\varepsilon_{lim} = \frac{l_f}{4l_c}$, l_f being the length of a fibre

- l_c is the characteristic length

- $\sigma_{bcu} = \frac{0,85}{\theta \gamma_b} f_{Cj}$

- $\sigma_{btu} = \frac{\sigma(w_{0,3})}{K \gamma_{bf}}$ and $\sigma_{u1\%} = \frac{\sigma(w_{1\%})}{K \gamma_{bf}}$,

$\sigma(w)$ being the material's characteristic intrinsic curve derived from testing.

It may be possible to neglect the tensile strength of the fibre-reinforced concrete in the case of pre-tensioned prestress.

6.3.32 OFFSET LAW

No change

Article 6.4 - Buckling analysis limit state

6.4.1 SCOPE

No change

6.4.2 PRINCIPLE OF VERIFICATION

No change

6.4.3 DESIGN LOADING

No change

6.4,4 HYPOTHESES DE CALCUL DANS LE CAS GENERAL

- les sections droites restent planes,
- les effets du retrait du béton sont négligés,
- on adopte pour les aciers les mêmes diagrammes que pour la justifications vis-à-vis de l'état limite ultime de résistance (article 6.3,31),
- on adopte pour le béton comprimé un diagramme déformations - contraintes déduit de celui qui est défini en 6.3,313 par le produit de l'affinité parallèle à l'axe des déformations et de rapport $1+\alpha\phi$. Des valeurs du coefficient ϕ sont données au chapitre 1.8 de la partie 1.

6.4,5 CAS DES PIECES PEU ELANCEES

Pas de modification

Commentaires: Les limites d'élanement sont très probablement à revoir en raison de la loi de comportement en compression beaucoup plus linéaire.

Article 6.5 - Etat limite de fatigue

6.5,1 GENERALITES

Pas de modification

6.5,2 SOLLICITATIONS DE CALCUL

Pas de modification

6.5,3 PRINCIPE DES JUSTIFICATIONS

Pas de modification

6.5,4 CRITERES APPLICABLES DANS LES CAS COURANTS

6.5,41 BETON

Dans le cas où on respecte le critère défini en 6.1,25 pour les ouvrages soumis à la fatigue, il n'y a pas de vérification à la fatigue à faire.

6.4,4 GENERAL DESIGN ASSUMPTIONS

- *Plane sections remain plane;*
- *The effects of concrete shrinkage are overlooked;*
- *For the reinforcement, the same diagrams are adopted as for verification relative to the ultimate-limit-state strength (article 6.3,31);*
- *The strain-stress diagram for the compressed concrete is deduced from that defined in § 6.3,313 by means of the product of the affine transformation parallel to the axis of strain with a ratio of $1+\alpha f$. Values for coefficient f are given in Chap. 1.8 of Part I.*

6.4,5 CASE OF NOT VERY SLENDER PARTS

No change

Comment: *The limits of slenderness probably need to be reviewed because of the much more linear compressive constitutive law.*

Article 6.5 - Fatigue limit state

6.5,1 GENERAL

No change

6.5,2 DESIGN LOADING

No change

6.5,3 PRINCIPLE OF VERIFICATION

No change

6.5,4 CRITERIA APPLICABLE IN COMMON CASES

6.5,41 CONCRETE

If the criterion given in § 6.1,25 for structures subject to fatigue is complied with, there is no need to carry out a check for fatigue.

6.5.42 ARMATURES DE PRECONTRAINTE

Pas de modification

6.5.43 ACIERS PASSIFS

Pas de modification

6.5.42 PRESTRESSING REINFORCEMENT

No change

6.5.43 PASSIVE REINFORCEMENT

No change

2.3. Justifications sous sollicitations tangentes

Article 7.1 - Principes de justification

7.1,1 Une poutre soumise à un effort tranchant doit faire l'objet des justifications suivantes :

- dans toutes les zones de la poutre, justification de ses éléments constitutifs : âmes, membrures, etc. et de leurs attaches, vis-à-vis de :
 - l'état limite de service (article 7.2) dans le cas de BFUP précontraint,
 - l'état limite ultime (article 7.3),
- dans les zones d'appui simple d'about de la poutre, justifications complémentaires relatives à l'équilibre de la bielle d'effort tranchant (art. 7.5,1) et éventuellement du coin inférieur (art. 7.5,2).

7.1,2 Pour ces vérifications, les sollicitations sont calculées suivant les règles du chapitre 4 du BPEL 91.

7.1,3 Pas de modification

Article 7.2 - Justification des éléments d'une poutre vis-à-vis des sollicitations tangentes à l'état limite de service

Dans le cas du BFUP précontraint, le critère du BPEL est conservé.

Dans les autres cas, aucune vérification à l'ELS n'est nécessaire: l'ouverture des fissures est contrôlée par les vérifications en flexion.

2.3. Shear force verifications

Article 7.1 - Principles of verification

7.1,1 A beam subject to shear forces requires the following verifications:

- in all areas of the beam, verification of its component parts: webs, flanges, etc. and of their connections, as concerns:
 - serviceability limit state (article 7.2) in the case of prestressed UHPFRC,
 - ultimate limit state (article 7.3),
- in the beam end block, additional verifications concerning the equilibrium of the shear-force strut (article 7.5,1) and, as required, of the bottom wedge (article 7.5,2).

7.1,2 For these checks, effects are calculated in accordance with the rules of chapter 4 of BPEL 91.

7.1,3 No change

Article 7.2 - Verification of beam components relative to shear forces at serviceability limit state

In the case of prestressed UHPFRC, the BPEL criterion is retained.

In other cases, no SLS check is required: crack width is checked by normal force verifications.

7.2,1 DEFINITION DES CONTRAINTES σ_x, σ_t, τ

Pas de modification

7.2,2 CONDITIONS A SATISFAIRE

Les contraintes σ_x , σ_t et τ calculées sous l'effet des sollicitations de service doivent satisfaire les conditions suivantes :

$$\tau^2 - \sigma_x \sigma_t \leq 0,25 f_{tj} \left[f_{tf} + \frac{2}{3} (\sigma_x + \sigma_t) \right]$$

$$\tau^2 - \sigma_x \sigma_t \leq 2 \frac{f_{tj}}{f_{cj}} \left[0,6 f_{cj} - \sigma_x - \sigma_t \right] \left[f_{tf} + \frac{2}{3} (\sigma_x + \sigma_t) \right]$$

Lorsqu'une vérification est nécessaire en un point où $\sigma_x < 0$, les conditions précédentes sont remplacées par :

$$\tau^2 \leq 0,25 f_{tj} \left[f_{tf} + \frac{2}{3} \sigma_t \right]$$

7.2,3 NIVEAUX DES VERIFICATIONS

Pas de modification

7.2,4 CAS DE LA CLASSE III

Pas de modification

Article 7.3 - Justification des éléments d'une poutre vis-à-vis des sollicitations tangentés à l'état limite ultime

7.3,1 Toute poutre doit présenter des éléments résistants s'opposant à l'ouverture des fissures inclinées de cisaillement (armatures passives droites ou inclinées, armatures de précontrainte transversale ou fibres tendues).

On reprendra les mêmes notations que celles définies dans cet article dans le BPEL 91 révisé 99.

7.2,1 DEFINITION OF STRESSES s_x, s_t, t

No change

7.2,2 CONDITIONS TO BE MET

Stresses s_x , s_t , and t calculated under the effects of service loads must meet the following conditions:

When a check is necessary at a point where $s_x < 0$, the above conditions are to be replaced by:

7.2,3 CHECK LEVELS

No change

7.2,4 CASE OF CLASS III

No change

Article 7.3 - Verification of beam components relative to shear forces at ultimate limit state

7.3,1 All beams must have resisting components opposing opening of inclined shear cracks (straight or inclined passive reinforcement, transverse prestressing reinforcement or fibres under tension).

The notation used is the same as that in the same article of BPEL 91 revised in 99.

7.3,2 JUSTIFICATION DES ARMATURES TRANSVERSALES

L'utilisation d'armatures transversales est possible. Cependant, la résistance à l'effort tranchant apportée par les fibres peut permettre de ne pas mettre en place d'armatures transversales.

7.3,21 La résistance à l'effort tranchant ultime V_u est donnée par :

$$V_u = V_{Rb} + V_a + V_f$$

où :

- V_{Rb} est le terme de participation du béton,
- V_a le terme de participation des armatures,
- V_f le terme de participation des fibres.

Le terme V_a est identique à celui défini dans le BAEL ou le BPEL :

$$V_a = 0,9 d \frac{A_t}{s_t} \frac{f_e}{\gamma_s} (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad \text{ou}$$

$$z \frac{A_t}{s_t} \frac{f_e}{\gamma_s} \frac{(\sin(\alpha + \beta_u))}{\sin \beta_u}$$

Le terme $\frac{f_{tj}}{3}$, qu'il est loisible d'ajouter au terme $\tau_{u \text{ lim}}$, dans le cas d'une section non entièrement tendue est remplacé ici par :

- dans le cas du béton armé :

$$V_{Rb} = \frac{1}{\gamma_E} \frac{0,21}{\gamma_b} k \sqrt{f_{cj}} b_0 d$$

- en compression $k = 1 + \frac{3 \cdot \sigma_{cm}}{f_{tj}}$,
- en traction $k = 1 - \frac{0,7 \cdot \sigma_{tm}}{f_{tj}}$,

σ_m étant la contrainte moyenne de la section totale de béton sous l'effort normal de calcul.

7.3,2 VERIFICATION OF TRANSVERSE REINFORCEMENT

Transverse reinforcement may be used. However, the shear strength provided by the fibres may make it possible to dispense with transverse reinforcement.

7.3,21 *The ultimate shear strength V_u is given by:*

$$V_u = V_{Rb} + V_a + V_f$$

where:

- V_{Rb} is the term for the participation of the concrete,
- V_a is the term for the participation of the reinforcement,
- V_f is the term for the participation of the fibres.

The term V_a is identical to that defined in the BAEL or BPEL rules:

$$V_a = 0,9 d \frac{A_t}{s_t} \frac{f_e}{\gamma_s} (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad \text{or}$$

$$z \frac{A_t}{s_t} \frac{f_e}{\gamma_s} \frac{(\sin(\alpha + \beta_u))}{\sin \beta_u}$$

The term $\frac{f_{tj}}{3}$, which may be added to the term $\tau_{u \text{ lim}}$ in the case of a section which is not entirely under tension, is replaced here by:

- *case of reinforced concrete:*

$$V_{Rb} = \frac{1}{\gamma_E} \frac{0,21}{\gamma_b} k \sqrt{f_{cj}} b_0 d \quad \text{where:}$$

- *in compression* $k = 1 + \frac{3 \cdot \sigma_{cm}}{f_{tj}}$
- *in tension* $k = 1 - \frac{0,7 \cdot \sigma_{tm}}{f_{tj}}$

σ_m being the mean stress in the total section of concrete under the normal design force.

- dans le cas du béton précontraint :

$$V_{Rb} = \frac{1}{\gamma_E} \frac{0,24}{\gamma_b} \sqrt{f_{cj}} b_0 z$$

En l'absence de toute armature longitudinale passive ou de précontrainte, ces termes sont réduits à la valeur minimale correspondant à l'apparition des fissures de cisaillement, avec une sécurité convenable.

Le terme γ_E est un coefficient de sécurité pris tel que : $\gamma_E \cdot \gamma_b = 1,5$

Commentaire: le coefficient γ_E caractérise l'incertitude actuelle sur la possibilité d'extrapoler les formules établies pour les BHP, pour lesquels $f_{cj} \leq 80$ MPa, aux BFUP.

Les fibres participent à la résistance à l'effort tranchant par le terme :

$$V_f = \frac{S \sigma_p}{\gamma_{bf} \tan \beta_u}$$

où :

- σ_p la résistance résiduelle en traction :

$$\sigma_p = \frac{1}{K} \frac{1}{w_{lim}} \int_0^{w_{lim}} \sigma(w) dw$$

avec $w_{lim} = \max(w_u ; 0,3 \text{ mm})$ et $w_u = l_c \cdot \epsilon_u$

- $\sigma(w)$ la contrainte caractéristique expérimentale post-fissuration pour une ouverture de fissure w ,
- w_u l'ouverture de fissure ultime valant la valeur atteinte à l'ELU de résistance en flexion composée, sur la fibre extrême, sous le moment agissant dans la section,
- S , l'aire d'action des fibres estimée par : $S = 0,9 b_0 d$ ou $b_0 z$ dans le cas d'une section rectangulaire ou en T et $S = 0,8 \cdot (0,9 d)^2$ ou $0,8 z^2$, dans le cas d'une section circulaire,
- K est le coefficient d'orientation pour les effets généraux.

- *case of prestressed concrete:*

$$V_{Rb} = \frac{1}{\gamma_E} \frac{0,24}{\gamma_b} \sqrt{f_{cj}} b_0 z$$

In the absence of any longitudinal passive or prestressing reinforcement, these terms are reduced to the minimum value at which shear cracks appear, with an appropriate safety margin.

The term \mathbf{g}_E is a safety coefficient such that: $\mathbf{g}_E \cdot \mathbf{g}_b = 1.5$

Comment: Coefficient \mathbf{g}_E characterizes the current uncertainty regarding the possibility of extrapolating to UHPFRC the formulae established for HPC, for which $f_{cj} \leq 80$ MPa.

