

## 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 BAROGHIEL-BOUNY  
Mouloud BEILOUL  
Gérard BIRELLI

Hervé BLIECK  
Yves BRUGEAUD  
Myriam CARCASSES

Pascal CASANOVA  
Gilles CAUSSE

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

Jacques RESPLENDINO

Pierre ROSSI  
Jean-Yves SABLON

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

## 6 - Recommandations provisoires

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

*UHPRC 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 UHPRC 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 UHPRC beams to span long distances since the fibres help take secondary tensile forces, making it possible to dispense with secondary passive reinforcement.*

## 8 - Recommandations provisoires

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.*

**Page laissée blanche intentionnellement**

**PARTIE 1**

**COMPORTEMENT ET  
CARACTERISTIQUES MECANIQUES  
DES BFUP**

**PART 1**

**BEHAVIOUR AND  
MECHANICAL CHARACTERISTICS  
OF UHPFRC**

**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 :

**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:*



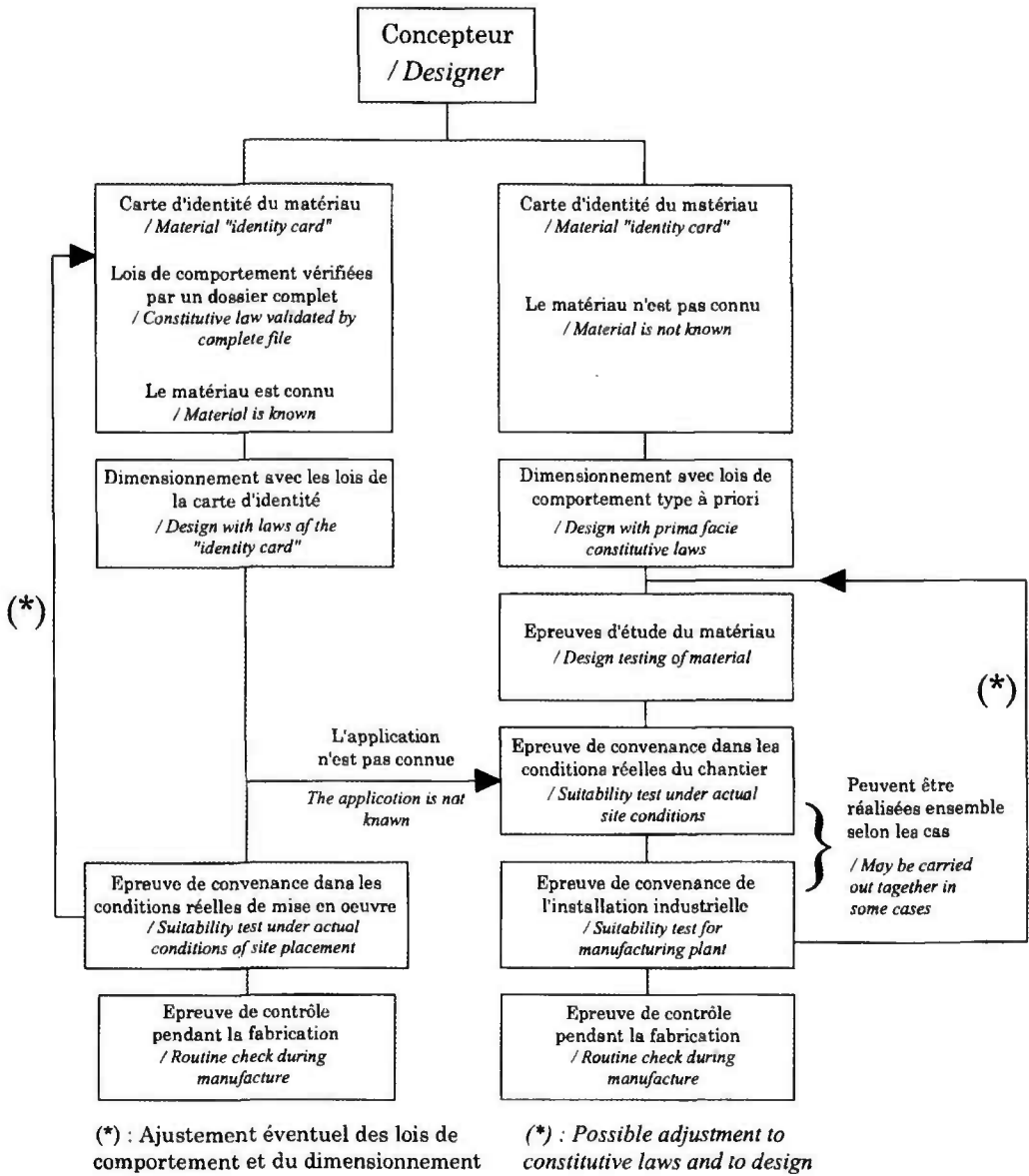


Figure 1.1 : Démarche globale de conception

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 maturométrie. 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  $0.1^{\circ}\text{C}$ .*

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  $0,85 f_{ck} / \theta \gamma_b$ .*

*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

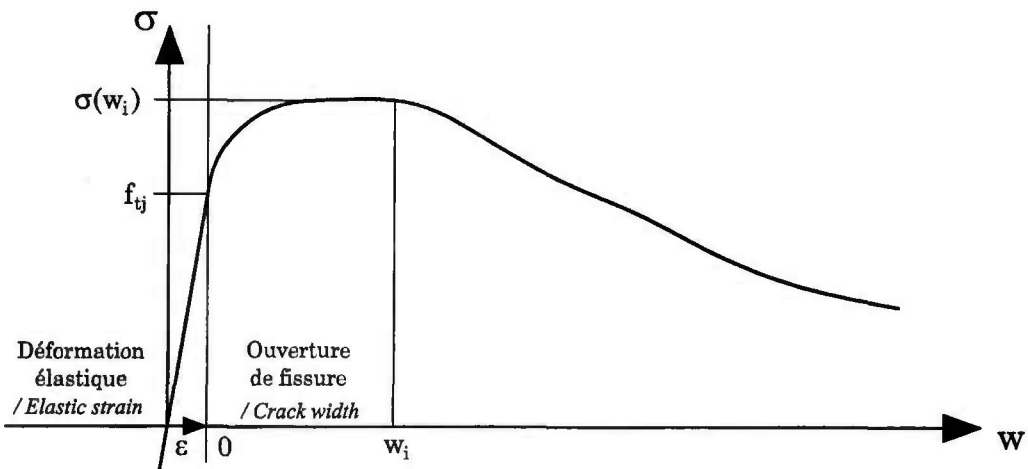


Figure 1.2 : Exemple de loi de comportement en traction d'un BFUP (cas d'un matériau écrouissant)

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 :

*The tensile behaviour of UHPFRC is characterized by:*

- 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.

- *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.*

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 :

*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 projecteur 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 projecteur 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 :

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

et

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

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**  $L_f$ .

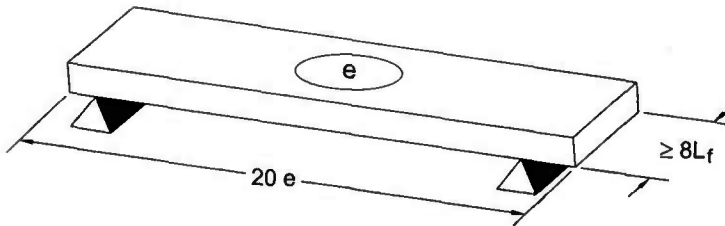


Figure 1.3 : Plaques minces : définition du prisme d'essai  
*Figure 1.3 : Thin slabs : definition of the test prism*

#### 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 :

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

and

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

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 AFTESS (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 (AFTESS) 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 :

- $L_f \leq 15 \text{ mm}$  :  $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}$ ,
- $15 < L_f \leq 20 \text{ mm}$  :  $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ ,
- $20 < L_f \leq 25 \text{ mm}$  :  $14 \times 14 \times 56 \text{ cm}$ ,
- $25 < L_f$  : 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:*

- *$L_f \leq 15 \text{ mm}$  :  $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}$ ,*
- *$15 < L_f \leq 20 \text{ mm}$  :  $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ ,*
- *$20 < L_f \leq 25 \text{ mm}$  :  $14 \times 14 \times 56 \text{ cm}$ ,*
- *$25 < L_f$  : 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  $90^\circ$  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

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.