Fibres contribute to the shear strength with the term

$$V_f = \frac{S \sigma_p}{\gamma_{bf} \tan \beta_u}$$

where:

- \mathbf{s}_p is the residual tensile strength:

$$\sigma_p = \frac{1}{K} \frac{1}{w_{lim}} \int_0^{w_{lim}} \sigma(w) dw$$

with $w_{lim} = \max(w_u ; 0.3 \text{ mm})$ and $w_u = l_c \cdot \epsilon_u$

- $\mathbf{s}(w)$ is the experimental characteristic post-cracking stress for crack width w ,
- w_u is the ultimate crack width, i.e. the value attained at the ULS for resistance to combined stresses, on the outer fibre, under the moment exerted in the section.
- S is the area of fibre effect, estimated with: $S = 0.9 b_0 d$ or $b_0 z$ for rectangular or Tee sections, and $S = 0.8 \cdot (0.9 d)^2$ or $0.8 z^2$ for circular sections.
- K is the orientation coefficient for general effects.

7.3,22 Aucune prescription particulière n'est nécessaire, le 6.1,3 assure que la densité de fibres permet de se passer éventuellement d'armatures d'effort tranchant.

7.3,23 On remplace le terme $\frac{f_{tj}}{3}$ par $\frac{0,24}{\gamma_E \gamma_b} \sqrt{f_{cj}}$.

7.3,24 Dans le cas de reprises de bétonnage, les fibres ne peuvent assurer aucune transmission d'effort au droit de la reprise qui doit être traitée de façon classique conformément aux dispositions du BAEL ou du BPEL.

7.3,3 JUSTIFICATION DU BETON

La contrainte de cisaillement $\tau_{red,u}$ doit être au plus égale à :

$$\tau_{red,u} \leq 1,14 \frac{0,85}{\gamma_E \gamma_b} f_{cj}^{2/3} \sin(2\beta_u).$$

β_u étant borné inférieurement à 30°.

En prenant pour inclinaison des bielles la valeur minimale $\beta_u = 30^\circ$, la condition

précédente est voisine de : $\tau_{red,u} \leq 0,56 f_{cj}^{2/3}$

Article 7.4 - Modalités particulières d'application des articles 7.2 et 7.3 aux zones d'appui simple d'about

Pas de modification

Commentaires : La longueur conventionnelle de scellement définie au 2.2,31 du BPEL est dans le cas des BFUP très inférieure aux valeurs conseillées pour la pré-tension. L'introduction d'un nombre élevé de câbles dans un petit volume doit en tenir compte. Seul un essai normalisé de recul d'ancrage permettrait son évaluation correcte.

A l'ELU, on peut négliger l'effort de précontrainte F_a dans la mesure où on vérifie τ_u .

7.3,22 There are no special requirements; § 6.1,3 ensures that the density of fibres is sufficient to be able to dispense with shear reinforcement.

7.3,23 The term $\frac{f_{tj}}{3}$ is replaced by $\frac{0.24}{\gamma_E \gamma_b} \sqrt{f_{cj}}$.

7.3,24 At construction joints, the fibres cannot transfer any forces across the joint which must therefore be treated in the conventional manner, in accordance with the terms of the BAEL or BPEL rules.

7.3,3 VERIFICATION OF CONCRETE

The shear stress $\tau_{red,u}$ must be no more than:

$$\tau_{red,u} \leq 1.14 \frac{0.85}{\gamma_E \gamma_b} f_{cj}^{2/3} \sin(2\beta_u).$$

β_u being lower-bounded to 30°.

Assuming the angle of the compression struts to be $\beta_u = 30^\circ$, the above condition is close to:

$$\tau_{red,u} \leq 0.56 f_{cj}^{2/3}$$

Article 7.4 - Special modalities for application of articles 7.2 and 7.3 to beam end blocks

No change

Comment: The anchoring length in UHPFRC is much lower than the recommended values defined in § 2.2,31 of BPEL. Only a standardized test of anchorage take-up would enable it to be correctly assessed.

At the ULS, the prestress force F_a can be overlooked if τ_u is checked.

Article 7.5 – Justifications complémentaires des zones d'appui simple d'about

7.5,1 JUSTIFICATION DE LA BIELLE D'ABOUT

Pas de modification

7.5,11 VERIFICATION DE L'EQUILIBRE DE LA BIELLE PAR LES ARMATURES LONGITUDINALES PASSIVES OU DE PRECONTRAINTE DISPOSEES A L'ABOUT DE LA POUTRE

Pas de modification

7.5,12 VERIFICATION DES ARMATURES TRANSVERSALES

On considère que la base de la bielle se situe au niveau supérieur des armatures longitudinales strictement nécessaires à son équilibre conformément à l'article 7.5,11. Cette bielle règne ainsi sur une hauteur réduite z_r comprise entre sa base et le point de passage de la résultante des contraintes de compression.

Si la hauteur réduite z_r est inférieure au bras de levier z , la densité d'armatures transversales, déterminée en 7.4, doit être majorée dans le rapport z/z_r et régner sur une longueur mesurée à partir de la section d'appui égale à $z_r \cotg \beta_u$.

En l'absence d'armatures transversales, la résistance conforme au 7.4 doit être apportée par les fibres sur une longueur réduite égale à $z_r \cotg \beta_u$.

La deuxième partie de l'annexe 4 du BPEL, zone d'about, doit être modifiée de la façon suivante :

Article 2.1 :

Texte à remplacer par : Si l'on admet que les étriers cousant efficacement la fissure sont ceux qui rencontrent la droite mn et que ces armatures sont plastifiées à l'état limite ultime, l'équilibre du bloc d'about exige que le béton, au droit de S, transmette un effort vertical :

Article 7.5 - Additional verifications of beam end blocks.

7.5,1 VERIFICATION OF END-BLOCK COMPRESSION STRUT

No change

7.5,11 CHECK OF THE EQUILIBRIUM OF THE COMPRESSION STRUT BY LONGITUDINAL PASSIVE OR PRESTRESSING REINFORCEMENT IN THE END BLOCK

No change

7.5,12 CHECK OF TRANSVERSE REINFORCEMENT

It is considered that the base of the compression strut is at the top of the longitudinal reinforcement that is strictly necessary to balance it in accordance with article 7.5,11. The compression strut thus acts over a reduced height z_r between its base and the point through which passes the resultant compressive stress.

If the reduced height z_r is less than the lever arm z , the density of transverse reinforcement—determined in 7.4—must be increased proportionally to the ratio z/z_r and must be present over a distance of $z_r \cotg \beta_u$ from the bearing section.

In the absence of transverse reinforcement, the strength in accordance with § 7.4 must be provided by fibres over a reduced length of $z_r \cotg \beta_u$.

The second part of BPEL Annex 4, “Beam end blocks”, must be modified as follows:

Article 2.1:

Text to be replaced by: If it is accepted that the stirrups which effectively stitch cracks closed are those which intersect line mn and that they are plastified at the ultimate limit state, the equilibrium of the end block requires the concrete at point S to transfer a vertical force of:

$$W = R_u - \sum F_i \sin \alpha_i - \frac{z_r}{s_t} A_t \frac{f_e}{\gamma_s} \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \beta} - \frac{z_r}{s_t'} F_{tu} \frac{\sin(\alpha' + \beta)}{\sin \beta} - \frac{z_r b_o \sigma_p}{\gamma_{bf} \tan \beta}$$

où la valeur globale de K est prise en compte dans la résistance résiduelle en traction σ_p .

where the global value of K is taken into account in the residual tensile strength, s_p .

7.5.2 JUSTIFICATION DE L'EQUILIBRE DU COIN INFERIEUR

7.5.2 VERIFICATION OF EQUILIBRIUM OF BOTTOM WEDGE

Si on note S_{coin} la surface portée par le plan de rupture AC de l'article 3.1, la formule devient:

If the surface of the plane of rupture AC of article 3.1 is designated S_{coin} , the formula becomes:

$$\frac{A_1 f_e}{\gamma_s} \geq \lambda(R_u + F_{v \text{ lim}}) + H_u - F_{H \text{ lim}} - \frac{S_{\text{coin}} \sin \theta \sigma_p}{\gamma_{bf}}$$

où la valeur locale de K est prise en compte dans la résistance résiduelle en traction σ_p .

where the local value of K is taken into account in the residual tensile strength, s_p .

L'article 3.2 de l'annexe 4, 2^{ème} Partie est invalidé : la présence de fibres assortie des conditions de non-fragilité rend inutile la définition d'une section minimale d'armatures longitudinales.

Article 3.2 of Annex 4, Part 2, is invalidated: the presence of fibres, together with non-brittleness conditions, makes it unnecessary to define a minimum sectional area of longitudinal reinforcement.

Article 7.6 - Torsion

Article 7.6 - Torsion

7.6.1 GENERALITES

7.6.1 GENERAL

Pas de modification

No change

7.6.2 PRISE EN COMPTE DE LA TORSION

7.6.2 TAKING ACCOUNT OF TORSION

Pas de modification

No change

7.6.3 SECTION TUBULAIRE EFFICACE

7.6.3 EFFECTIVE TUBULAR SECTION

Pas de modification

No change

7.6.4 JUSTIFICATION DE LA POUTRE VIS-A-VIS DE L'ETAT LIMITE DE SERVICE

7.6.4 VERIFICATION OF BEAMS RELATIVE TO SERVICEABILITY LIMIT STATE

Dans le cas du BFUP précontraint, le critère du BPEL est conservé. Dans les autres cas, aucune vérification à l'ELS n'est nécessaire.

In the case of prestressed UHPFRC the BPEL criterion is retained. In other cases, no SLS check is necessary.

7.6,5 JUSTIFICATION DE LA POUTRE
VIS-A-VIS DE L'ETAT LIMITE
ULTIME

7.6,51 Pas de modification

7.6,52 INCLINAISON DES BIELLES DE COMPRESSION

Pas de modification

7.6,53 JUSTIFICATION DU BÉTON DES BIELLES
DE COMPRESSION

La condition à respecter est la suivante:

$$\tau_{Vu}^2 + \tau_{Tu}^2 \leq \left(0,86 \frac{f_{cj}^{2/3}}{\gamma_E \gamma_b} \right)^2$$

en prenant $\gamma_E \cdot \gamma_b = 1,5$ en cohérence avec 7.3,21.

7.6,54 JUSTIFICATION DES ARMATURES
TRANSVERSALES

A l'intérieur de la section tubulaire efficace, l'équilibre du moment de torsion est justifié par la relation suivante :

$$\frac{A_T}{s_T} \frac{f_e}{\gamma_s} \frac{\sin(\alpha_T + \beta_u)}{\sin(\beta_u)} + \frac{F_{Tu}}{s_T'} \frac{\sin(\alpha_T' + \beta_u)}{\sin(\beta_u)} + \frac{\sigma_p}{\gamma_{bf}} \frac{e}{\tan(\beta_u)} \geq \tau_{Tu} e$$

La vérification étant menée panneau par panneau, avec pour chacun une valeur de l'ouverture de fissure ultime w_u provenant de l'état de contraintes normales le plus défavorable. La valeur globale de K est prise en compte dans la résistance résiduelle en traction σ_p .

7.6,55 JUSTIFICATION DES ARMATURES
LONGITUDINALES

La sollicitation de torsion d'une poutre y engendre des tractions longitudinales.

La résistance à ces tractions doit être trouvée sur la périphérie de la section de la poutre, à l'intérieur de sa section tubulaire efficace. La densité d'effort de traction longitudinale due à la torsion le long de la ligne moyenne de cette section vaut :

7.6,5 VERIFICATION OF BEAMS
RELATIVE TO ULTIMATE LIMIT
STATE

7.6,51 No change

7.6,52 ANGLE OF COMPRESSION STRUTS

No change

7.6,53 VERIFICATION OF COMPRESSION
STRUTS CONCRETE

The condition to be met is as follows:

$$\tau_{Vu}^2 + \tau_{Tu}^2 \leq \left(0,86 \frac{f_{cj}^{2/3}}{\gamma_E \gamma_b} \right)^2$$

with $\gamma_E \cdot \gamma_b = 1.5$ in accordance with § 7.3,21.

7.6,54 VERIFICATION OF TRANSVERSE
REINFORCEMENT

Within the effective tubular section, the equilibrium of the torsional moment is checked by the following relationship:

The check is performed panel by panel, with for each panel an ultimate crack width value w_u resulting from the most critical normal stress state. The global value of K is taken into account in the residual tensile strength, σ_p .

7.6,55 VERIFICATION OF LONGITUDINAL
REINFORCEMENT

The torsional effects in a beam produce longitudinal tensile forces.

The resistance to these tensile forces must be found in the peripheral area of the beam, within the effective tubular section. The force density of longitudinal tension due to torsion along the centreline of this section is:

$$\frac{T}{2\Omega} \cot g(\beta_u) - \frac{\sigma_p e}{\gamma_{bf}}$$

$$\frac{T}{2\Omega} \cot g(\beta_u) - \frac{\sigma_p e}{\gamma_{bf}}$$

T représentant le couple de torsion et β_u l'inclinaison des bielles de béton comprimé sur la fibre moyenne de la poutre. Le terme de contribution des fibres peut être ajouté sauf si la limite de fissuration est atteinte en flexion auquel cas aucune réserve ne peut être prise en compte.

where T is the torsional torque and β_u the angle of the struts of compressed concrete from the neutral fibre of the beam. The term for the contribution of the fibres can be added, unless the cracking point is attained under bending, in which case no margin can be taken into account.

Cette traction doit être équilibrée :

- soit par la compression développée par la flexion et par la précontrainte longitudinale,
- soit par le recours à des armatures passives ou de précontrainte venant en sus de celles strictement nécessitées par la flexion développée par le même cas de charge et dont la contrainte est limitée selon le BPEL,
- soit par un taux de fibres complémentaire permettant cette reprise.