### Post-cracking constitutive law

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:

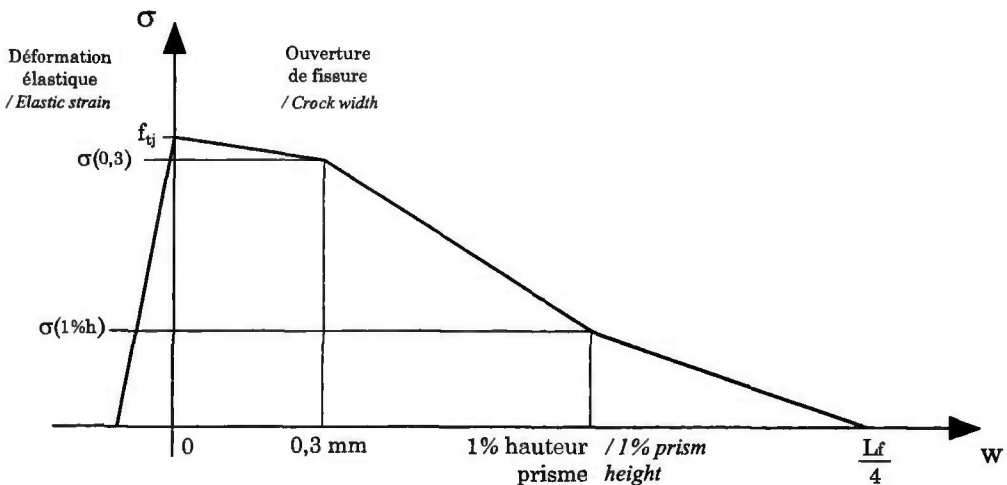


Figure 1.4 : Loi simplifiée en traction

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 :

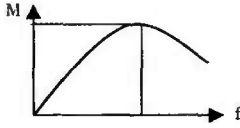
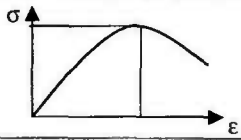
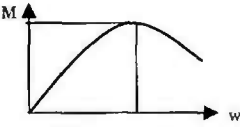
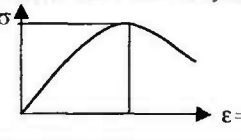
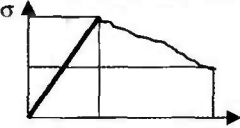
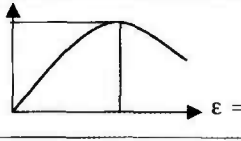
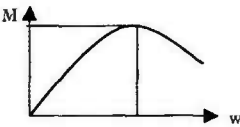
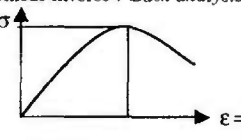
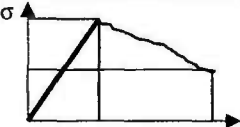
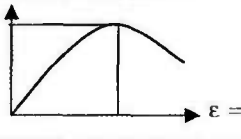
#### 1.4.6 Shells

*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	Essais de flexion 4 points sur éléments représentant l'élément réel.  / Third-point flexural tests on specimens representing actual elements		Méthode inverse / Back analysis : 
	Essai de flexion 3 points sur éprouvette entaillée.  / Centre-point test on notched specimens		Méthode inverse / Back analysis : 
PLAQUES EPAISSES / THICK SLABS	Ou essai de traction directe sur éprouvette entaillée.  / Or direct tensile-strength test on notched specimens		
	Ou essai de traction sur éprouvette non entaillée / Or direct tensile-strength test on un-notched specimens		
POUTRES / BEAMS	Essai de flexion 3 points sur éprouvette entaillée.  / Centre-point test on notched specimens		Méthode inverse / Back analysis : 
	Ou essai de traction directe sur éprouvette entaillée.  / Or direct tensile-strength test on notched specimens		



## 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  $\Phi$  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  $\text{s}^{-1}$ , à comparer aux vitesses de déformation atteintes pour des ouvrages sous sollicitations de trafic, de l'ordre de  $10^{-6}$  à  $10^{-4}$   $\text{s}^{-1}$ ).

## 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,  $\Phi$ , 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  $\text{s}^{-1}$ , compared to the strain rates around  $10^{-6}$  to  $10^{-4}$   $\text{s}^{-1}$  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  $1 \text{ s}^{-1}$ ), 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  $f_t$  de l'ordre de  $0.8 \text{ MPa} / \text{u.log}_{10}$ , la valeur courante pour les bétons classiques étant d'environ  $0.7 \text{ MPa} / \text{u.log}_{10}$ .

*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  $1 \text{ s}^{-1}$ ), 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  $f_t$  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 couturent 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  $\sigma_{bt}$  de l'ordre de 0,5 MPa / u.log<sub>10</sub>.

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  $\sigma_{bt}$  increases by about 0,5 MPa / log<sub>10</sub> 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® range); they confirm the above analysis. They are summed up in Table 1.2 below, and fuller details—particularly with  $\sigma(w)$  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. + 150 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  $f_t$ ", 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  $\sigma_{btu}$ ", 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.

*A first analysis (before cracking) uses a "type  $f_t$ " 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  $\sigma_{btu}$ " 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. Etude, fabrication et mise en œuvre des BFUP

## 1.10. Design, mixing, and placement of UHPFRC

### 1.10.1 Prescriptions générales

### 1.10.1 General requirements

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  $E_{eff} / (C+kA)$ .

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

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).

*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).*

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.

*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.*

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

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

- 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.
- 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.

*It is recommended that samples of each delivery be conserved.*

Tolérances sur les matières premières

*Tolerances for raw materials*

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

*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.*

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.

*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.*

Exigences particulières sur le matériel de fabrication

Special requirements for batching plant

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.

*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.*

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

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

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

*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:*

- 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 bascule) :  $0,6 C$
- 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:

- réchauffage des granulats et/ou de l'eau de gâchage,

#### 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:*

- *heating of aggregate and/or mix water,*

- 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 ressuyage 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.

- *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  $f_t$  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.

### 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 ( $f_t$  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.*

Dans ce cas, il est possible d'effectuer à partir de la formule nominale deux formulations dérivées :

- 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 :

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

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

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,

*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:*

- *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:*

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

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

*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,*

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

- $C_{mean}$  is the mean 28-day compressive strength of the cement observed by the manufacturer over the six months prior to the design test,
- $S$  is the standard deviation of the values used to determine  $C_{mean}$ .

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.

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.

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.

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.

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

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:

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

$$f_{CE} \geq 1.1 f_{c28}$$

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

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

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 :

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

- la méthodologie de mise en œuvre, et les dispersions attendues sur l'orientation des fibres (coefficient  $K$ ),

- placement methodology and the expected disparity of fibre orientation ( $K$  factor),

- les dispositions prévues pour réaliser la cure du béton,
  - les dispositions prévues pour préparer les zones de reprise de bétonnage éventuelles,
  - 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.
- *proposed methods for concrete curing,*
  - *proposed methods for preparing any construction joints,*
  - *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*

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.

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

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.

*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.*

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.

*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.*

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

*An example if 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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 :

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

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,
- $f_{ck}$  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.



#### 44 - Recommandations provisoires

##### 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  $\sigma$ - $\varepsilon$  (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  $\sigma$ - $w$  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  $\sigma$ - $\varepsilon$  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 projecteur 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  $\sigma-\varepsilon$  et la caractérisation du matériau sur un élément représentatif de la structure réelle permet de considérer  $K = 1$ .

Coefficient partiel de sécurité  $\gamma_{bf}$

Un coefficient partiel de sécurité dénommé  $\gamma_{bf}$  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  $\sigma-\varepsilon$  constitutive law is used, and characterization of the concrete with a representative element of the actual structure shows that  $K=1$ .*

*Partial safety factor  $\gamma_{bf}$*

*A partial safety factor,  $\gamma_{bf}$ , 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):*

*$\gamma_{bf} = 1.3$  in the case of fundamental combinations*

*$\gamma_{bf} = 1.05$  in the case of accident combinations.*

## 2.2. Justifications sous sollicitations normales

## 2.2. Normal force verifications

### Article 6.0 - Généralités

### Article 6.0 - General

#### 6.0,0 LONGUEUR CARACTERISTIQUE

#### 6.0,0 CHARACTERISTIC LENGTH

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.

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

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

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

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

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,

où  $h$  est la hauteur de la section.

where  $h$  is the depth of the section.

#### 6.0,1 TAUX MINIMAL DE FIBRES

#### 6.0,1 MINIMUM FIBRE CONTENT

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

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

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

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

avec  $w$  ouverture de fissure exprimée en mètres.

where  $w$  is crack width in metres.

**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.

**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 PRÉCONTRAINTE 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  $n_t = 4$ ,  $n_v = 8$  sans traitement thermique et  $n_t = 5$  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,  $\sigma_{bpd}$  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  $n_t$  and  $n_v$ .

In this case, it is assumed that  $n_t = 4$  and  $n_v = 8$  without heat treatment and  $n_t = 5$  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,  
 $\sigma_{pd} + n_i \sigma_{bpd}$  (with  $n_i = 4$ ) if it is prestressing reinforcement,  $\sigma_{bpd}$  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 :

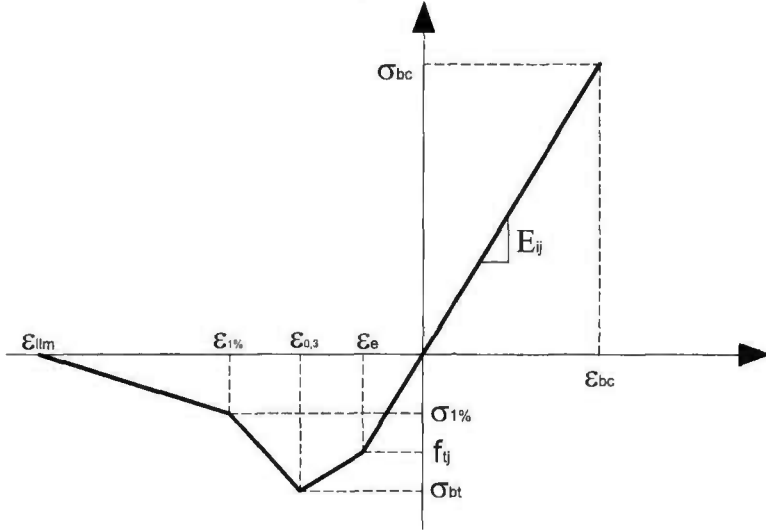
- les points caractéristiques sont déduits des essais décrits en Partie 1,
- la contrainte correspondant à une ouverture de fissure de 0,3 mm,  $\sigma(w_{0,3})$ , sur la loi caractéristique  $\sigma-w$ , est prise comme base de la résistance en traction post-fissuration du matériau fibré,
- la loi considérée 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:*

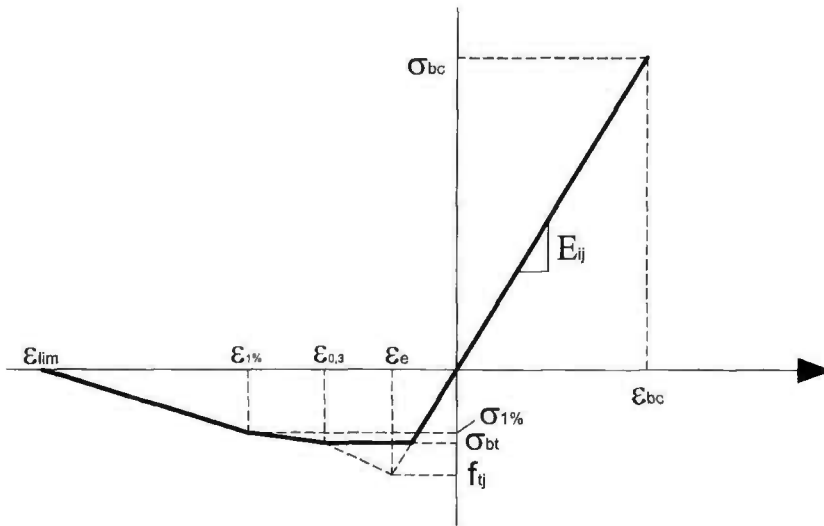
*The concrete law shown below is used:*

- *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  $\sigma-w$  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 écouissante - *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  $w_{0.3} = 0.3 \text{ mm}$

- $\varepsilon_{1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{E_{tj}}$ , 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)

- $\varepsilon_{lim} = \frac{l_f}{4l_c}$ ,  $l_f$  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,

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

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

- $\varepsilon_{lim} = \frac{l_f}{4l_c}$ ,  $l_f$  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 CAS DES ARMATURES DE PRÉCONTRAİNTE NON ADHÉRENTES

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

#### 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 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.

#### 6.1.2 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 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,

#### 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,



## 52 - Recommandations provisoires

- $0,60 f_{cj}$  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,
- $\min(\sigma_{bt} ; f_{tj})$  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,
- $\min(\sigma_{bt} ; f_{tj})$  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  $\varepsilon < 0,003 / l_c$
- 0,2 mm en fissuration préjudiciable, soit  $\varepsilon < 0,002 / l_c$
- 0,1 mm en fissuration très préjudiciable, soit  $\varepsilon < 0,001 / l_c$

### 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  $f_{tj}$  et la compression à  $0,6f_{cj}$ .
- calcul du moment résistant de la section fissurée  $M_{fs}$  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  $\sigma-w$  ainsi obtenue, ou la loi équivalente en  $\sigma-\varepsilon$ .

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

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

### 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  $f_{tj}$  and compression to  $0.6f_{cj}$ .*
- *calculation of the resistance moment of the cracked section  $M_{fs}$ , 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  $\sigma-w$  law thus obtained, or with the equivalent  $\sigma-\varepsilon$  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  $1/\gamma_s$  (resp.  $1/\gamma_p$ ), 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.

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  $1/\gamma_s$  (or  $1/\gamma_p$ ), with  $\gamma_s = \gamma_p = 1.15$ , except for accidental combinations when  $\gamma_s = \gamma_p = 1$ .*

*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.*

Les limites des pivots sont les suivantes :

- 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  $\frac{l_f}{4l_c} + \frac{f_{ij}}{E_{ij}} < 10 \text{ ‰}$ , 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.

The limits of the ultimate strains are as follows:

- 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  $\frac{l_f}{4l_c} + \frac{f_{ij}}{E_{ij}} < 10\text{‰}$ , 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.

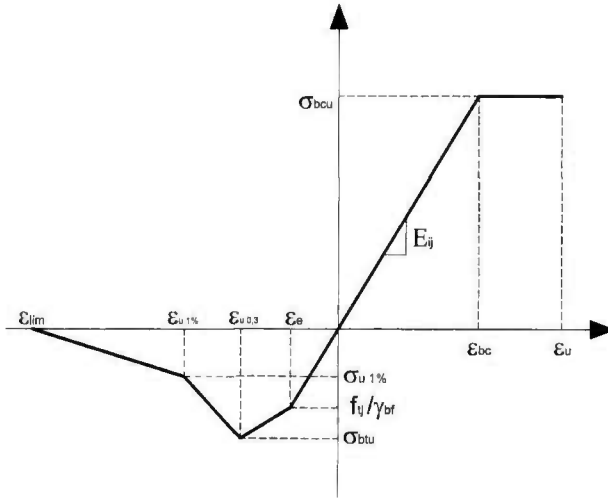
### 6.3,313 DIAGRAMME CONTRAINTES- DEFORMATIONS DU BETON

### 6.3,313 STRESS-STRAIN DIAGRAM FOR THE CONCRETE

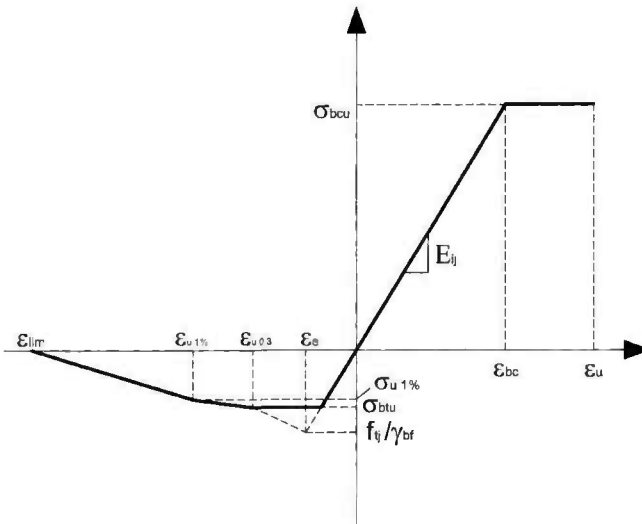
Le diagramme contrainte – ouverture de fissure se déduit du diagramme ELS du 6.1.11,b) par une affinité de rapport  $\gamma_{bf}$  parallèlement à l'axe des contraintes :

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  $\gamma_{bf}$  parallel to the stress axis:

- Loi écouissante - *Strain hardening law*:



- Loi adoucissante - *Strain softening law* :



On prendra les limites suivantes :

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

The following limits will be used:

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

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

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

- $\epsilon_{lim} = \frac{l_f}{4l_c}$ ,  $l_f$  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

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

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

- $\epsilon_{lim} = \frac{l_f}{4l_c}$ ,  $l_f$  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  $\phi$  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  $1+\alpha\phi$ . Values for coefficient  $\phi$  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 tangentés

### 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 tangentés 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.