This tensile force must be balanced:

- *either by the compression developed by bending and by longitudinal prestress;*
- *or by using extra passive or prestressing reinforcement in addition to that strictly required to counter bending developed by the same load case, and in which the stress is to be limited in accordance with BPEL;*
- *or by a higher fibre content sufficient to withstand the force.*

2.4. Diffusion des efforts concentrés

La démarche proposée est calquée sur celle sur BAEL et de l'annexe 4 du BPEL. Elle consiste à ajouter la part de résistance apportée par les fibres.

Il est envisageable d'effectuer un calcul élastique dans les zones de diffusion ; l'obtention des directions et contraintes principales de traction sont alors à équilibrer par la contribution des fibres :

$$V_f = \frac{S\sigma_p}{1,3 \gamma_{bf}}$$

avec : $\sigma_p = \frac{1}{K} \frac{1}{w_{lim}} \int_0^{w_{lim}} \sigma(w) dw$, contrainte

déduite d'une courbe caractéristique tenant compte des défauts locaux, en considérant la valeur locale du coefficient K pour les effets de surface et d'éclatement, la valeur "globale" de K pour les effets de diffusion générale.

1.2,1 EFFETS DE SURFACE

Au voisinage immédiat de S_A , il y a lieu de disposer une section d'acier ou de vérifier que la contribution des fibres est suffisante :

$$\frac{S_{fs} \sigma_p}{1,3 \gamma_{bf}} + A_s \sigma_{s \lim} = 0,04 \max(F_{j0})$$

F_{j0} représentant la force à l'origine ancrée au niveau j du panneau étudié.

S_{fs} est l'aire de la section fissurée, égale à $d_j \cdot e'$.

1.2,2 EFFETS D'ÉCLATEMENT

1.2,21 VERIFICATION DES CONTRAINTES DU BETON

Pas de modification.

2.4. Design of zone subject to concentrated loads

The procedure proposed is copied from that of BAEL and BPEL Annex 4. It involves adding the strength contribution of the fibres.

An elastic analysis could be carried out in the distribution zones: the principal tensile stresses and directions determined should then be balanced by the contribution of the fibres:

$$V_f = \frac{S\sigma_p}{1.3 \gamma_{bf}}$$

with: $\sigma_p = \frac{1}{K} \frac{1}{w_{lim}} \int_0^{w_{lim}} \sigma(w) dw$, i.e. the stress

deduced from a characteristic curve taking account of local defects, considering the local value of coefficient K for surface and bursting effects, and the "global" value of K for general stress-distribution effects.

1.2,1 SURFACE EFFECTS

In the immediate vicinity of S_A , it is recommended to place some reinforcement or to check that the contribution of the fibres is sufficient:

$$\frac{S_{fs} \sigma_p}{1,3 \gamma_{bf}} + A_s \sigma_{s \lim} = 0,04 \max(F_{j0})$$

where: F_{j0} represents the end force anchored at point j in the panel studied.

S_{fs} is the sectional area of the cracked section, $d_j \cdot e'$.

1.2,2 BURSTING EFFECTS

1.2,21 CHECK OF CONCRETE STRESS

No change.

1.2,22 FERRAILLAGE D'ÉCLATEMENT

La résultante des contraintes d'éclatement est donnée par :

$$R_j = 0,25 \left(1 - \frac{a_j}{d_j}\right) F_{j0}$$

Pour chaque niveau d'ancrage j , on calcule une section d'aciers d'éclatement :

$$\frac{S_{fe} \sigma_p}{1,3 \gamma_{bf}} + A_{ej} \sigma_s \lim = \frac{R_j}{k_j}$$

S_{fe} est l'aire de la section fissurée, égale à :

- dans le cas de la post-tension : $d_j \cdot e'$
- dans le cas de la pré-tension : $\frac{e' l_{sn}}{4}$

1.3 JUSTIFICATION VIS-À-VIS DE L'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL DE DIFFUSION PURE

1.3,1 JUSTIFICATION DES CONTRAINTES

A défaut d'une méthode de calcul plus élaborée, on peut évaluer, sur chaque plan de coupure d'ordonnée t , la contrainte conventionnelle de cisaillement de diffusion pure :

$$\tau_d = \frac{2V_x}{e' l_r}$$

A chaque niveau t , τ_d est cumulée algébriquement avec la contrainte τ la plus défavorable qui résulte de l'équilibre, selon la Résistance des Matériaux, de l'ensemble des sollicitations (y compris celles que développent les câbles ancrés dans S_A) appliquées à la pièce.

On évalue ainsi la contrainte globale maximale de cisaillement :

$$\tau_{g \max} = \max_t (\tau_d + \tau)$$

et l'on doit vérifier que $\tau_{g \max}$ ne dépasse pas $1,5 f_{tj}$.

On doit vérifier en outre : $\tau_d \leq f_{tj}$

1.2,22 BURSTING REINFORCEMENT

The resultant bursting stress is given by:

$$R_j = 0.25 \left(1 - \frac{a_j}{d_j}\right) F_{j0}$$

For each level of anchorage j , the sectional area of bursting reinforcement must be calculated with:

$$\frac{S_{fe} \sigma_p}{1.3 \gamma_{bf}} + A_{ej} \sigma_s \lim = \frac{R_j}{k_j}$$

where: S_{fe} is the sectional area of the cracked section:

- for post-tensioning: $d_j \cdot e'$
- for pre-tensioning: $\frac{e' l_{sn}}{4}$

1.3 VERIFICATION OF GENERAL EQUILIBRIUM OF PURE DISTRIBUTION

1.3,1 VERIFICATION OF STRESSES

In the absence of a more sophisticated calculation method, the conventional pure distribution shear stress can be assessed for each plane along ordinate t , with:

$$\tau_d = \frac{2V_x}{e' l_r}$$

At each level t , τ_d is totalled algebraically with the most critical stress τ resulting from the equilibrium—in accordance with Strength of Materials theory—of all the action effects (including those developed by the tendons anchored in S_A) exerted on the component.

This assesses the maximum global shear stress: $\tau_{g \max} = \max_t (\tau_d + \tau)$, and it must be checked that $\tau_{g \max}$ does not exceed $1.5 f_{tj}$.

In addition, it must be checked that: $\tau_d \leq f_{tj}$

1.3.2 ARMATURES D'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL

Cas où seules les fibres sont prises en compte:

La contrainte résiduelle due aux fibres est limitée à : $\frac{\sigma_p}{1,3 \gamma_{bf}}$

Les armatures transversales régnant dans la zone de régularisation des contraintes, entre S_A et S_R , doivent satisfaire globalement à la règle des coutures, l'effort tangent étant écrêté à la valeur :

$$V_{XE} = V_X \left[1 - \left(\frac{0,24 \sqrt{f_{cj}}}{\gamma_E \gamma_b \tau_d} \right)^2 \right]$$

ce qui revient à vérifier la condition suivante sur σ_p :

$$\sigma_p \geq \frac{1,3 \gamma_{bf}}{2} \tau_d \left(1 + \frac{0,24 \sqrt{f_{cj}}}{\gamma_E \gamma_b \tau_d} \right)$$

Dans le cas de la pré-tension, le coefficient minorateur $\frac{1}{2}$ du 3.3 du BPEL est invalidé, étant donnée la très faible longueur d'ancrage des aciers actifs dans les BFUP.

2.5. Justifications par l'expérimentation

L'article A.8.5 du BAEL 91 révisé 99 est applicable dans sa totalité.

1.3.2 GENERAL EQUILIBRIUM REINFORCEMENT

Case where only fibres are taken into account:

The residual stress due to the fibres is limited to $\frac{\sigma_p}{1,3 \gamma_{bf}}$

The transverse reinforcement in the stress regularization zone, between S_A and S_R , must comply overall with the stitching reinforcement rule, the tangent force being limited to:

which amounts to ensuring the following condition for σ_p :

In the case of pre-tensioning, the $\frac{1}{2}$ reduction factor of § 3.3 of BPEL is invalidated, given the very short passive-reinforcement anchorage length in UHPFRC.

2.5. Verification by experimentation

Article A.8.5 of BAEL 91 revised in 99 applies in total.

PARTIE 3

DURABILITE DES BFUP

3.1. Introduction

Les BFUP sont des matériaux cimentaires très différents de ceux que l'on rencontre habituellement dans le Génie Civil. Outre des résistances mécaniques largement supérieures à celles des bétons « classiques », ces matériaux présentent des caractéristiques remarquables en terme de durabilité comme le montrent les résultats expérimentaux dont on dispose à l'heure actuelle [3.1]. En outre, les premiers essais remontent à une dizaine d'années et les premiers ouvrages réalisés avec ces matériaux à environ cinq ans, et vont tous dans le sens d'un bon comportement en terme de durabilité.

Par ailleurs, ces performances ouvrent la voie à des applications particulières de ces matériaux telles que des ouvrages en ambiance très agressive, le stockage de déchets [3.2] ou des ouvrages pour l'industrie nucléaire [3.3] [3.4] et permettent d'envisager des éléments de structure avec une grande durée de service sans entretien, ni réparation. Les propriétés des BFUP rendent possible la fabrication d'éléments de structure de faible épaisseur : le gain de durabilité de ces matériaux doit compenser l'effet de réduction des épaisseurs, et il est permis d'envisager une diminution des épaisseurs d'enrobage au titre de la durabilité.

La durabilité envisagée dans ce document est celle du matériau et non pas celle des ouvrages. En ce qui concerne les agressions liées à des applications particulières des BFUP (par exemple les réservoirs de produits chimiques ou l'industrie nucléaire), elles ne seront pas traitées dans ce guide mais réglées au cas par cas entre le maître d'ouvrage et le fournisseur de BFUP.

PART 3

DURABILITY OF UHPFRC

3.1. Introduction

UHPFRC is very different to the materials usually encountered in civil engineering. Apart from being far stronger than conventional concrete, it has outstanding qualities in terms of durability, as can be seen from the results of tests carried out to date [3.1]. What is more, the first tests with UHPFRC are now around ten years old, the first structures built with it about five years old, and natural-ageing results confirm good durability.

This performance means UHPFRC can have interesting applications, such as for structures in highly aggressive environments, waste storage [3.2], or structures for the nuclear industry [3.3] [3.4], and makes it possible to envisage structural components with very long lifetimes without maintenance or repair. In addition, the properties of UHPFRC mean thin structural elements can be made: the gain in durability compensates the reduction in thickness. What is more, these results make it possible to consider a decrease in concrete cover because of the enhanced durability.

The durability envisaged here is that of the material, not that of structures. As far as aggression associated with the special applications of UHPFRC (chemicals reservoirs, or the nuclear industry, for instance) is concerned, it is not dealt with in these Recommendations; it is something to be handled case-by-case by the project owner/engineer and the UHPFRC supplier.

Après une première partie consacrée aux dégradations envisagées dans le cadre de ces recommandations, nous présenterons les caractéristiques des BFUP comparées en terme de durabilité aux autres classes de bétons, puis nous ferons un état des connaissances concernant les agressions particulières liées à la nature même des BFUP. Pour terminer, une dernière partie sera consacrée à la tenue au feu des BFUP : cette agression ne fait pas partie de la durabilité telle qu'envisagée dans les approches classiques, mais cet aspect important mérite d'être évoqué.

3.2. Dégradations considérées

Pour évaluer la durabilité d'un matériau, il convient d'identifier les mécanismes agresseurs potentiels en situation d'exploitation normale.

Les situations accidentelles ne concernent pas a priori la durabilité, dans le sens où le temps est considéré comme le paramètre prépondérant. La gestion post-accidentelle demande une action spécifique de surveillance et de maintenance.

Dans cette optique, les mécanismes possibles de dégradation sont globalement soit des processus à effets mécaniques sous forme d'efforts ou de déformations imposées (fluage, retrait, fatigue, abrasion, déplacements imposés et températures, donc incendie et gel), soit des mécanismes physico-chimiques (agents biologiques, chimiques, irradiation ...).

La maîtrise des processus mécaniques de dégradation (fissuration, éclatement, flèches) relèvent généralement du respect de règles de dimensionnement, une fois les propriétés mécaniques du matériau spécifiées et contrôlées et leur évolution dans le temps caractérisée a priori. Cet aspect ne sera donc pas abordé dans ce chapitre.

This section of the Recommendations looks first at the kinds of damage that can be envisaged, then compares the durability characteristics of UHPFRC with other classes of concrete, and gives a state-of-the-art review of current knowledge on the specific damage associated with UHPFRC because of its intrinsic qualities. This section ends with a discussion of the fire resistance of UHPFRC: fire is not usually considered to be an aspect of durability, but is an important factor that should be mentioned.

3.2. Damage considered

To assess the durability of a material, the potential mechanisms of aggression under normal circumstances have to be identified.

In principle accident situations do not concern durability, in so far as time is considered to be the preponderant factor. Post-accident management requires specific monitoring and maintenance.

With this in mind, in general terms the possible damage mechanisms are either mechanical effects in the form of imposed strain and stress (creep, shrinkage, fatigue, abrasion, imposed displacement and temperature, including fire and freeze-thaw cycles), or physico-chemical mechanisms (biological or chemical agents, radiation, etc.).

Controlling mechanical damage processes (cracking, spalling, deflection) is generally a matter of compliance with design rules, once the mechanical properties of the material have been specified and checked and their evolution over time characterized. This aspect will therefore not be addressed here.