## 62 - Recommandations provisoires

### 7.2,1 DEFINITION DES CONTRAINTES $\sigma_x$ , $\sigma_t$ , $\tau$

Pas de modification

### 7.2,2 CONDITIONS A SATISFAIRE

Les contraintes  $\sigma_x$ ,  $\sigma_t$  et  $\tau$  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 $\sigma_x$ , $\sigma_t$ , $\tau$

No change

### 7.2,2 CONDITIONS TO BE MET

Stresses  $\sigma_x$ ,  $\sigma_t$ , and  $\tau$  calculated under the effects of service loads must meet the following conditions:

When a check is necessary at a point where  $\sigma_x < 0$ , 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  $k = 1 - \frac{0,7 \cdot \sigma_{tm}}{f_{tj}}$ ,

$\sigma_m$  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  $k = 1 - \frac{0,7 \cdot \sigma_{tm}}{f_{tj}}$

$\sigma_m$  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  $\gamma_E$  est un coefficient de sécurité pris tel que :  $\gamma_E \gamma_b = 1,5$

**Commentaire:** le coefficient  $\gamma_E$  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 :

- $\sigma_p$  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  $w_u = l_c \epsilon_u$

- $\sigma(w)$  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  $S=0,8.(0,9.d)^2$  ou  $0,8z^2$ , 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  $\gamma_E$  is a safety coefficient such that:  $\gamma_E \gamma_b = 1,5$*

**Comment:** *Coefficient  $\gamma_E$  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:*

- *$\sigma_p$  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  $w_u = l_c \epsilon_u$*

- *$\sigma(w)$  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 T sections, and  $S=0,8.(0,9.d)^2$  or  $0,8z^2$  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.

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

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 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.

7.3.24 *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 JUSTIFICATION DU BETON

### 7.3.3 VERIFICATION OF CONCRETE

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

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

$$\tau_{red,u} \leq 1.14 \frac{0,85}{\gamma_E \gamma_b} f_{cj}^{2/3} \sin(2\beta_u).$$

$$\tau_{red,u} \leq 1.14 \frac{0,85}{\gamma_E \gamma_b} f_{cj}^{2/3} \sin(2\beta_u).$$

$\beta_u$  étant borné inférieurement à 30°.

*$\beta_u$  being lower-bounded to 30°.*

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

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

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

$$\tau_{red,u} \leq 0,56 f_{cj}^{2/3}$$

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

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

Pas de modification

*No change*

**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.

**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.*

A l'ELU, on peut négliger l'effort de précontrainte  $F_a$  dans la mesure où on vérifie  $\tau_u$

*At the ULS, the prestress force  $F_a$  can be overlooked if  $\tau_u$  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  $z_r \cot \beta_u$ .

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

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  $z_r \cot \beta_u$  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  $z_r \cot \beta_u$*

*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  $\sigma_p$ .

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

**7.5,2 JUSTIFICATION DE L'EQUILIBRE DU COIN INFERIEUR**

**7.5,2 VERIFICATION OF EQUILIBRIUM OF BOTTOM WEDGE**

Si on note  $S_{\text{coin}}$  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  $S_{\text{coin}}$ , 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  $\sigma_p$ .

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

L'article 3.2 de l'annexe 4, 2<sup>ème</sup> 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

7.6,5 VERIFICATION OF BEAMS  
RELATIVE TO ULTIMATE LIMIT  
STATE

7.6.51 Pas de modification

7.6,51 No change

7.6.52 INCLINAISON DES BIELLES DE COMPRESSION

7.6,52 ANGLE OF COMPRESSION STRUTS

Pas de modification

No change

7.6,53 JUSTIFICATION DU BÉTON DES BIELLES  
DE COMPRESSION

7.6,53 VERIFICATION OF COMPRESSION  
STRUTS CONCRETE

La condition à respecter est la suivante:

The condition to be met is as follows:

$$\tau_{Vu}^2 + \tau_{Tu}^2 \leq \left( 0.86 \frac{f_{cj}^{2/3}}{\gamma_E \gamma_b} \right)^2$$

$$\tau_{Vu}^2 + \tau_{Tu}^2 \leq \left( 0.86 \frac{f_{cj}^{2/3}}{\gamma_E \gamma_b} \right)^2$$

en prenant  $\gamma_E \gamma_b = 1.5$  en cohérence avec  
7.3.21.

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

7.6,54 JUSTIFICATION DES ARMATURES  
TRANSVERSALES

7.6,54 VERIFICATION OF TRANSVERSE  
REINFORCEMENT

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

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

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

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  $\sigma_p$

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,  $\sigma_p$ .

7.6,55 JUSTIFICATION DES ARMATURES  
LONGITUDINALES

7.6,55 VERIFICATION OF LONGITUDINAL  
REINFORCEMENT

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

The torsional effects in a beam produce  
longitudinal tensile forces.

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 :

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:



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

$T$  représentant le couple de torsion et  $\beta_u$  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.

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.

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

where  $T$  is the torsional torque and  $\beta_u$  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.

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 BAEI 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 :

$$\frac{S_{fs} \sigma_p}{1.3 \gamma_{bf}} + A_s \sigma_s \quad lim = 0.04 \max(F_{j0})$$

$F_{j0}$  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 BAEI 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:*

$$\frac{S_{fs} \sigma_p}{1.3 \gamma_{bf}} + A_s \sigma_s \quad lim = 0.04 \max(F_{j0})$$

*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  $t$ ,  $\tau_d$  est cumulée algébriquement avec la contrainte  $\tau$  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  $t$ ,  $\tau_d$  is totalled algebraically with the most critical stress  $\tau$  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  $\sigma_p$  :

$$\sigma_p \geq \frac{1.3 \gamma_{bf}}{2} \tau_d \left( 1 + \frac{0.24 \sqrt{f_{cj}}}{\gamma_E \gamma_b \tau_d} \right)$$

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  $\sigma_p$ :

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**

**PART 3**

**DURABILITY OF UHPFRC**

**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.

**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

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

*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:*

### 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  $10^{-15} \text{ m}^2$  à  $10^{-19} \text{ m}^2$  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.

	BO OC	BHP HPC	BTHP VHPC	BFUP UHPFRC
Perméabilité à l'oxygène ( $\text{m}^2$ ) <i>Oxygen permeability (<math>\text{m}^2</math>)</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.

### 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.

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.

### 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  $10^{-15} \text{ m}^2$  to about  $10^{-19} \text{ m}^2$ . 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.*

*The permeability of UHPFRC is below the detection threshold of the AFREM method.*

### 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.*

*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	BHPC HPC	BTHPC VHPC	BFUP UHPFRC
Coefficient de diffusion du tritium ( $m^2/s$ ) <i>Tritium-ion diffusion factor (<math>m^2/s</math>)</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	BHPC HPC	BTHPC VHPC	BFUP UHPFRC
Teneur en portlandite ( $kg/m^3$ ) <i>Portlandite content (<math>kg/m^3</math>)</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*

### 3.3.6 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.

### 3.3.5 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

*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

### 3.4.1 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. Indicators associated with specific features of UHPFRC

### 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-mélatamine-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).

- *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:*

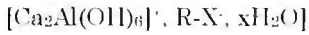
- *polycarboxylates (PC), and hybrids with sulphonate chains*

*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).*

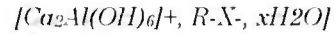
Ces molécules se fixent sur les surfaces minérales lors du gâchage, et améliorent la fluidité des bétons en réduisant les interactions entre particules (effet de charge de surface et effet stérique). Au cours de la prise, elles se trouvent majoritairement emprisonnées dans la structure interfeuillet 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 adjuvés 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 cm<sup>3</sup> de clinker produit environ 2.18 cm<sup>3</sup> 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 20ème 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 cm<sup>3</sup> de clinker, un égal volume d'hydrates précipite à l'emplacement des grains initiaux, et 1.18 cm<sup>3</sup> 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 pozzolanique).

*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 cm<sup>3</sup> of clinker produces about 2.18 cm<sup>3</sup> 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 cm<sup>3</sup> of clinker hydrates, the same volume of hydrates is precipitated at the location of the initial grains, and 1.18 cm<sup>3</sup> 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 cicatriser 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].

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)

*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].*

*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 ( $\mu\text{m}/\text{an}$ ) <i>Rate of reinforcement corrosion (<math>\mu\text{m}/\text{year}</math>)</i>	1,2	0,25	< 0,01
Résistivité - Resistivity (k $\Omega\cdot\text{cm}$ )	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].

L'interprétation du diagramme de Nyquist conduit à des vitesses de corrosion non mesurables pour ces BFUP (Cf. tableau 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.

Les BFUP résistent à des conditions chimiques dans lesquelles les bétons armés ordinaires sont rapidement détruits (tableau 3.6).

*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].*

*Interpretation of the Nyquist diagram shows unmeasurable corrosion rates for these UHPFRCs (cf. Table 3.6).*

*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.*

*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 <sup>(1)</sup> <i>Corrosion of fibres <sup>(1)</sup></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 <sub>4</sub>	+ 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</i> <i>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</i> <i>and nitrate</i> 2.9 g/l Na <sub>2</sub> S.9H <sub>2</sub> O + 29 g/l NH <sub>4</sub> Cl	-0.9 %	Diminution (dans la bande d'incertitude) <i>Reduction</i> <i>(in the zone of</i> <i>uncertainty)</i>	Forte perte <i>Large loss</i>	Non - No

<sup>(1)</sup> - 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  $\gamma_E$ , 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  $\gamma_E$ , 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 dérivant 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 convenue 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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, FIP'98, 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., THIBAUX 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<sup>e</sup> 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'École 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 (HIPMFRCC): 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 BTIP, 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 Gjørsv, Sakai & Banthia, E&FN SPON, vol. III, pp.1665-1674.

[1.33] TORRENTI J.-M., MATTE V., MARET V., RICHEL 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 Gjørsv, 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<sup>e</sup> 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  $^{29}\text{Si}$  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 BIIP 2000, Thème BTHP, 101 pages, novembre 2000.

[1.42] TOUTLEMONDE F., Caractérisation mécanique de bétons à hautes performances. Bétons d'étude du projet national BIIP 2000, groupe BTIIP : synthèse, Rapport pour le Projet National BHP 2000, Thème BTIIP, 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 :  $\sigma$ - $\epsilon$  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-Anchorage 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<sup>e</sup> 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 performantielle 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 polyméla mine 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. 10-15, 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.

**ANNEXE 1**

**ANNEX 1**

**Comportement en compression  
Module d'élasticité**

**Compressive behaviour  
Modulus of elasticity**

**1. Comportement en compression**

La figure 1 présente, à titre d'exemple, le comportement en compression du Ductal®. Il s'agit d'essais de compression sur éprouvettes de 7 cm de diamètre et 14 cm de hauteur [1.3].

Lors de ces 2 essais le module d'Young obtenu était respectivement égal à 61.4 GPa et 57 GPa.

La déformation maximale prise pour le palier plastique de 0,235% est inférieure à la déformation mesurée au pic de compression qui vaut ici respectivement 0,357 et 0,375 %.

**1. Compressive behaviour**

The following figure shows the compressive behaviour of Ductal®. It presents results of compressive-strength tests on 7 cm diameter, 14 cm long test specimens [1.3].

In these two tests the moduli of elasticity obtained were 61.4 GPa and 57 GPa.

The 0.235% maximum strain adopted for the yield plateau is less than the strain measured under peak compression equal to 0.357% and 0.375% respectively.

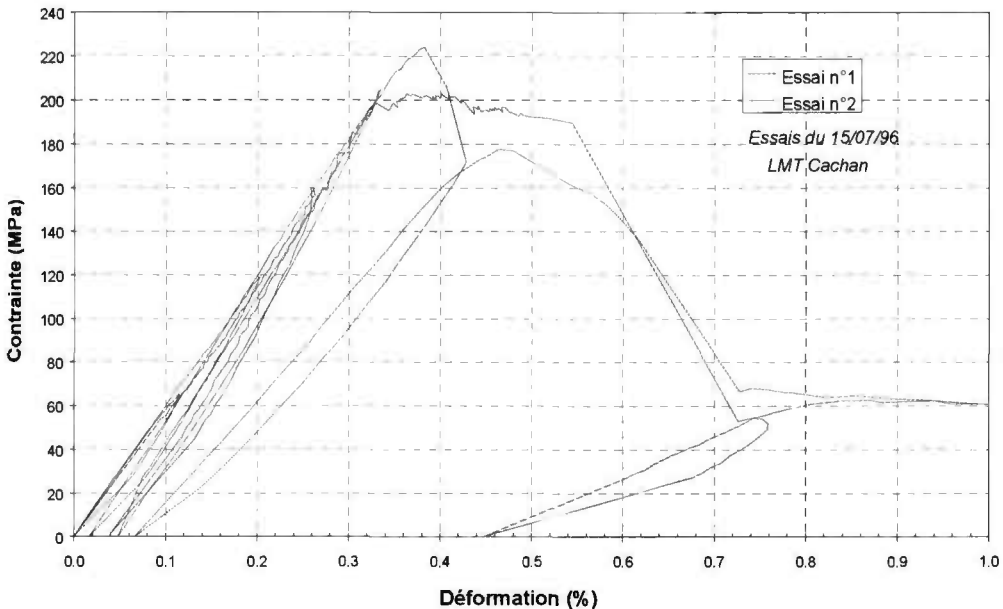


Figure 1 : Comportement en compression du Ductal®

Figure 1 : Compressive behaviour of Ductal®



Lors du chantier Cattenom, les essais de compression de contrôle sur 196 éprouvettes de diamètre 70 mm ont conduit aux résultats suivants :

Moyenne : 228 MPa  
 Ecart type 18 MPa  
 Valeur caractéristique réellement obtenue : 197 MPa

Valeur caractéristique prise pour les calculs : 180 MPa

**2. Estimation du module d'élasticité statique**

Le tableau récapitulatif des caractéristiques des BFUP (Cf. annexe 7) étudiés à ce jour montre qu'une formule simplifiée du type :  $E = k_0 * f_{cj}^{1/3}$  conduit aux valeurs de  $k_0$  suivantes :

BPR 180	$k_0 =$	8800
BSI 150	$k_0 =$	11000
1463 F130	$k_0 =$	9870

Si l'on considère un  $k_0$  unique de 9500 nous obtenons respectivement :

$E_{BPR} = 53\ 630\ \text{MPa}$	$E_{\text{mesuré}} = 50\ 000$
$E_{BSI} = 50\ 476\ \text{MPa}$	$E_{\text{mesuré}} = 65\ 000$
$E_{1463F} = 48\ 125\ \text{MPa}$	$E_{\text{mesuré}} = 57\ 000$

Ces évaluations à partir d'une formule réglementaire calibrée dans le domaine  $f_{c28} = 20$  à 120 MPa ne sont donc pas concluantes pour les BFUP.

Lors des études du BSI 150, une approche à partir des caractéristiques des constituants et de leur proportion a permis de déterminer le module théorique du BFUP.

La méthode utilisée par Cadoret Consulting s'appuie sur le modèle développé par Le Roy et De Larrard.

Il est procédé à une approche en deux temps .

*During work at the Cattenom nuclear power plant, routine compressive-strength checks on 196 specimens (7 cm diameter) gave the following results:*

*Mean strength: 228 MPa  
 Standard deviation: 18 MPa  
 Characteristic value actually obtained: 197 MPa*

*Design characteristic strength effectively used: 180 MPa*

**2. Estimate of the static modulus of elasticity**

*The table summarizing the UHPFRC characteristics studied to date (Annex 7) shows that a simplified formula such as  $E = k_0 * f_{cj}^{1/3}$  gives the following  $k_0$  values:*

<i>BPR 180</i>	<i><math>k_0 =</math></i>	<i>8800</i>
<i>BSI 150</i>	<i><math>k_0 =</math></i>	<i>11000</i>
<i>1463 F130</i>	<i><math>k_0 =</math></i>	<i>9870</i>

*If a single  $k_0$  value of 9500 is used, the results are:*

<i><math>E_{BPR} = 53\ 630\ \text{MPa}</math></i>	<i><math>E_{\text{measured}} = 50\ 000</math></i>
<i><math>E_{BSI} = 50\ 476\ \text{MPa}</math></i>	<i><math>E_{\text{measured}} = 65\ 000</math></i>
<i><math>E_{1463F} = 48\ 125\ \text{MPa}</math></i>	<i><math>E_{\text{measured}} = 57\ 000</math></i>

*These evaluations from a design formula gauged in the field  $f_{ck} = 20$  to 120 MPa are thus not conclusive for UHPFRC.*

*When the BSI 150 mix was being studied, an approach based on the characteristics of the constituent ingredients and their proportions served to determine the theoretical static modulus of elasticity of the UHPFRC.*

*The method used by Cadoret Consulting is based on the model developed by Le Roy and De Larrard.*

*The approach used consists of two phases.*



- Tout d'abord le module élastique de la pâte est évalué selon une loi de la forme:

$$E_{pj} = K_{pe} \frac{K_g * R_{cj}}{\left(1 + 3.15 \frac{E/C}{1 - 0.15 * (1 - \exp(-11 s/c))}\right)^{2.4}}$$

Avec des valeurs de  $E/C < 0,4$ . et pour des suspensions de fumées de silice  $s$  exprimées par rapport à la masse de ciment  $C$ .  $K_g$  est pris égal à 4,5.

$R_{cj}$  correspond aux valeurs mesurées sur mortier normalisé aux différentes échéances à  $j$  jours.

La valeur de  $K_{pe}$  est obtenue à partir de  $E_{pj} = K_{pe} \times F_{pj} = K_{be} \times F_{bj}$

$K_{be}$  et  $F_{bj}$  correspondant à une formulation témoin pour étalonner la pâte.