Les mécanismes physico-chimiques dépendent :

- d'une part des propriétés de transfert du matériau (porosité, perméabilité, diffusivité). Cet aspect sera traité au paragraphe 3.3 dans lequel nous présenterons les caractéristiques des BFUP à partir d'indicateurs de durabilité « classiques » tels qu'ils ont été définis dans le groupe AFGC «Indicateurs de durabilité» animé par Véronique Baroghel-Bouny [3.5]. Cette partie permettra de comparer les BFUP aux bétons plus courants ;
- d'autre part de la réactivité des différents composants (portlandite, adjuvants, anhydres résiduels, fibres ...) qui peuvent avoir une action de dégradation du matériau, mais peuvent aussi intervenir sur des éléments plus subjectifs tel que l'aspect des parements. Le paragraphe 3.4 sera consacré à l'identification des dégradations possibles liées aux particularités du matériau BFUP ainsi qu'aux indicateurs associés. Cette partie est un état de l'art des connaissances disponibles à l'heure actuelle.

3.3. Agressions « classiques » et indicateurs de durabilité liés à ces agressions

3.3.1 Résumé des objectifs et du programme du groupe AFGC «Indicateurs de durabilité»

L'objectif du groupe « Indicateurs de durabilité » consiste à formaliser une méthodologie pour l'obtention d'un béton apte à prémunir les ouvrages contre une dégradation donnée, en particulier dans le cadre contractuel où il doit satisfaire à une exigence de durée de vie. L'approche est basée sur le choix d'un nombre réduit d'indicateurs de durabilité, paramètres-clés dans la quantification et la prévision de la durabilité du béton. Ces paramètres sont mesurés à partir d'essais en laboratoire sur éprouvettes ou sur prélèvements.

The physico-chemical mechanisms depend on:

- the transfer properties of the material (porosity, permeability, diffusivity). This aspect is dealt with in section 3.3, where the characteristics of UHPFRC are presented on the basis of “conventional” durability indicators as defined by the AFGC “Durability Indicators” working group convened by Véronique Baroghel-Bouny [3.5]. This section compares UHPFRC with more standard concretes.
- the reactivity of the different constituents (portlandite, admixtures, residual anhydrous materials, fibres, etc.) which could have detrimental effects on the material but also affect more subjective aspects such as appearance. Section 3.4 concerns identification of the possible kinds of damage that could result from specific features of UHPFRC and the associated indicators. This section is a state-of-the-art review of the information currently available.

3.3. “Conventional” damage mechanisms and associated durability indicators

3.3.1 Summary of objectives and of the programme of the AFGC “Durability Indicators” group

The objective of the “Durability Indicators” group is to formalize a methodology for obtaining a concrete capable of predisposing structures to withstand a given damage mechanism, particularly in the context of contracts where it must meet a service lifetime requirement. The approach is based on the choice of a reduced number of durability indicators, key parameters in the quantification and forecasting of concrete durability. These parameters are measured on the basis of laboratory tests on specimens or samples.

Le choix de ces indicateurs et la spécification de critères (seuils et classes) d'acceptabilité pour ces paramètres, en fonction du type d'environnement considéré, constituent les deux étapes majeures de l'approche performantielle de la durabilité entreprise dans le cadre de ce groupe.

L'objectif du présent guide n'est pas de reprendre le travail du groupe « Indicateurs de durabilité », mais de s'appuyer sur ces travaux en vue de caractériser les BFUP. C'est pourquoi les mêmes indicateurs de durabilité ont été conservés, à savoir :

- la porosité accessible à l'eau,
- la perméabilité à l'oxygène,
- le coefficient de diffusion des ions chlorure,
- la teneur en portlandite.

Pour ces grandeurs, des méthodes de mesure seront recommandées et des seuils permettant de définir la classe des BFUP seront indiqués.

3.3.2 Porosité accessible à l'eau

La méthode utilisée est une recommandation AFREM intitulée « Détermination de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau » [3.6]. L'essai consiste à déterminer par pesée les éléments suivants : la masse d'un corps d'épreuve sec, sa masse lorsqu'il est saturé en eau et son volume apparent par pesée hydrostatique. La gamme de mesure couverte par cette méthode va de 1 % à 20 % environ. Les valeurs présentées dans le tableau suivant sont données à titre indicatif :

	BO OC	BHP HPC	BTHP VHPC	BFUP UHPFRC
porosité à l'eau (%) <i>water porosity (%)</i>	12 - 16	9 - 12	6 - 9	1,5 - 6

The choice of these indicators and the specification of acceptability criteria (thresholds and classes) for them, in accordance with the type of environment considered, are the two key steps in the performance-oriented approach to durability implemented by this group.

The objective of these Recommendations is not to re-invent the work of the "Durability Indicators" group but to use its work as a basis for characterizing UHPFRC. For this reason these Recommendations use the same durability indicators:

- water porosity,
- oxygen permeability,
- chloride-ion diffusion factor,
- portlandite content.

Measuring methods and thresholds for defining UHPFRC classes will be given for these aspects

3.3.2 Water porosity

The method used is the AFREM recommendation entitled "Détermination de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau" (Determination of apparent density and pore system accessible to water [3.6]). The test involves determining the mass of a dry specimen, its saturated mass, and its apparent volume (by hydrostatic weighing). The range of measurements covered by this method goes from 1% to about 20%. The values in the following table are given for guidance:

Tableau 3.1 : Porosités à l'eau comparées des différents types de bétons.
Table 3.1 : Water porosity of different kinds of concrete

3.3.3 Perméabilité à l'oxygène

La méthode utilisée est une recommandation AFREM intitulée « Essai de perméabilité aux gaz du béton durci » [3.6]. L'essai consiste à mesurer le débit volumique de gaz traversant en régime permanent un échantillon de matériau à base de liant hydraulique soumis à un gradient de pression constant, puis par application de la loi de Darcy d'en déduire la perméabilité aux gaz. La gamme de mesure couverte par cette méthode va de 10^{-15} m^2 à 10^{-19} m^2 environ. Les valeurs présentées dans le tableau suivant sont données à titre indicatif. En outre la perméabilité aux gaz étant fortement dépendante de l'état de saturation du matériau, les valeurs indiquées correspondent à l'état sec tel que défini dans les recommandations AFREM.

3.3.3 Oxygen permeability

The method used is the AFREM recommendation entitled "Gas permeability of hardened concrete" (Gas permeability of hardened concrete [3.6]). The test involves measuring the steady-state volumic flowrate of gases passing through a sample of a material based on hydraulic binders under a constant pressure gradient, and then, using Darcy's law, deducing its permeability to gas. The range of measurement covered by this method goes from 10^{-15} m^2 to about 10^{-19} m^2 . The values in the following table are given for guidance. In addition, since gas permeability depends very much on the degree of saturation of the material, the values given correspond to the dry state, as defined in the AFREM recommendations.

	BO OC	BHP HPC	BTHP VHPC	BFUP UHPC
Perméabilité à l'oxygène (m^2) <i>Oxygen permeability (m^2)</i>	10^{-15} à 10^{-16}	10^{-17}	10^{-18}	$<10^{-19}$

Tableau 3.2 : Perméabilités à l'oxygène comparées des différents types de bétons.

Table 3.2 : Oxygen permeability of different kinds of concrete

La perméabilité des BFUP est inférieure au seuil de détection de la méthode AFREM.

The permeability of UHPC is below the detection threshold of the AFREM method.

3.3.4 Coefficient de diffusion des ions chlorure

Il n'existe pas encore de méthode recommandée pour la diffusion des ions chlorure que ce soit au niveau français ou au niveau européen.

3.3.4 Chloride-ion diffusion factor

There is as yet no recommended method for determining chloride-ion diffusion, either in France or in Europe generally.

Les valeurs présentées dans le tableau suivant sont là à titre indicatif. Ces mesures ont été obtenues à partir d'un essai de diffusion libre [3.5]. L'espèce diffusante est le tritium. On calcule le coefficient de diffusion effectif à partir de la pente du flux de tritium traversant l'échantillon en régime stationnaire.

The values in the following table are given for guidance. They were obtained from a free diffusion test [3.5]. The tracer was tritium. The effective diffusion factor is calculated from the gradient of tritium flow through the specimen under steady-state conditions.

	BO OC	BHP HPC	BTHP VHPC	BFUP UHPFRC
Coefficient de diffusion du tritium (m^2/s) <i>Tritium-ion diffusion factor (m^2/s)</i>	2.10^{-11}	2.10^{-12}	10^{-13}	2.10^{-14}

Tableau 3.3 : Coefficients de diffusion du tritium comparés des différents types de bétons.
Table 3.3 : Tritium diffusion factor of different kinds of concrete

3.3.5 Teneur en portlandite

Les valeurs présentées dans le tableau suivant sont données à titre indicatif. La méthode de calcul utilisée est indiquée à l'annexe 9.

	BO OC	BHP HPC	BTHP VHPC	BFUP UHPFRC
Teneur en portlandite (kg/m^3) <i>Portlandite content (kg/m^3)</i>	76	86	66	0

Tableau 3.4 : Teneurs en portlandite comparées des différents types de bétons.
Table 3.4 : Portlandite content of different kinds of concrete

3.3.5 Portlandite content

The values in the following table are given for guidance. The calculation method used is described in Annex 9.

3.3.6 Conclusion

Les résultats présentés ci-dessus confirment la position des BFUP par rapport aux autres types de bétons : pour l'ensemble des indicateurs de durabilité « classiques », les valeurs obtenues pour les BFUP vont dans le sens d'une nette amélioration de la durabilité.

3.3.6 Conclusion

The results presented above confirm the position of UHPFRC with respect to other types of concrete: for all the "conventional" durability indicators, the values obtained for UHPFRC indicate a clear improvement in durability.

3.4. Indicateurs particuliers liés à la nature des BFUP

3.4. Indicators associated with specific features of UHPFRC

3.4.1 Introduction

Les BFUP, outre les mécanismes classiques de dégradation auxquels ils pourraient être soumis, peuvent-ils présenter des dégradations liées à leur nature particulière ? Par exemple, les questions suivantes sont souvent posées :

3.4.1 Introduction

Are there any kinds of damage specifically related to the features of UHPFRC, i.e. other than the conventional damage mechanisms that could affect it? The following questions are often asked, for example:

- La stabilité dans le temps des adjuvants présents en grande quantité (par rapport à ce qui existait jusqu'à présent).
- Réhydratation éventuelle : du fait de la limitation des réactions d'hydratation par la faible teneur en eau, on constate la présence d'anhydres et de gypse résiduels. Ces grains anhydres peuvent-ils entraîner à long terme des phénomènes de gonflement et de microfissuration ?
- La corrosion des fibres métalliques.
- Les agressions chimiques sur fibres polymères.

3.4.2 Stabilité des adjuvants

Les superplastifiants des bétons sont des polyélectrolytes ou polymères hydrosolubles.

Ils peuvent être classés historiquement dans les familles suivantes :

Adjuvants de première génération :

- poly-naphtalène-sulfonates (PNS)

Adjuvants de seconde génération :

- poly-méla mine-sulfonates (PMS)

Adjuvants de troisième génération :

- polycarboxylates (PC), et hybrides avec chaînes sulfonates

Adjuvants de quatrième génération :

- poly-carboxylates-polyox (PCP)
- poly-phosphonates-polyox

Aucun de ces produits n'est toxique, à la dose où on les emploie typiquement, soit 0,5 à 2% du poids de ciment. (dose typique dans les BFUP : 1,4 % d'extrait sec par rapport au ciment).

are often asked, for example:

- How good is the long-term stability of the admixtures used in large quantities (compared to previous practice)?
- Possible rehydration: because of the limitation on hydration reactions because of the low water content, there is some residual anhydrite and gypsum. In the long term, could these grains of calcium sulphate cause swelling and microcracking?
- What about corrosion of steel fibres?
- What about chemical aggression of polymer fibres?

3.4.2 Stability of admixtures

Concrete superplasticizers are polyelectrolytes or water-soluble polymers.

Chronologically, they are classified as the following types:

First-generation:

- polynaphthalene-sulphonates (PNS)

Second-generation:

- polymelamine-sulphonates (PMS)

Third-generation:

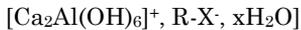
- polycarboxylates (PC), and hybrids with sulphonate chains

Fourth-generation:

- polycarboxylate-polyox (PCP)
- polyphosphonate-polyox

None of these products is toxic at the dosages typically used, i.e. 0.5 to 2% by weight of the cement content (typical superplasticizer content of UHPFRC: 1.4% dry extract by mass of cement).

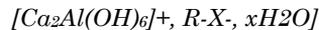
Ces molécules se fixent sur les surfaces minérales lors du gâchage, et améliorent la fluidité des bétons en réduisant les interactions entre particules (effet de charge de surface et effet stérique). Au cours de la prise, elles se trouvent majoritairement emprisonnées dans la structure interfeuillet des hydrates, typiquement ceux de la famille des aluminates hydratés hexagonaux. Cette réaction peut être assimilée à la formation de complexes insolubles, pouvant contenir jusqu'à 70% de matière organique [3.7]. La structure de ces complexes peut s'écrire :



Ainsi, au bout de 7 jours, il ne reste pratiquement plus de molécules en solution dans la phase aqueuse des bétons, et le rendement de la précipitation est voisin de 100% [3.8]. Les composés formés demeurent stables dans le milieu basique des bétons, tant que ceux-ci ne subissent pas d'agression chimique. Dans le cas contraire, par exemple en cas de diminution du pH, par carbonatation (formation de monocarbo-aluminate), par l'action des chlorures (formation de mono-chloro-aluminate), ou par l'action des pluies acides (lixiviation acide), des molécules d'adjuvant peuvent être relarguées dans les pores capillaires des bétons. Après plusieurs mois de contact avec la phase aqueuse basique des pores capillaires, certaines molécules d'adjuvants peuvent subir une hydrolyse alcaline : par exemple les mélamines-sulfonates libèrent de la vanilline, qui n'est pas toxique. Ceci ne met pas en danger l'intégrité mécanique des bétons, qui est assurée par les silicates de calcium hydratés (CSH), indépendamment du contenu des pores capillaires.