- Dans un deuxième temps le module élastique du BFUP dépendant des modules élastiques de la pâte et de la concentration granulaire  $g$  est évalué selon la relation suivante :

$$\frac{E_b}{E_g} = a \left( 1 + 2 g \frac{(1 - a^2)}{(g^* - g) + 2 a (2 - g^*) + a^2 (g^* - g)} \right)$$

avec  $g^* = 1 - 0,41 \left(\frac{d}{D}\right)^{0,20}$

- *First, the modulus of elasticity of the cement paste is assessed using a law such as:*

*With  $w/c$  values of less than 0,4, and for silica fume suspensions  $s$  expressed relative to the mass of cement  $C$ .  $K_g = 4.5$ .*

*$R_{cj}$  is the values measured on standardized cement paste at different periods of  $j$  days.*

*The value of  $K_{pe}$  is obtained from  $E_{pj} = K_{pe} \times F_{pj} = K_{be} \times F_{bj}$ .*

*$K_{be}$  and  $F_{bj}$  correspond to a reference mix for calibrating the cement paste.*

- *In a second phase, the modulus of elasticity of the UHPFRC—depending on the moduli of elasticity of the paste and the aggregate concentration  $g$ —is assessed with the following formula:*

**Page laissée blanche intentionnellement**



## ANNEXE 2

### Protocole expérimental des essais de flexion sur prismes et méthode d'exploitation

#### Introduction

Cette annexe décrit les procédures expérimentales pouvant être mises en œuvre afin de caractériser les performances en traction des BFUP par le biais d'essais de flexion. Deux types d'essais sont proposés. D'une part des essais de flexion quatre points permettant d'accéder à la résistance en traction suite à une correction de l'effet d'échelle. D'autre part, des essais de flexion trois points sur prismes entaillés qui permettent d'accéder à la contribution des fibres comme renfort d'une section fissurée après application d'une méthode d'exploitation dite méthode inverse.

#### 1. Dimensions des éprouvettes

Les éprouvettes sont des prismes de section carrée, de côté  $a$  et de longueur  $4*a$ , soit :

$a = 7 \text{ cm}$  : prisme  $7*7*28$   
 $a = 10 \text{ cm}$  : prisme  $10*10*40$   
 $a = 14 \text{ cm}$  : prisme  $14*14*56$   
 $a = 20 \text{ cm}$  : prisme  $20*20*80$

Le choix de la dimension des éprouvettes est conditionné par la dimension des fibres et le type d'élément de structure à caractériser. Ces informations sont données directement au 1.4.4.

#### 2. Préparation des éprouvettes

La préparation des éprouvettes (mode de coulage) ainsi que le mode d'essais (rotation des éprouvettes d'un quart de tour ou non) sont précisés dans le texte des recommandations en fonction du type de structure envisagé.

## ANNEX 2

### Experimental procedure for flexural tensile tests on prisms and analysis method

#### Introduction

*This annex describes the experimental procedures that can be used to characterize the tensile performance of UHPFRC by means of flexural tests. Two types of test are proposed: firstly, third-point flexural tests for determining the tensile strength following correction for scale effect; secondly, centre-point flexural tests using notched prisms, to determine the contribution of fibres as reinforcement of a cracked section, after application of the so-called 'back-analysis' method.*

#### 1. Dimensions of test specimens

*The test specimens are square-section prisms of dimensions  $a$  by  $4*a$  long:*

*$a = 7 \text{ cm}$  : prism  $7*7*28$   
 $a = 10 \text{ cm}$  : prism  $10*10*40$   
 $a = 14 \text{ cm}$  : prism  $14*14*56$   
 $a = 20 \text{ cm}$  : prism  $20*20*80$*

*The choice of specimen size is determined by the dimension of the fibres and the type of structural element to be characterized. The relevant information is given in §1.4.4.*

#### 2. Preparation of test specimens

*The preparation of specimens (casting method) and the test method (whether specimens are turned  $90^\circ$  or not) are specified in the body of the Recommendations, in accordance with the type of structure envisaged.*

En accord avec les recommandations en cours de publication de la RILEM sur le dimensionnement de structure en Béton Renforcé de Fibres (groupe TC 162-TDF), pour les prismes entaillés, une entaille est sciée en section centrale, du côté de la face tendue lors de l'essai de flexion. La profondeur de l'entaille est égale à 10% de la hauteur du prisme, afin de permettre une localisation efficace de la fissure en minimisant les risques d'une fissuration hors entaille. La largeur de l'entaille doit être de l'ordre de 2mm.

### 3. Principe de l'essai

Les éprouvettes sont testées en flexion, trois points (flexion centrée) pour les prismes entaillés, quatre points (flexion circulaire) pour les prismes non entaillés. La longueur entre appuis inférieurs est égale à trois fois la hauteur du prisme. Ce principe est, là encore, conforme aux propositions du groupe RILEM TC 162-TDF.

### 4. Matériel utilisé

La machine d'essai est une presse de traction/compression de préférence servo-hydraulique pouvant être asservie en déplacement vérin ou de préférence sur un capteur externe.

Dans le cas des essais de flexion quatre point, un capteur de type LVDT doit être fixé par un dispositif spécifique sur l'échantillon afin de mesurer la flèche vraie de l'échantillon au cours de l'essai (figure 1). En effet, sans un tel dispositif, la mesure de la flèche est faussée par les tassements aux points d'application des forces et aux appuis ainsi que par les déformations du montage lui-même.

Dans le cas des essais de flexion trois points, un capteur pontant l'entaille est fixé sur le prisme. Ce capteur doit être fixé au niveau de la fibre tendue inférieure du prisme. Il peut s'agir d'un capteur type LVDT ou d'un capteur spécifique de type extensométrique. Ce capteur est fixé par l'intermédiaire de plots collés de part et d'autre de l'entaille. La colle est une colle rapide type cyano-acrylate.

*In accordance with the RILEM recommendations on the design of Fibre-Reinforced Concrete structures (TC 162-TDF) currently at press, notched prisms are to be sawn at the centre, on the side under tension during the flexural test. The depth of the notch is 10% of the prism height, in order to effectively determine the location of cracking and minimize the risk of cracking beyond the notch area. The notch should be about 2 mm wide.*

### 3. Principle of test

*Bend-test notched specimens with a centre-point machine (angular bending) and un-notched specimens with a third-point machine (circular bending). The distance between bearing points must be three times the depth of the prism; this is in accordance with the recommendations of RILEM TC 162-TDF.*

### 4. Equipment used

*The test machine is a tensile/compressive load frame, preferably hydraulic and controlled by jack displacement or, even better, with an external sensor.*

*In the case of third-point bending, an LVDT type sensor must be attached to the specimen by special means in order to measure the actual deflection of the specimen during testing (Figure 1). Without such a system, deflection measurement is contaminated by settlement at the loading points and bearings and by deformation of the test apparatus itself.*

*For centre-point bending, fix a sensor to the prism, bridging the notch. Attach it to the tensile bottom fibre. It can be an LVDT type sensor or a special type of extensometric sensor. Attach it by means of tabs glued on each side of the notch. Use a fast-setting cyano-acrylate type glue. The distance between tabs must be constant from one test to the next so that the initial measurements can be corrected by subtracting the elastic deformation.*

La distance entre les plots doit être constante d'un essai à l'autre afin de corriger les mesures initiales par soustraction de la déformation élastique. Cette distance est de l'ordre de 4 à 5 cm. Il demeure possible en fonction du type de machine d'essais utilisée de compléter l'instrumentation des prismes entaillés par un capteur de mesure de la flèche comme dans le cas des essais de flexion quatre points.

The distance between tabs should be around 4 to 5 cm. Depending on the type of test machine, it may also be possible to complement the instrumentation of the notched specimens with a deflection measuring sensor, as for the third-point flexural tests.

La course des capteurs doit être d'au moins 2 mm avec une précision de 0.5% pleine échelle.

The stroke of the sensors must be at least 2 mm, with accuracy to within 5% at full scale.

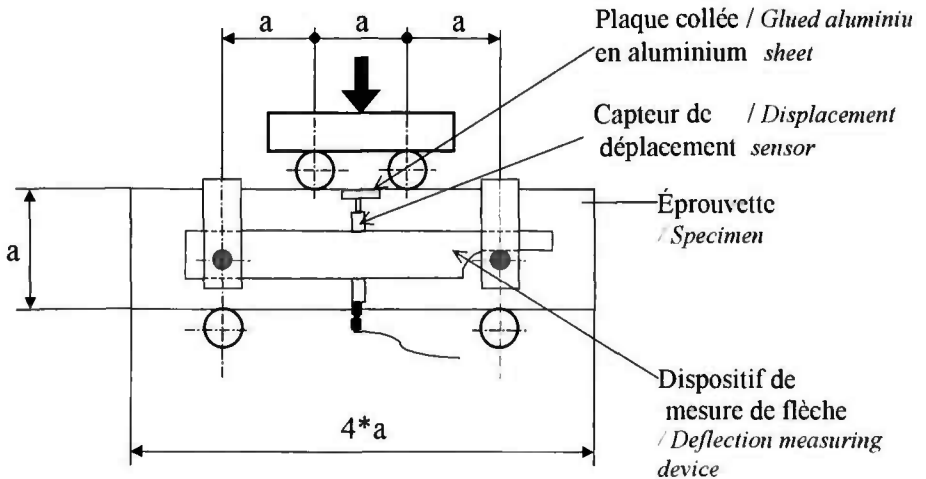


Figure 1 : Principe de mesure de la flèche vraie dans le cas d'un essai de flexion quatre points

Figure 1: Principle for measuring actual deflection with third-point flexural test

## 5. Mode opératoire

L'éprouvette est mise en place sur le dispositif d'essai de flexion de la presse. Les capteurs sont fixés sur l'éprouvette.