La corrosion bactérienne, qui affecte les bétons poreux, peut également transformer certains adjuvants, par exemple en créant un milieu réducteur à la surface du béton : la réduction des sulfonates peut produire des traces de mercaptans et de sulfures, ce qui dégage de mauvaises odeurs. Ces réactions de surface sont activées en ambiance tropicale (Brésil).

These molecules attach themselves to mineral surfaces during mixing, and improve the fluidity of concrete by reducing interactions between particles (effect of surface charge and steric hindrance). As the concrete sets, most of them are trapped in the interleaf structure of the hydrates, typically in those of the hexagonal hydrated aluminates family. This reaction can be assimilated to the formation of insoluble compounds containing up to 70% of organic matter [3.7]. The structure of these complexes can be expressed as follows:



After 7 days there are practically none of these molecules in solution in the aqueous phase of concrete, and the precipitation yield is close to 100% [3.8]. The compounds formed remain stable in the basic medium of concrete, as long as the concrete is not exposed to chemical aggression. Otherwise, for instance in the event of a pH reduction due to carbonation (formation of monocarbo-aluminate), the effect of chlorides (formation of mono-chloro-aluminate), or the effect of acid rain (acid leaching), molecules of admixture can be salted out in the capillary pores of the concrete. After several months in contact with the basic aqueous phase of the capillary pores, some admixture molecules can undergo alkaline hydrolysis: melamine-sulphonates release vanillin, for example, which is not toxic. This does not compromise the mechanical integrity of the concrete since this is ensured by the hydrated calcium silicates (HCS), independently of the content of the capillary pores.

Bacterial corrosion, which affects porous concrete, can also transform some admixtures, by creating a reduction medium on the surface of the concrete, for instance: reduction of sulphonates can produce traces of mercaptans and sulphides, which produce offensive odours. These surface reactions are activated in tropical climates (e.g. Brazil).

La garantie de stabilité des adjuvants est donc celle du béton lui-même, plutôt qu'une question de dose. A ce titre, les BHP et particulièrement les BFUP, sont beaucoup mieux placés que les bétons ordinaires, car ils résistent mieux aux agressions chimiques. L'absence de connectivité des pores capillaires (BFUP) est également un facteur favorable.

La stabilité à long terme des adjuvants ne concerne pratiquement que les bétons ordinaires. Comme elle ne constitue pas un danger potentiel estimé comme important, très peu de travaux de recherche lui sont consacrés. Les quelques auteurs ayant étudié le comportement à la lixiviation des bétons adjuvantés concluent unanimement à la fixation efficace des molécules sous forme de composés insolubles [3.8], [3.9], [3.10], [3.11], [3.12]. Seule une légère dissolution de surface donnant lieu à un relarguage de quelques mg/l a été observée. Cette conclusion a été confirmée jusqu'à des doses d'adjuvant de l'ordre de 5% d'extrait sec par rapport au ciment, ce qui constitue le triple des doses typiques utilisées dans les BFUP [3.13].

3.4.3 Reprise de l'hydratation

Le gonflement par hydratation différée : une "fausse bonne question"...

La teneur en clinker résiduel des bétons (Annexe 9, tableau 1) est inversement proportionnelle au rapport E/C, lorsque celui-ci est inférieur à 0,418, (valeur nécessaire à l'hydratation complète). La présence de ce clinker résiduel présente de nombreux avantages, notamment par le module élastique élevé du clinker (130 GPa, soit le double de celui du quartz). Remarquons toutefois que les bétons ordinaires présentent tous, notamment aux jeunes âges, une teneur non négligeable en clinker résiduel. En effet, l'hydratation étant limitée par la diffusion de l'eau à travers les hydrates, elle est rarement complète, même à des E/C élevés.

Rather than dosage, therefore, it is the stability of the concrete that guarantees the stability of admixtures. In this respect, HPCs and especially UHPFRC are in a much better position than ordinary concretes, for they have better resistance to chemical aggression. The absence of connections between capillary pores (UHPFRC) is also a favourable factor.

The long-term stability of admixtures practically concerns only ordinary concrete. Since its potential risk is not deemed to be important, very little research work has been done on it. The few authors who have studied the leaching behaviour of concretes with admixtures all conclude that the molecules are effectively fixed in the form of insoluble compounds [3.8], [3.9], [3.10], [3.11], [3.12]. Only slight surface dissolution causing salting out of a few mg/l has been observed. This conclusion has been confirmed for admixture contents of up to 5% dry extract by mass of cement, which is three times the typical admixture contents in UHPFRC [3.13].

3.4.3 Resumption of hydration

Swelling due to delayed hydration: a good question, but...

The residual clinker content of concrete (Annex 9, Table 1) is inversely proportional to the W/C ratio when the W/C ratio is lower than 0.418 (value necessary for complete hydration). There are many advantages to having residual clinker, particularly because of the high modulus of elasticity of clinker (130 GPa, i.e. double that of quartz). However, it should be noted that ordinary concretes all have an appreciable residual clinker content, especially at early ages. This is because hydration is restricted by the diffusion of water through the hydrates, and is rarely complete, even with high W/C ratios.

Une question est souvent posée concernant l'éventualité d'un gonflement structural des BHP et BFUP, sous l'effet d'une éventuelle pénétration d'eau à long terme (hydratation différée).

On sait que l'hydratation de 1 cm³ de clinker produit environ 2,18 cm³ d'hydrates. Lorsque l'eau servant à former ces hydrates est prélevée à l'intérieur du béton (eau des pores capillaires), la réaction s'accompagne d'une réduction de volume absolu (contraction Le Chatelier) de l'ordre de 10% :

Volume d'hydrates = 0,9 x Volume (clinker + eau d'hydratation)

En revanche, si cette eau était prélevée à l'extérieur du béton, on pourrait craindre une augmentation de volume, et notamment pour les bétons de très faible porosité capillaire, ce qui est le cas des BFUP.

Un raisonnement simple, confirmé par l'expérience, montre qu'il n'en est rien. En effet, le scénario précédent est basé implicitement sur une vision dite «topochimique» de l'hydratation, c'est à dire un mécanisme d'absorption locale d'eau par les grains de clinker, pour former des hydrates in situ. Si ce mécanisme existait vraiment, les bétons ordinaires eux-mêmes montreraient un considérable gonflement, dès que la taille des cristaux de portlandite deviendrait égale à la taille des pores capillaires.

Fort heureusement, il n'en est rien. Henri Le Chatelier a montré dès le début du 20^{ème} siècle que l'hydratation procède par dissolution des anhydres, diffusion dans la phase aqueuse des ions ainsi produits, création d'une solution sursaturée par rapport aux hydrates, qui précipitent parfois loin de leur « source d'ions » initiale. C'est ainsi que lors de l'hydratation de 1 cm³ de clinker, un égal volume d'hydrates précipite à l'emplacement des grains initiaux, et 1.18 cm³ précipite dans les pores capillaires environnants, parfois jusqu'à une distance de plusieurs dizaines de microns (« rayon d'action » des ions du clinker, par exemple lors de la réaction pouzzolanique).

The question of possible swelling of HPC and UHPFRC as result of possible long-term penetration of water (delayed hydration) is often raised.

We know that the hydration of 1 cm³ of clinker produces about 2.18 cm³ of hydrates. When the water that forms these hydrates is taken from inside the concrete (capillary water), the reaction is accompanied by a reduction in absolute volume (Le Chatelier contraction) of about 10%:

Volume of hydrates = 0.9 x Volume (clinker + water of hydration)

On the other hand, if this water were taken from outside the concrete, a volume increase could be feared, particularly for concrete with very little pore capillarity, which is the case of UHPFRC.

But simple reasoning—confirmed by experience—shows that this is not so. The above scenario is implicitly based on a so-called “topochemical” vision of hydration, i.e. a mechanism of local water absorption by grains of clinker to form hydrates in situ. If this mechanism were actually to occur, even ordinary concrete would swell to a considerable extent as soon as the size of portlandite crystals attained the size of the capillary pores.

Most fortunately this does not happen. In the early 20th century Henri Le Chatelier demonstrated that hydration involves dissolution of anhydrous materials, diffusion of the ions thus produced in the aqueous phase, and creation of a solution which is supersaturated with respect to the hydrates which sometimes precipitate far from their initial “source of ions”. This is why when 1 cm³ of clinker hydrates, the same volume of hydrates is precipitated at the location of the initial grains, and 1.18 cm³ precipitates in the surrounding capillary pores, sometimes to a distance of several dozen micrometres (“radius of action” of the clinker ions, in pozzolanic reaction for instance).

Si l'on envisage la pénétration d'eau dans un béton de faible porosité capillaire (BHP, BFUP), par exemple sous l'effet d'une microfissuration liée au retrait endogène, ou sous l'effet de la dissolution entraînée par une agression chimique, il faut bien reconnaître que **les ions provenant de la dissolution du clinker résiduel vont pouvoir circuler et diffuser par le même chemin que celui qui a amené l'eau.**

Deux scénarios sont alors envisageables :

- L'eau arrive par des microfissures, par condensation capillaire. Alors la dissolution du clinker résiduel va permettre d'augmenter le taux de saturation de cette eau, et des hydrates vont se former dans les microfissures, jusqu'à les cicatriser complètement.
- L'eau arrive par le biais d'une agression chimique qui a réussi à dissoudre une partie des hydrates, et crée des chemins de percolation vers les grains anhydres résiduels. Dans ce cas la sous-saturation peut être maintenue par l'agresseur chimique, qui en général abaisse graduellement le pH dans la « zone dégradée ». Les ions issus de la dissolution du clinker résiduel vont alors précipiter localement dans la zone de forte sous-saturation, et diffuser partiellement vers l'interface avec le milieu extérieur (cas classique de la lixiviation).

Ces deux scénarios ont été entièrement vérifiés par l'expérience, lors de recherches qui ont débuté dès 1994 [3.14], [3.15], [3.16]. L'absence de processus osmotiques, par lesquels l'eau pourrait être « pompée » à travers le « gel » de CSH, est confirmée par l'égalité des ordres de grandeur des coefficients de diffusion de l'eau tritiée et des ions minéraux comme le Césium ou le chlorure [3.14]. Les études par microscopie à haute résolution de la nanostructure des BFUP, montrant que le CSH n'est pas un véritable gel, mais possède une structure nanocristalline [3.16], expliquent bien ce comportement.

*If we consider penetration of water into a concrete with low capillary porosity (HPC, UHPFRC), under the effect of microcracking due to autogenous shrinkage, for example, or under the effect of dissolution caused by chemical aggression, it has to be admitted that **the ions resulting from dissolution of the residual clinker will be able to circulate and diffuse along the same path that the water entered by.***

Two scenarios can then be envisaged:

- Water gets in through microcracks, by capillary condensation. Dissolution of the residual clinker will increase the degree of saturation of that water, and hydrates will be formed in the microcracks until they are fully closed.
- Water gets in as a result of chemical aggression which has managed to dissolve some of the hydrates and create seepage paths to the residual anhydrous grains. In this case, undersaturation can be sustained by the aggressive chemical agent, which, as a rule, gradually reduces the pH in the “damaged zone”. The ions resulting from dissolution of the residual clinker will then precipitate locally in the zone of high undersaturation and partially diffuse to the interface with the external medium (classic case of leaching).

Both these scenarios have been fully confirmed by testing, during research that began in 1994 [3.14], [3.15], [3.16]. The absence of osmotic processes by which water could be “pumped” through the HCS “gel” is confirmed by the fact that the orders of magnitude of diffusion coefficients of tritium-bearing water and mineral ions such as cesium or chloride are the same [3.14]. High-resolution microscope examination of the nanostructure of UHPFRC, showing that HCS is not really a gel but has a nanocrystalline structure [3.16], explains this behaviour.

Il en résulte que, loin de constituer un danger pour la durabilité des BHP et BFUP, le clinker résiduel constitue un atout incontestable pour les BFUP, et permet :

- d'augmenter le module d'Young moyen de la pâte de ciment,
- de cicatrifier les microfissures, par condensation capillaire et formation d'hydrates,
- de lutter contre les agressions chimiques en maintenant le niveau de pH alcalin et de concentrations ioniques nécessaires à la stabilité des hydrates, jusqu'à une distance proche de l'interface avec le milieu extérieur.

3.4.4 Corrosion des fibres métalliques

Pour les raisons évoquées précédemment, les BFUP, même microfissurés, sont particulièrement efficaces pour maintenir le niveau de pH nécessaire à la passivation des aciers, qu'il s'agisse de câbles de précontrainte, ou des fibres métalliques utilisées pour obtenir un comportement ductile. Les poutres et poutrelles installées depuis 1998 dans un aéro-réfrigérant de la centrale de CATTENOM en donnent une image « in vivo ».

Des essais accélérés de corrosion ont été réalisés dès 1995 au CSIC-IET de Madrid [3.17]. Plus récemment, des éprouvettes préfissurées mécaniquement ont été étudiées au LERM dans le cadre du programme REACTIF 97 T 0087, sous la direction de Micheline Moranville [3.13], [3.14]. Ces éprouvettes équipées de plots de retrait avaient été soumises à des cycles de trempage-séchage à 50°C, dans le but de détecter d'éventuels phénomènes de DEF (Réaction sulfatique différée interne - Delayed Ettringite Formation). Il en ressort que, non seulement aucun gonflement du type DEF ne s'est manifesté, mais que de plus la passivation des fibres a été maintenue malgré les conditions drastiques d'exposition. Ce comportement excellent est attribuable à la formation d'hydrates colmatant progressivement les microfissures (cicatrisation).

Consequently, far from constituting a danger for the durability of HPC and UHPFRC, residual clinker is an indisputable advantage for UHPFRC, and it enables:

- an increase in the mean modulus of elasticity of the cement paste,
- closure of microcracks, by capillary condensation and formation of hydrates,
- combating of chemical aggression by sustaining the alkaline pH level and ion concentrations necessary for the stability of the hydrates over a distance close to the interface with the external medium.
-
-

3.4.4 Corrosion of steel fibres

For the reasons given above, even microcracked UHPFRC is particularly effective at maintaining the pH level necessary for passivation of steel reinforcement, whether it is prestressing tendons or the steel fibres used to achieve ductility. The beams installed since 1998 in a cooling tower at the Cattenom nuclear power plant are a real-life example of this.

Accelerated corrosion tests were carried out by CSIC-IET in Madrid in 1995 [3.17]. More recently, mechanically pre-cracked specimens have been studied at the LERM, as part of the REACTIF 97 T 0087 programme headed by Micheline Moranville [3.13], [3.14]. The specimens were equipped for extensometric monitoring and put through cycles of immersion and drying at 50°C in order to detect any Delayed Ettringite Formation (DEF). It transpired that not only was there no DEF-type swelling, but that in addition the passivation of fibres was maintained, despite the drastic exposure conditions. This excellent behaviour can be attributed to the formation of hydrates that gradually fill the microcracks (healing).

La remarquable résistance à la carbonatation des BFUP (< 0.2 mm à 4 ans) est une garantie de bonne protection des câbles de précontrainte par fil adhérent. La formule de TUUTI donne une profondeur de carbonatation extrapolée à 500 ans inférieure à 2 mm [3.18].

The remarkable resistance of UHPFRC to carbonation (< 0.2 mm after 4 years) is a guarantee of good protection of pre-tensioned prestressing wires. The Tuuti formula gives extrapolated carbonation after 500 years of less than 2 mm [3.18].

De même, la très grande résistivité électrique de la matrice est une cause de bonne protection des aciers. Celle des BFUP est de deux ordres de grandeur supérieure à celle des bétons ordinaires (tableau 3.5)

Similarly, the very high electrical resistivity of the matrix affords good protection to reinforcement. The resistivity of UHPFRC is two decades higher than that of ordinary concrete (Table 3.5)

	B30 / C30	B80 / C80	Ductal®
Vitesse de corrosion des armatures (µm/an) <i>Rate of reinforcement corrosion (mm/year)</i>	1,2	0,25	< 0,01
Résistivité - Resistivity (kW.cm)	16	96	1133

Tableau 3.5 : Résistivités électriques comparées des différents types de bétons.

Table 3.5 : Electrical resistivity of different kinds of concrete

La vitesse de corrosion et la résistance de polarisation pour des armatures métalliques noyées dans une matrice BPR ont été étudiés au CSIC par une méthode potentiodynamique [3.19].

The rate of corrosion and the polarization resistance of steel reinforcement embedded in a Reactive Powder Concrete matrix were studied by the CSIC using a potentiodynamic method [3.19].

L'interprétation du diagramme de Nyquist conduit à des vitesses de corrosion non mesurables pour ces BFUP (Cf. tableau 3.6).

Interpretation of the Nyquist diagram shows unmeasurable corrosion rates for these UHPFRCs (cf. Table 3.6).

La seule trace de corrosion des fibres métalliques est uniquement superficielle : des échantillons exposés aux pluies acides pendant plusieurs années montrent la formation de taches de rouille au débouché de fibres au contact direct de l'atmosphère. Ceci pourrait nuire à l'esthétique des pièces de parement, pour lesquelles il est donc conseillé d'utiliser des formulations à base de fibres polymères, comme cela a par exemple été utilisé pour la Gare TGV de Monaco.

The only trace of corrosion of steel fibres is at the surface: specimens exposed to acid rain for several years form rust stains where fibres daylighting at the surface are in direct contact with the atmosphere. This could detract from the aesthetics of facing components for which it is therefore recommended to use mixes with polymer fibres, as for instance, for Monaco TGV railway station.

Les BFUP résistent à des conditions chimiques dans lesquelles les bétons armés ordinaires sont rapidement détruits (tableau 3.6).

UHPFRCs stand up to chemical conditions under which ordinary reinforced concretes are rapidly destroyed (Table 3.6).

Les essais réalisés en laboratoire au CSIC [3.17] et en vraie grandeur à Montréal, dans une zone de marnage du St Laurent, montrent l'excellente tenue à l'eau de mer et l'absence de corrosion en profondeur des fibres des BFUP.

Seuls des milieux extrêmement corrosifs pour les bétons, comme le nitrate d'ammonium concentré, parviennent à dégrader les formulations Ductal®. Dans ces milieux, la corrosion des fibres métalliques (complexation par l'ion ammonium) est plus rapide que l'attaque chimique de la matrice.

Laboratory tests carried out by the CSIC [3.17] and full-scale tests carried out in Montreal, in a zone subject to submersion by the Saint Lawrence river, demonstrate UHPFRC's excellent resistance to seawater and the absence of corrosion on fibres deep within the concrete.

Only environments which are extremely corrosive for concrete, such as concentrated ammonium nitrate, manage to damage Ductal® mixes. In such environments, corrosion of steel fibres (compounding by the ammonium ion) is faster than chemical attack of the matrix.

Milieux <i>Environment</i>	Perte de masse <i>Weight difference</i>	Résistance en flexion <i>Flexural strength</i>	Résistivité relative <i>Relative resistivity</i>	Corrosion des fibres ⁽¹⁾ <i>Corrosion of fibres ⁽¹⁾</i>
Eau Distillée <i>Distilled water</i>	+ 0.6%	Identique <i>Identical</i>	Identique <i>Identical</i>	Non – No
Eau de mer <i>Seawater</i> ATM D1141-90	+ 0.6%	Identique <i>Identical</i>	Diminution Stabilité après 30 jours <i>Reduction</i> <i>Stable after 30 days</i>	Non – No
Sulfate de calcium <i>Calcium sulphate</i> 0.3 M SO ₄	+ 0.7%	Identique <i>Identical</i>	Identique <i>Identical</i>	Non - No
Sulfate de sodium <i>Sodium sulphate</i> 0.3 M	+ 0.2%	Diminution, (dans la bande d'incertitude) <i>Reduction (in the zone of uncertainty)</i>	Diminution Stabilité après 30 jours <i>Reduction</i> <i>Stable after 30 days</i>	Non - No
Acide Acétique <i>Acetic acid</i> pH = 3.5	+ 0.1%	Identique <i>Identical</i>	Faible perte <i>Slight loss</i>	Non – No
Sulfure et nitrate d'ammonium <i>Ammonium sulphide and nitrate</i> 2.9 g/l Na ₂ S.9H ₂ O + 29 g/l NH ₄ Cl	-0.9 %	Diminution (dans la bande d'incertitude) <i>Reduction (in the zone of uncertainty)</i>	Forte perte <i>Large loss</i>	Non – No

⁽¹⁾ - Présence de taches de rouille superficielles au débouché des fibres, qui apparaissent intactes à une profondeur de moins d'un millimètre.

Rust stains on the surface where fibres daylight; fibres are seen to be intact less than a millimetre below the surface.

Tableau 3.6 : Tenue aux agents agressifs du Ductal® FM (essais Koch-Steinegger réalisés au CSIC, éprouvettes 10x10x60 mm+600ml de solution agressive, résultats à 3 mois).

Table 3.6 : Resistance of Ductal® FM to aggressive agents (Koch-Steinegger tests carried out by CSIC, 10x10x60 mm specimens + 600 ml of aggressive solution, results after 3 months).

3.4.5 Durabilité des fibres polymères

Les fibres polymères sont susceptibles de se dégrader par oxydation. De plus elles sont sensibles à la lumière UV. De part leur très faible porosité, les BFUP constituent une bonne protection à l'égard de ces dégradations. Des problèmes pourraient survenir dans le cas de matériaux fissurés, les fissures permettant alors le passage de l'oxygène et des rayons UV. Toutefois, à l'heure actuelle, il existe des produits de protection des fibres directement incorporés au cours de la fabrication qui ralentissent et même empêchent ce type de dégradations. Une étude menée durant plus de 15 ans par D.J. Hannant [3.20] sur la durabilité de fibres polypropylène au sein d'un mortier (E/C = 0.34) a montré leur bon comportement dans le temps quel que soit le mode de conservation (à l'air libre en extérieur, en laboratoire et sous eau).

3.5. Comportement au feu des BFUP

Comme tous les bétons, les BFUP :

- sont incombustibles,
- n'ont aucune contribution au développement d'un feu,
- ont une faible conductivité thermique, de l'ordre de 1,6 W/m/K.

Comme tous les bétons, également, leurs performances mécaniques (module et résistances) évoluent au cours d'un feu, avec généralement une perte relative de résistance telle que celle qui est décrite dans le DTU Feu [3.21].

Ce DTU permet, pour les bétons ordinaires (et, depuis cette année, pour les BHP de résistance nominale inférieure ou égale à 80 MPa) d'éviter la réalisation systématique d'essais et autorise la vérification de la sécurité au moyen d'un certain nombre de calculs conventionnels, qui prennent en compte, notamment, une chute forfaitaire des performances mécaniques, chute qui est définie par une courbe donnant la résistance résiduelle en fonction de la température maximale atteinte.

3.4.5 Durability of polymer fibres

Polymer fibres might deteriorate as a result of oxidation. In addition, they are sensitive to ultraviolet light. Because of its low porosity, UHPFRC provides a good degree of protection against these kinds of damage. Problems could arise in the event of cracked concrete, when the cracks would enable oxygen and UV light to come into contact with the fibres. However, there are products for protecting fibres which can be directly incorporated into the mix to slow down and even prevent this kind of damage. A study into the durability of polypropylene fibres in mortar (W/C = 0.34) carried out for more than 15 years by D.J. Hannant [3.20] has shown the sustained good behaviour of the fibres irrespective of storage conditions (in open air outdoors, in the laboratory, and underwater).

3.5. Fire performance of UHPFRC

Like all concretes, UHPFRC:

- is non-combustible,
- makes no contribution to the development of a fire,
- has low thermal conductivity, at about 1.6 W/m/K.

Again, like all concretes, its mechanical performance (modulus of elasticity and strength) changes during fire, generally with a loss of strength such as that described in the French DTU Feu code of practice [3.21].

In application of this DTU code of practice, for ordinary concretes (and, as of 2001, for HPC with a nominal strength of no more than 80 MPa), it is possible to avoid systematic testing and to perform safety checks by means of a number of conventional calculations which take account, among other things, of an safe conventional drop in mechanical performance, the drop being defined by a curve giving the residual strength versus the maximum temperature attained.

Le comportement au feu des BFUP, cependant, n'est pas couvert par le DTU Feu, pour deux raisons. Avec les BFUP, en effet, la perte de capacité portante peut avoir deux origines :

- une perte de résistance mécanique, qui dépend de l'historique de montée en température ; toutefois, nous n'avons pas suffisamment de résultats disponibles, aujourd'hui, pour accepter telle quelle la courbe du DTU, ni même pour définir une courbe enveloppe qui donnerait pour tous les BFUP une valeur forfaitaire de la perte de résistance en fonction de la température maximale atteinte ; pour chaque formulation nouvelle de BFUP, cette perte doit donc être déterminée, sur des éprouvettes normalisées, par un essai au feu normalisé ;
- certains BFUP peuvent présenter un phénomène d'écaillage en surface, ce qui conduit à une réduction de la section active, donc de la capacité portante des éléments porteurs. Dans le cas d'un BFUP qui est sujet à l'écaillage, la capacité portante résiduelle de chaque pièce pouvant être soumise au feu doit être déterminée par un essai sur un échantillon de géométrie et de dimensions représentatives de la pièce en service.

Dans le cas où un ouvrage construit en BFUP ferait l'objet de spécifications précises liées au risque d'incendie (une telle spécification doit définir les fonctions qui doivent être assurées pendant et après un feu représenté par une courbe de montée en température), la vérification de son comportement au feu peut alors être effectuée avec les valeurs des capacités portantes qui ont été mesurées par des essais dans un laboratoire agréé.

Ces essais doivent être effectués :

- sur des éprouvettes normalisées pour le cas d'un BFUP si l'on peut garantir qu'il n'est pas sujet à l'écaillage,
- sur des échantillons représentatifs des éléments porteurs dans le cas contraire.

However, the fire performance of UHPFRC is not covered by the DTU Feu document, for two reasons. In the case of UHPFRC, the loss of bearing capacity can be caused by two things:

- a loss of strength, which depends on the temperature rise versus time; for the moment, however, there is insufficient data for it to be possible to use the DTU Feu curve as-is, or even to define an envelope curve which would determine a comprehensive strength loss for all UHPFRCs in accordance with the highest temperature attained; for each new UHPFRC mix, therefore, this loss must be determined by means of a standardized fire test, using standardized specimens;
- some UHPFRC mixes can scale at the surface, thus suffering a reduction in the active sectional area and consequently of the bearing capacity of structural elements. In the case of a UHPFRC subject to scaling, the residual bearing capacity of each piece which could be subject to fire must be determined by a test on a specimen of a shape and dimensions that are representative of the functional part.

In the event that a structure made with UHPFRC is subject to detailed specifications relating to the risk of fire (such a specification must define the functions that must be provided during and after a fire represented by a temperature-rise curve), the verification of its fire performance can be carried out with the bearing capacity values measured during testing in an approved laboratory.