Une précharge est alors appliquée sur l'éprouvette, d'intensité aussi faible que possible, de l'ordre de quelques kilo-newtons, qui doit être prise en compte dans la suite de l'essai. Il faut s'assurer que lors de l'application de cette précharge, les capteurs de flèche et de mesure de l'ouverture de fissure répondent.

L'application de cette précharge peut être effectuée de différentes manières :

## 5. Test procedure

Place the specimen on the bending test device in the press. Fix the sensors to the specimen.

Preload the specimen to as small a degree as possible (around a few kN). This load is to be taken into account in the subsequent test procedure. Check that when this preload is applied, the deflection sensors and the sensors for measuring crack width respond.

The preload can be applied in different ways:

- par contrôle en déplacement piston (en commande manuelle et automatique), dans le cas où le système de commande de la presse permet de détecter une limite en force et de la maintenir,
- par contrôle en force : dans ce cas une approche très précise en déplacement manuel du vérin doit permettre de limiter la distance entre l'éprouvette et les points d'application de la charge à environ 1 millimètre. La boucle ouverte créée lors du passage en contrôle de force ne dure pas longtemps et il suffit de détecter la valeur de la précharge dès que le contact est établi (boucle d'asservissement fermée) et la valeur requise atteinte,

Basculer alors l'asservissement soit sur le capteur d'ouverture de fissure, soit sur le capteur de flèche (en mode automatique, après détection de la précharge, certaines presses poursuivent directement l'essai en basculant l'asservissement sur le capteur choisi).

Il est préférable, dans la mesure du possible, d'asservir l'essai directement sur un capteur fixé sur l'éprouvette (ouverture de fissure ou flèche). Cependant, dans le cas des presses qui ne supportent pas un asservissement sur un capteur externe, il demeure possible de piloter l'essai sur le déplacement du vérin. Les risques d'instabilité sont plus grands lors de la fissuration mais l'enregistrement de la flèche et de l'ouverture de la fissure sont exploitables.

Selon le capteur retenu pour le pilotage de l'essai, la vitesse de chargement doit être adaptée afin d'obtenir une bonne description du comportement tout en restant dans des limites raisonnables pour la durée de l'essai.

A titre d'ordre de grandeur, en pilotage vérin, une vitesse de l'ordre de 0,25 mm/mn convient, en pilotage sur la flèche, la vitesse est de 0,1 mm/mn et en pilotage sur le capteur pontant la fissure, elle est de l'ordre de 0,025 mm/mn. L'essai est poursuivi jusqu'à une flèche mesurée directement sur l'échantillon de  $0.015^*a$  en mm, ce qui permet d'obtenir une durée d'essai raisonnable.

Ainsi, en fonction de la taille des prismes, le tableau suivant donne la flèche  $a$  à atteindre pour interrompre l'essai :

- *by piston-displacement control (manually or automatically) if the press control system can detect a force limit and maintain it,*
- *by force control: in this case very precise manual control of the jack must limit the distance between the specimen and the loading points to about 1 millimetre. The transient when changing to force control does not last long, and it suffices to detect the value of preloading as soon as contact is made (control loop closed) and the required value is reached.*

*Then switch control of loading to the crack sensor, or to the deflection sensor (in automatic mode, after detection of the preload, some presses continue the test immediately by switching control to the selected sensor).*

*In so far as possible, it is preferable to control the test directly from a sensor attached to the specimen (crack width or deflection). However, in the case of presses which do not allow for control from an external sensor, it is possible to control the test by jack displacement. The risks of instability are greater when cracking occurs, but the recorded deflection and crack width can be used nonetheless.*

*Depending on the type of sensor chosen for controlling the test, the loading rate must be adapted to obtain a good description of the behaviour while remaining consistent with reasonable test durations. For guidance, with jack control a pace rate of about 0.25 mm/min. is suitable; with deflection control, the pace rate is 0.1 mm/min.; and with control from a sensor bridging the crack, it is about 0.025 mm/min. The test continues until the deflection measured directly on the specimen reaches  $0.015^*a$  (in mm), which amounts to a reasonable test duration. The following table gives the deflection to be attained (when the test can be stopped) for different specimen sizes.*



Prisme <i>Prism</i> (mm)	Flèche maximale <i>Maximum deflection</i> (mm)	Nombre de données <i>Amount of data</i> (fréquence 5Hz)
70*70*280	2	1200
100*100*400	2.5	1800
140*140*560	3	2520
200*200*800	3.5	3600

**6. Acquisition des données**

L'enregistrement des données au cours de l'essai doit être effectué avec une fréquence de 5 hertz, afin d'obtenir une courbe complète comportant un minimum de 1200 points. Dans le cas des échantillons de grandes dimensions, il est possible de réduire la fréquence d'acquisition tout en conservant un nombre de données suffisantes. Les signaux à enregistrer sont :

- le temps,
- l'ouverture de la fissure,
- la flèche,
- la force,
- éventuellement le déplacement du piston.

**7. Mise en forme des résultats**

Un minimum de six essais est requis afin d'obtenir une réponse moyenne statistiquement significative. La mise en forme des résultats s'effectue de la façon suivante :

**7.1. Estimation de la résistance en traction, flexion 4 points, prismes non entaillés**

A défaut d'essais de traction directe pour évaluer les performances du matériau, il est possible d'approcher cette caractéristique sur la base des essais de flexion 4 points. Il suffit d'extraire des essais de flexion la valeur de l'effort ( $F_{fiss}$ ) correspondant à la perte de linéarité du comportement élastique. Ce point est aisément identifiable sur les courbes effort en fonction de la flèche vraie. Par suite, la résistance obtenue à la fissuration en flexion peut être calculée par la formule suivante :

$$R_{fl} = 3 \cdot F_{fiss} / a^2$$

avec  $F_{fiss}$  en N et  $a$  en mm,  $R_{fl}$  est en MPa

**6. Data acquisition**

*During the test, record data at a frequency of 5 hertz in order to provide a full curve with at least 1200 points. In the case of large specimens, the frequency of acquisition can be reduced yet still give enough data. The signals to be recorded are:*

- *time,*
- *crack width,*
- *deflection,*
- *force,*
- *ram displacement (possibly).*

**7. Conflation of results**

*At least six tests are required to get a statistically significant mean response. Results are conflated as follows:*

**7.1. Assessment of tensile strength, third-point bending, un-notched specimens**

*In the absence of direct tensile-strength testing to determine the performance of UHPFRC, the tensile strength can be approximated from third-point flexural testing by extracting from the flexural test results the value of the force ( $F_{fiss}$ ) corresponding to the loss of linearity of elastic behaviour. This point is easily identified on force/actual-deflection curves. The strength ( $R_{fl}$ ) attained at the moment of flexural cracking can then be easily calculated using the following formula:*

$$R_{fl} = 3 \cdot F_{fiss} / a^2$$

*where  $F_{fiss}$  is in newtons,  $a$  in millimeters, and  $R_{fl}$  in megapascals.*



Pour obtenir une estimation de la résistance en traction, il faut corriger cette résistance à la fissuration de l'effet d'échelle (ou effet de gradient). L'approche retenue est issue des travaux de recherche sur cet aspect et correspond à celle retenue dans le cadre du code de calculs des structures CEB-FIP, soit :

$$R_t = R_{fl} * \frac{2.0 * \left(\frac{h}{h_0}\right)^{0.7}}{1 + 2.0 * \left(\frac{h}{h_0}\right)^{0.7}} \quad \text{avec } h_0 = 100 \text{ mm}$$

Pour appliquer une telle formule, il faut adopter pour h, la hauteur du prisme, soit a en mm.

7.2. Correction de l'ouverture de la fissure, flexion 3 points, prismes entaillés

Pour tenir compte de la déformation élastique sur la base de mesure, il est nécessaire de corriger la mesure directe de l'ouverture de fissure. Cette correction peut être effectuée uniquement avant localisation de la fissure, après, la décharge créée par la propagation de la fissure conduit à une déformation élastique négligeable sur la base de mesure.