These tests must be carried out:

- using standardized specimens, if it can be proved that UHPFRC will not be subject to scaling,
- or otherwise using representative specimens of structural elements.

Conclusions Perspectives

Ces "Recommandations provisoires sur les bétons fibrés à ultra-hautes performances", élaborées à partir des connaissances disponibles et publiques au moment de l'élaboration du document (1997-2001), fournissent un premier référentiel permettant d'employer les BFUP de façon sûre dans les domaines du génie civil et de la construction. Ce document s'appuie sur le retour d'expérience de plusieurs chantiers significatifs (poutraison de l'aéroréfrigérant de Cattenom, passerelle de Sherbrooke, PS de Bourg-lès-Valence) et sur une dizaine d'années d'efforts de recherche sur le sujet. Il se situe dans la continuité de travaux sur les bétons à très hautes performances et sur les bétons de fibres (groupes AFREM 1990-1995).

La démarche de caractérisation et de calcul du matériau pour valoriser sa capacité de résistance en traction, qui constitue une des propositions importantes du document, porte à un certain degré d'aboutissement les recommandations de l'AFREM sur les bétons de fibres, en s'appuyant sur une expérience industrielle importante. De même, les BFUP pourront bénéficier pleinement d'une approche performancielle de la durabilité comme l'indiquent les tableaux de la 3ème partie, dans la logique des recommandations du groupe AFGC "indicateurs de durabilité".

Cependant, bien que les BFUP soient des matériaux cimentaires qui bénéficient de tous les outils méthodologiques récents dans ce domaine, ils n'en restent pas moins des matériaux "jeunes" qui méritent des recherches sur certains points sur lesquels des connaissances plus précises sont attendues et nécessaires, tant en ce qui concerne le matériau BFUP que son emploi dans les structures et sa durabilité. Certains de ces éléments signalés au fil du texte, font l'objet ici d'un récapitulatif :

Conclusions Prospects

These Interim Recommendations on Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete were drawn up on the basis of information available in the public domain at the time of preparation (1997-2001). They provide a first benchmark document for reliable use of UHPFRC in civil engineering and construction. The Recommendations are based on feedback from several significant projects (beams for the Cattenom nuclear cooling tower, Sherbrooke footbridge, Bourg-lès-Valence overpass) and on about ten years' research. They are the prolongation of work on very-high-performance and fibre-reinforced concretes (AFREM groups 1990-1995).

The procedure for characterizing and designing concrete with a view to promoting its tensile strength, which is one of the major proposals of these Recommendations, carries the AFREM recommendations on fibre-reinforced concrete a little further by making use of significant real-life experience. Similarly, UHPFRC could benefit from a performance-based approach to durability, as can be seen from the tables in Part 3. This is consistent with the recommendations of the AFGC "Durability Indicators" group.

However, although UHPFRC is a cement-based material taking advantage of all the most recent methodological tools, it is nonetheless a "young" material to which further more detailed research can be usefully devoted, with respect to both the material itself, its durability, and its use in structures. These aspects have been mentioned in the text, and some of them are recapitulated here:

- Maîtrise de la mise en œuvre : les connaissances rationnelles manquent clairement à l'heure actuelle pour comprendre et optimiser le processus de malaxage de ces matériaux, le transport et l'écoulement des BFUP à l'état frais et l'incidence du coulage en termes de répartition et orientation des fibres, l'effet d'une éventuelle vibration en fonction de la rhéologie de la matrice, etc. Des recherches sont en cours sur ces sujets, ainsi que sur la mise au point d'un outil de contrôle de la répartition des fibres et de leur orientation. Leurs retombées devraient permettre de simplifier les méthodes de caractérisation du matériau et de diminuer les coefficients liés à l'orientation aléatoire des fibres et au risque lié à un défaut local de renforcement.
- Maîtrise du comportement différé : les données sur le retrait et le fluage des BFUP sont relativement limitées et les conditions particulières des essais de laboratoire ainsi que le caractère parfois encore très évolutif du matériau lorsqu'il est chargé jeune, induisent d'importantes imprécisions dans les méthodes actuelles de calcul. L'effet bénéfique du traitement thermique sur ces questions ne supprime pas la nécessité de comprendre les mécanismes physiques en cause, pour s'assurer de comportements à très long terme. Aussi des données de laboratoire autant que des données issues de suivi d'ouvrages devraient-elles être accumulées, si possible, pour calculer les structures précontraintes en BFUP avec plus de fiabilité.
- Maîtrise des propriétés liées au frottement interne du matériau : un certain nombre de formules de la partie 2 intègrent par prudence un coefficient γ_E , principalement lié à l'absence de données expérimentales concernant la mobilisation de l'engrènement dans la vérification des bielles, la diffusion d'efforts concentrés, etc. Un calibrage rationnel de ce coefficient est à rechercher.
- *Mixing: for the moment there is clearly a lack of rational information for understanding and optimizing the mixing process, transport, and flow of fresh UHPFRC, and the effect of flow in terms of fibre distribution and orientation, the effect of any vibration, in accordance with the rheology of the matrix, etc. Research on these aspects is under way, and also on development of a tool for checking fibre distribution and orientation. The outcome of this research should make it possible to simplify the methods for UHPFRC characterization and to reduce the coefficients associated with random fibre orientation and the risk of local reinforcement deficiencies.*
- *Time-dependent behaviour: data on creep and shrinkage of UHPFRC is relatively limited, and the specific conditions of laboratory tests and the sometimes highly evolutive nature of UHPFRC under early loading result in major imprecisions in the current design methods. The beneficial effects of heat treatment do not dispense with the requirement to understand the physical mechanisms involved, in order to ensure appropriate very-long-term behaviour. Thus, both laboratory data and data from monitoring of projects must be gathered, wherever possible, in order to more reliably design prestressed UHPFRC structures.*
- *Properties associated with internal friction: a number of the formulae in Part 2 integrate a coefficient γ_E , to be on the safe side, particularly because of the absence of experimental data concerning the mobilization of 'meshing' in the verification of compression struts, the distribution of concentrated forces, etc. A rational means of rating this coefficient is required.*

- Maîtrise des propriétés d'adhérence : la validité des formules décrivant l'adhérence BFUP – aciers actifs ou passifs est à vérifier, notamment parce que la longueur de scellement en cas de précontrainte par pré-tension est probablement très réduite. Les données nécessaires sont limitées [1.14] et les conséquences pour la conception n'ont pas été pleinement explorées.
- Maîtrise des capacités de dissipation d'énergie : l'utilisation des BFUP dans un ouvrage à justifier vis-à-vis du séisme nécessite de quantifier la capacité de déformation d'une section fonctionnant comme une rotule, ainsi que l'amortissement apporté par le matériau dans le cadre d'un calcul dynamique. Actuellement on ne dispose pas d'expérimentations permettant d'aborder ces questions, et de qualifier les BFUP en termes de ductilité.
- Maîtrise de la résistance au feu : si l'utilisation de fibres synthétiques peut constituer une parade vis-à-vis du risque d'éclatement en cas d'incendie, il n'en reste pas moins indispensable vis-à-vis d'un nombre important d'applications d'améliorer –comme d'ailleurs pour toute la gamme des bétons à très hautes performances – la compréhension du comportement des BFUP à haute température, et sous l'effet d'un chargement thermique transitoire plus ou moins violent suivant l'incendie considéré.
- Des questions spécifiques de durabilité requièrent des études complémentaires : stabilité des hydrates et risque éventuel de réaction chimique interne, notamment en cas de traitement thermique, stabilité et vieillissement des adjuvants et effet éventuel sur les parements, etc.
- *Bonding: the validity of the formulae describing the bonding of UHPFRC to active and/or passive reinforcement needs to be verified, especially because the anchorage length in the case of pre-tensioned prestress is probably very short. There is currently limited data [1.14] on this aspect and the consequences on design have not been fully investigated.*
- *Energy dissipation: the use of UHPFRC in a structure requiring seismic resistance calls for quantification of the capacity for deformation of a section acting as a hinge and of the damping provided by the concrete, as part of dynamic design calculations. To date none of the experiments carried out enable these questions to be addressed or to qualify UHPFRC in terms of ductility.*
- *Fire resistance: although using synthetic fibres can be a means of combating the risk of spalling as a result of fire, it is nevertheless vital, for a large number of applications—as is the case for all high-performance concretes, in fact—to improve understanding of the behaviour of UHPFRC under high temperatures and under more or less violent transient thermal loading, depending on the fire considered.*
- *Particular questions relating to durability call for additional studies: stability of hydrates and possible risk of internal chemical reaction, particularly in the case of heat treatment; stability and ageing of admixtures, and possible effect on facing, etc.*

- Enfin, si les BFUP ont démontré leur capacité à permettre la réalisation de pièces particulièrement durables et performantes mécaniquement, un important champ de réflexions reste ouvert sur la conception des assemblages et des clavages entre éléments, afin de garantir des performances cohérentes avec celles des composants.
- *Finally, although UHPFRC has demonstrated that it can be used to make particularly durable parts with outstanding mechanical performance, a lot of thought still has to be devoted to the design of the connection and stitching of elements in order to ensure performance consistent with that of the concrete components.*

BIBLIOGRAPHIE - BIBLIOGRAPHY

Partie 1 - Comportement et caractéristiques mécaniques des BFUP

Part 1 – Behaviour and mechanical characteristics of UHPFRC

- [1.1] AFREM – BFM, Recommandations sur les méthodes de dimensionnement, les essais de caractérisation, de convenance et de contrôle. Eléments de structures fonctionnant comme des poutres, décembre 1995
- [1.2] ADELIN R., CHEYREZY M., La passerelle de Sherbrooke : premier ouvrage d'art en BPR / The Sherbrooke footbridge : the first RPC structure, in La technique française du Béton, AFPC-AFREM, XIII^e congrès de la FIP, Amsterdam 1998, pp. 343-348.
- [1.3] BEHLOUL M., Analyse et Modélisation du comportement d'un matériau à matrice cimentaire fibrée à ultra-hautes performances (B.P.R.). Du matériau à la structure, Thèse de l'ENS Cachan, 13 décembre 1996.
- [1.4] BEHLOUL M., BERNIER G., CHEYREZY M., Tensile Behavior of Reactive Powder Concrete (RPC), Proc. of the 4th Int. Symp. on utilization of HSC/HPC, BHP'96, Paris, Presses de l'ENPC, vol. 3, pp. 1375-1381.
- [1.5] BIRELLI G., CHAUVEL D., DUGAT J., ADELIN R., BEKAERT A., Industrialisation du BPR. Utilisation dans les réfrigérants à courants croisés et premières règles de calcul / RPC Industrialization. Using in cross flow air cooling towers and first design rules, in La technique française du Béton, AFPC-AFREM, XIII^e congrès de la FIP, Amsterdam 1998, pp. 203-213.
- [1.6] BONNEAU O., LACHEMI M. et al., Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes, ACI Materials Journal, vol. 94 n° 4, Jul.-Aug., pp. 286-290.
- [1.7] BOUASIA Y., FOURE B., CACHI M.S., relation effort-ouverture de fissure dans le cas du béton armé de fibres d'acier, Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, Avril 98, pp. 5-14
- [1.8] BOULAY C., CLEMENT J.-L., TOUTLEMONDE F., FAKHRI P., VEROK K., Etude du dimensionnement des éléments de structure en BTHP soumis à des forces de compression localisées, Rapport pour le Projet National BHP 2000, Thème BTHP, 87 pages, février 2001.
- [1.9] BOULAY C., LE MAOU F., RENWEZ S., SERCOMBE J., TOUTLEMONDE F., Caractérisation du comportement au choc d'un béton de poudres réactives grâce à des essais de traction directe, Rapport d'étude n° 325218 en partenariat CEA - Bouygues Direction Scientifique - LCPC, juin 1997.
- [1.10] BOULAY C., LE MAOU F., RENWEZ S., SERCOMBE J., TOUTLEMONDE F., Caractérisation du comportement au choc d'un mortier à ultra-hautes performances grâce à des essais de traction directe, Rapport d'étude interne LCPC, juillet 1997.
- [1.11] CHANVILLARD G., Caractérisation des performances d'un béton renforcé de fibres à partir d'un essai de flexion – partie 1 : De la subjectivité des indices de ténacité, Journal de la RILEM, Matériaux et Constructions, 32, pp. 418-426

- [1.12] CHANVILLARD G., Caractérisation des performances d'un béton renforcé de fibres à partir d'un essai de flexion – partie 2 : Identification d'une loi de comportement intrinsèque en traction, Journal de la RILEM, Matériaux et Constructions, 32, pp. 601-605
- [1.13] CHANVILLARD G., Characterisation of fibre reinforced concrete mechanical properties : a review, conférence plénière, Fifth International Rilem Symposium on Fibre Reinforced Concretes, BEFIB'2000, Ed. P. Rossi and G. Chanvillard, Lyon, pp. 29-50
- [1.14] CHEYREZY M., ROUX N., BEHLOUL M., RESSICAUD A., DEMONTE A., Bond strength of Reactive Powder Concrete, FIP98, Amsterdam, 23-29 Mai 1998 proceedings vol. 1, pp. 65-68.
- [1.15] CHEYREZY M., MARET V., FROUIN L., Microstructural Analysis of Reactive Powder Concrete, Cement and Concrete Research, vol. 25 n°7, pp. 1491-1500.
- [1.16] CLEMENT J.L., TOUTLEMONDE F., Programme de qualification de la couverture BPR de la zone poudre ATPU - Bâtiment 258 - CADARACHE, Rapports d'expertise et rapport de validation (confidentiels), Contrat LCPC-SGN/COGEMA n°34207199, réalisé par les divisions BCC et FDOA du LCPC, mai-novembre.
- [1.17] DESTREE X., Planchers structurels en béton de fibres : justification du modèle de calcul, 3ème Colloque Francophone Les bétons renforcés de fibres métalliques, Québec, Canada, pp. 19-30
- [1.18] DUGAT J., ROUX N., BERNIER G., Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete, Materials and Structures, vol. 29 n° 188, pp. 233-240.
- [1.19] DUTALLOIR F., THIBAUT T., CADORET G., BIRELLI G. , Un nouveau béton très hautes performances : le BSI – Première application industrielle / B.S.I. : A new, very high performance concrete. Initial industrial application, in La technique française du Béton, AFPC-AFREM, XIII^e congrès de la FIP, Amsterdam 1998, pp. 25-32.
- [1.20] LE ROY R., Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances – Etude paramétrique en fonction de la formulation – Proposition de modèles simplifiés, thèse de doctorat de l'ENPC, 19 sep. 1995, Paris, 377p.
- [1.21] LE ROY R., SERRANO J.J., Centrale nucléaire de Cattenom. Poutres en béton à ultra-hautes performances précontraintes. Mise au point rhéologique du béton B.S.I., rapport d'étude confidentiel, contrat d'étude LCPC n° 327209, donneur d'ordres EGI.
- [1.22] LE ROY R., LE MAOU F., BOULAY C., Béton B.S.I. Etude du comportement différé, rapport d'étude confidentiel, contrat d'étude LCPC n° 34240498, donneur d'ordres EGI, rapport final mars 1999.
- [1.23] LOUKILI A., Etude du retrait et du fluage de bétons à ultra-hautes performances, Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes, 15 novembre 1996.
- [1.24] LOUKILI A., RICHARD P., Creep and Shrinkage of Ultra High-Performance Steel Fibre Reinforced Concrete, Concrete under Severe Conditions : Environment and Loading, Proc. of the Int. Conf. CONSEC'95, Sapporo , Japan, E&FN SPON, vol. 2, pp. 1553-1559.

- [1.25] LOUKILI A., ROUX N., ARLOT D., FEYLESSOUFI A., Effects of a High Reduction in the Initial Water Content in Cement Based Matrices, Proc. of the 4th Int. Symp. on utilization of HSC/HPC, BHP'96, Paris, Presses de l'ENPC, vol. 3, pp. 1367-1373.
- [1.26] MESUREUR B., BERNARDI S., RIVILLON P., Comportement des surfaces de reprise de bétonnage vis-à-vis du cisaillement pour les bétons de très hautes performances, Projet National BHP 2000, thème BTHP, novembre 1998.
- [1.27] NAUDIN N., TOUTLEMONDE F., Essai sur poutrelle BSI, Rapport d'étude confidentiel, propriété de la société EGI, contrat 34209998, LCPC, janvier 1999.
- [1.28] RICHARD P., CHEYREZY M., Les Bétons de Poudres Réactives , Annales de l'ITBTP, n°532, Mars-Avril 1995, série Béton 320 pp. 85-102
- [1.29] ROSSI P., High Performance Multimodal Fiber Reinforced Cement Composites (HPMFRCC): the LCPC experience, ACI Materials Journal, vol. 94 n° 6, Nov.-Dec., pp. 478-483.
- [1.30] SCHALLER I., Résistance à l'effort tranchant de poutrelles en M50C, M100C et BPR. Etude expérimentale, Projet National BHP 2000, thème BTHP, août 1999.
- [1.31] SERCOMBE J., Modélisation du comportement du béton en dynamique rapide. Application au calcul des conteneurs à haute intégrité, Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 18 décembre 1997. Publiée dans la collection études et recherches des LPC, série Ouvrages d'Art, OA 30, décembre 1998. 284 pages, 200 réf., résumé anglais.
- [1.32] SERCOMBE J., TOUTLEMONDE F., TORRENTI J.-M., Modelling of the Impact Performance of Concrete Containers for Carrying Radioactive Materials, 2nd International Conference on Concrete under Severe Conditions : Environment and Loading, CONSEC'98, Tromsø, Norvège, 21-24 June 1998, Proceedings edited by Gjorv, Sakai & Banthia, E&FN SPON, vol. III, pp.1665-1674.
- [1.33] TORRENTI J.-M., MATTE V., MARET V., RICHET C., High Integrity Containers for Interim Storage of Nuclear Wastes using Reactive Powder Concrete, Proc. of the 4th Int. Symp. on utilization of HSC/HPC, BHP'96, Paris, Presses de l'ENPC, vol. 3, pp. 1407-1413.
- [1.34] TOUTLEMONDE F., Résistance au choc des structures en béton. Du comportement du matériau au calcul des ouvrages, thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 16 décembre 1994. Publiée en rapport de recherche du LCPC, hors collection, juillet 1995. 348 pages, 197 réf., résumé anglais.
- [1.35] TOUTLEMONDE F., BOULAY C., SERCOMBE J., LE MAOU F., RENWEZ S., ADELIN R., Characterization of Reactive Powder Concrete (RPC) in Direct Tension at Medium to High Loading Rates, 2nd International Conference on Concrete under Severe Conditions : Environment and Loading, CONSEC'98, Tromsø, Norvège, 21-24 June 1998, Proceedings edited by Gjorv, Sakai & Banthia, E&FN SPON, vol. II, pp. 887-896.
- [1.36] TOUTLEMONDE F., SERCOMBE J., Dimensionnement de conteneurs en béton de fibres vis-à-vis des chocs / Design of fibre reinforced concrete containers to ensure impact performance, in La technique française du Béton, AFPC-AFREM, XIII^e congrès de la FIP, Amsterdam 1998, pp. 33-38.

[1.37] TOUTLEMONDE F., SERCOMBE J., TORRENTI J.-M., ADELIN R., Développement d'un conteneur pour l'entreposage de déchets nucléaires : résistance au choc, *Revue Française de Génie Civil*, vol. 3, n° 7-8, décembre 1999, pp. 729-756.

[1.38] ZANNI H., CHEYREZY M. et al., Investigation of Hydration and Pozzolanic Reaction in Reactive Powder Concrete (RPC) using ^{29}Si NMR, *Cement and Concrete Research*, vol. 26 n° 1, pp. 93-100.

Bibliographie sur les bétons de fibres, BHP et BTHP susceptible de s'appliquer aux BFUP :

Bibliography on fibre-reinforced concretes, HPC, and VHPC which might be applicable to UHPFRC :

[1.39] GRANJU J.-L. et coll., Delayed behaviour of cracked SFRC beams, *Fibre-Reinforced Concretes BEFIB'2000*, Proc. of the 5th Int. RILEM Symp., Lyon (France), PRO 15, Rossi & Chanvillard eds, RILEM publications, pp. 511-520.

[1.40] HOTA S., NAAMAN A. E., Bond stress-slip response of reinforcing bars embedded in FRC matrices under monotonic and cyclic loading, *ACI Structural Journal*, vol. 94 n° 5, sept.-oct., pp. 525-537

[1.41] TOUTLEMONDE F. et coll., Maintien dans le temps de la résistance en traction des bétons à hautes et très hautes performances, Rapport pour le Projet National BHP 2000, Thème BTHP, 101 pages, novembre 2000.

[1.42] TOUTLEMONDE F., Caractérisation mécanique de bétons à hautes performances. Bétons d'étude du projet national BHP 2000, groupe BTHP : synthèse, Rapport pour le Projet National BHP 2000, Thème BTHP, janvier 2001.

Partie 2 - Méthodes de dimensionnement des structures

Part 2 – Structural design methods

[2.1] AFREM – BFM, Recommandations sur les méthodes de dimensionnement, les essais de caractérisation, de convenance et de contrôle. Eléments de structures fonctionnant comme des poutres, décembre 1995.

[2.2] BAEL 91 révisé 99, Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites, Fasc. 62 (Titre premier, section 1 du CCTG), avril 1999.

[2.3] BPEL 91 révisé 99, Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états limites, Fasc. 62 (Titre premier, section 2 du CCTG), avril 1999.

[2.4] RILEM, TC 162-TDF : Test and design methods for steel reinforced concrete - Recommendations : σ - ε Design method, *Materials and Structures*, vol. 33, mars 2000, pp. 75-81

[2.5] BOLUSSET D., Essais de deux poutrelles précontraintes en BPR, Rapport d'étude, Contrat n° 327102, donneur d'ordres Bouygues TP, juillet.

[2.6] CASANOVA P., Bétons renforcés de fibres métalliques : du matériau à la structure, Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1995.

[2.7] DUBROCA S., NAUDIN N., TOUTLEMONDE F., Essai sur poutrelle BSI, Rapport d'étude, n° 34240598, donneur d'ordre R. Gilliers, E.G.I., février 1998.

[2.8] GANZ H. R., ADELIN R., Mini-Anchors for Reactive Powder Concrete, f.i.p. Int. Conf. on New Technologies in Structural Engineering, Lisbon, July.

[2.9] ROSSI P., Les bétons de fibres métalliques, Presses de l'ENPC, 1998.

[2.10] RESPLENDINO J., Utilisation de béton fibre ultra-performant pour la réalisation de deux ouvrages routiers, Séminaire RILEM, Paris, 14 septembre 2000.

Partie 3 - Caractéristiques relatives à la durabilité

Part 3 – Durability-related characteristics

[3.1] VERNET C., LUKASIK J., PRAT E., Nanostructure, porosity, permeability and diffusivity of UHPC, International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes, Sherbrooke (Canada), August 2000.

[3.2] MATTE V., MORANVILLE M., Durability of Reactive Powder Composites : Influence of Silica Fume on the Leaching Properties of Very Low Water/Binder Pastes, Cement and Concrete Composites 21, 1999, 1-9.

[3.3] BIRELLI G., CHAUVEL D., DUGAT J., ADELIN R., BEKAERT A., Industrialisation du BPR. Utilisation dans les réfrigérants à courants croisés et premières règles de calcul / RPC Industrialization. Using in cross flow air cooling towers and first design rules, in La technique française du Béton, AFPC-AFREM, XIII^e congrès de la FIP, Amsterdam 1998, pp. 203-213.

[3.4] BIRELLI G., CADORET G., DUTALLOIR F., THIBAUT T., A New, Very High Performance Concrete, International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes, Sherbrooke (Canada), August 2000.

[3.5] Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction – Etat de l'art et guide pour l'élaboration d'une démarche performante sur la base d'indicateurs de durabilité, en cours de préparation par le groupe AFGC "indicateurs de durabilité" animé par V. BAROGHEL-BOUNY, LCPC Paris, à paraître.

[3.6] Recommandation AFGC décembre 1997 Durabilité des bétons : Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité (L.M.D.C. INSA-UPS, Toulouse).

[3.7] FERNON V. et coll., Interaction Between Portland Cement Hydrates and Polynaphthalenesulfonates. SP 173-12 pp. 225-248.

[3.8] SPANKA G., THIELEN G., Untersuchungen zum Nachweis von verflüssigenden Betonzusatzmitteln und zu deren Sorptions- und Elutionsverhalten, Beton 5/95, pp. 320-327.

- [3.9] FARMER R., Leaching of Admixtures from Concrete using Data from British Standard 6920, European Ready Mixed Concrete Congress, Istanbul, June 95, pp. 544-546.
- [3.10] MADER U., Leaching of Admixtures from Concrete Demolition Material, European Ready Mixed Concrete Congress, Istanbul, June 95, pp. 164-175.
- [3.11] ZHANG M. et al., Dégradation et migration d'adjuvants des matériaux à base de ciment, Journal Français d'Hydrologie, 24 (2) 1993, pp. 155-171.
- [3.12] ZHANG M., Influence de la présence d'adjuvants dans les matériaux à base de ciment en contact avec l'eau sur la qualité de celle-ci, Thèse de doctorat, Paris, 1994.
- [3.13] POLLET B., GERMANEAU B., DEFOSSE C., Fixation des adjuvants de type polynaphtalène ou polyméamine sulfonate dans les mortiers et bétons, Materials and Structures, Vol 30, 1997, pp. 627-630.
- [3.14] MATTE V., Durabilité des bétons à ultra hautes performances : rôle de la matrice cimentaire, Thèse de doctorat en Génie Civil, ENS Cachan, Université de Sherbrooke, 20 Sept. 99.
- [3.15] VERNET C., Projet REACTIF bétons ductiles 97 T 0087. Durabilité des bétons du type Ductal®. Synthèse globale. Rapport interne du 06/12/99.
- [3.16] VERNET C., Micheline MORANVILLE, Marcel CHEYREZY, Ultra-high Durability Concretes. Chemistry and Microstructure, International Symposium on High Performance Concrete, Hong Kong, Dec. 10-151, 2000.
- [3.17] Rapport CSIC 16.923-A Contr. AB46-95, Tests on Chemical Attack of BPR.
- [3.18] ROUX N., ANDRADE C., SANJUAN M.A., Caractérisation de la durabilité des BPR fibrés et non fibrés, 2ème Colloque International Francophone sur les bétons Renforcés de Fibres Métalliques, Toulouse, 1996, pp. 241-252.
- [3.19] ROUX N., ANDRADE C., SANJUAN M.A., Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concretes, Journal of Materials in Civil Engineering, Feb 1996 / 1 .
- [3.20] HANNANT D.J., Durability of Polypropylene Fibers in Portland Cement-Based Composites : Eighteen Years of Data, Cement and Concrete Research, vol. 28, n° 12, pp. 1809-1817, 1998.
- [3.21] Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton, DTU P 92-701, AFNOR.