La méthode la plus simple pour effectuer cette correction consiste à repérer la fin du domaine élastique initial (perte de linéarité) et de noter les valeurs de flèche (fo) et d'ouverture de fissure correspondante (wo). L'ouverture de fissure qui nous intéresse s'obtient alors directement en soustrayant la valeur wo aux valeurs mesurées de l'ouverture de fissure. Cette opération effectuée simplement un changement de repère et place la nouvelle origine de nos courbes à l'instant supposé de la localisation de la fissure.

Remarque : La déformation élastique sur la base de mesure de 50 mm est estimée à environ 10 µm. Cette valeur donne l'ordre de grandeur de la valeur wo qui doit être obtenue. Par ailleurs, cette valeur demeurant très faible, l'hypothèse d'un simple changement d'origine pour définir l'axe des ouvertures de fissure est valide, les déformations élastiques résiduelles sur la base de mesure devenant très rapidement négligeables.

*To estimate the tensile strength, the cracking strength must be corrected for scale effects (or gradient effect). The approach adopted is derived from research into this point and corresponds to that adopted for the CEB-FIP structural design code:*

*To apply such a formula, take as h the depth of the prism, i.e. a in millimetres.*

7.2. Correction for crack width, centre-point bending, notched specimens

*To take account of elastic deformation of the measurement base, it is necessary to correct the direct measurement of crack width. This correction can be carried out only before initiation of the crack; subsequently, the stress release caused by propagation of the crack results in negligible elastic deformation of the measuring base.*

*The simplest way to make this correction is to identify the end of the initial elastic range (loss of linearity) and to note the deflection values (fo) and corresponding crack widths (wo). The crack width of interest is then obtained directly by subtracting wo from the values measured when cracking started. This simply changes the co-ordinate system and puts the new origin of the curves at the time the crack is assumed to initiate.*

*Remark: The elastic deformation on a 50 mm measurement base is estimated to be about 10 µm. This gives the order of magnitude of the value wo to be obtained. Moreover, because this value remains very low, it is valid to simply move the origin to redefine the crack-width scale, since the residual elastic deformation of the measuring base very quickly becomes negligible.*

7.3. Corrélation entre l'ouverture de la fissure et la flèche, flexion 3 points, prismes entaillés

Dans le cas d'un essai où l'ouverture de la fissure n'est pas enregistrée, il faut l'estimer à partir de la mesure de la flèche vraie. Bien que cette relation ne soit pas directe et dépende de la hauteur de la fissure, une bonne estimation peut être obtenue de la façon suivante.

Connaissant la flèche  $f_0$  qui correspond à la fin du domaine élastique (voir paragraphe 7.2), l'ouverture de la fissure ( $w$ ) est alors estimée par la relation suivante :

$$w = 4/3 * 0,9 * (f - f_0)$$

où  $f$  représente la flèche vraie mesurée.

Cette expression est issue de l'hypothèse d'un mécanisme de rotule parfaite au droit de la fissure, affectée d'un coefficient correcteur qui prend en compte le fait que la fissure ne traverse pas totalement la section. Elle n'est donc pas valide en période initiale de propagation de la fissure. Cependant, cette période est relativement courte et la hauteur de la fissure se stabilise rapidement entre 80 et 90% de la hauteur de la section.

Remarque : cette approche ne doit être mise en œuvre qu'en tout dernière issue compte tenu de la diversité des réponses d'un matériau à l'autre.

7.4. Filtrage des données, flexion 3 points, prismes entaillés

Cette opération a pour but de réduire le bruit des données expérimentales afin de faciliter la mise en œuvre de la méthode inverse. Il va de soi que plus la qualité des essais est bonne, plus cette opération de filtrage est aisée. Dans tous les cas, lorsqu'un résultat d'essais présente des sauts brusques, soit en effort, soit en déplacement (flèche ou ouverture de fissure), qui correspondent manifestement à des problèmes d'asservissement lors de l'essai, aucun filtrage ne doit être mis en œuvre pour tenter de donner un sens physique à un tel comportement. Par suite, un tel résultat d'essais doit tout simplement être rejeté pour une analyse ultérieure.

7.3. Correlation between crack width and deflection, centre-point, notched specimens

*In the case of tests where the crack width is not recorded, it must be estimated from measurement of the actual deflection. Although the relationship is not direct, and depends on the depth of cracking, a good estimate can be obtained as follows.*

*If the deflection  $f_0$  at the end of the elastic range is known (see paragraph 7.2), the crack width ( $w$ ) can be estimated using the following equation:*

$$w = 4/3 * 0,9 * (f - f_0)$$

*where  $f$  is the actual deflection as measured.*

*This expression is derived from the assumption of a perfect hinge mechanism at the crack, modified by a correction factor taking account of the fact that the crack does not go right through the section. It is therefore not valid in the initial phase of crack propagation. However, this phase is relatively short and the depth of the crack quickly stabilizes between 80% and 90% of the depth of the section.*

*Remark: This approach must be used only as a last resort, given the diversity of responses from one concrete to another.*

7.4. Filtering of data, centre-point bending, notched specimens

*The purpose of data filtering is to reduce the noise of test data in order to facilitate back analysis. Naturally, the better the quality of the tests, the easier the filtering operation is. Whenever a test result has sudden jumps in either force or displacement (deflection or crack width), obviously resulting from control problems during the test, no filtering should be carried out in an attempt to give a physical meaning to the recorded behaviour. Consequently such test results must simply be rejected for subsequent analysis.*

Une description suffisante du comportement peut être obtenue avec échantillonnage des résultats sur un pas d'ouverture de fissure de 20 micromètres. Une méthode simple consiste alors à effectuer la moyenne des efforts enregistrés sur un intervalle de 40 micromètres et à affecter cette valeur au point central de l'intervalle. Compte tenu de la fréquence d'échantillonnage retenue (5 Hz) et de la vitesse de pilotage adoptée, cette technique de moyenne mobile est facile à mettre en œuvre et revient à moyenner un nombre de données assez important sur chaque intervalle.

Remarque : au niveau de l'origine des courbes, le premier point est le point expérimental qui définit la fin du domaine élastique. Il ne fait l'objet d'aucune moyenne. Dès le deuxième point, la moyenne mobile peut être mise en œuvre en agrandissant progressivement l'intervalle sur lequel est calculée la moyenne.

## 8. Extraction de la loi de traction par méthode inverse

Cette partie a pour objectif de donner le principe de la méthode inverse qui permet d'obtenir une relation contrainte de traction en fonction de l'ouverture de la fissure à partir des résultats expérimentaux moment résistant en fonction de l'ouverture de la fissure, obtenus dans le cadre des essais de flexion 3 points sur prismes entaillés. La méthode de calcul présenté doit être appliquée sur les données filtrées afin d'obtenir une convergence numérique stable.

### 8.1. Equilibre mécanique de la section fissurée

La figure suivante illustre une section fissurée d'un prisme en flexion. Deux parties sont distinguées, celle non fissurée où la distribution des contraintes correspond à un comportement élastique linéaire, et celle fissurée où la distribution des contraintes dépend directement de l'efficacité des fibres. C'est cette dernière distribution que l'on recherche et qui résulte de l'exploitation par la méthode inverse [1.11], [1.12], [1.13].

*An adequate description of behaviour can be obtained by sampling results at crack-width steps of 20 micrometres. A simple method of achieving this is to average the forces recorded over a 40 micrometre interval and attribute that mean value to the centre of the interval. Given the frequency of sampling (5 Hz) and loading rate adopted, this moving-average technique is easy to use, and involves averaging quite a large amount of data for each interval.*

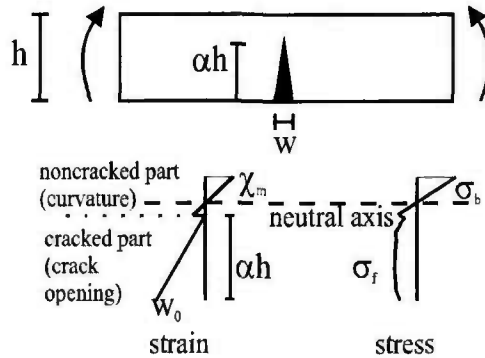
*Remark: At the origin of the curves, the first point is the test point defining the end of the elastic range. It is not averaged. The moving average can be used for the second point and beyond, gradually increasing the averaging interval.*

## 8. Extraction of the tensile-strength law using back analysis

*The purpose of this section is to outline the principle of back analysis which will produce a tensile stress/crack width relationship from resistance moment/crack width test results obtained with centre-point flexural tests on notched prisms. The calculation method presented must be applied to filtered data in order to obtain stable numerical convergence.*

### 8.1. Mechanical equilibrium of the cracked section

*The figure below shows a cracked section of a bent prism. Two different parts are distinguished: the uncracked part where the stress distribution corresponds to linear elastic behaviour, and the cracked part where stress distribution depends directly on the effectiveness of the fibres. It is the latter distribution which is of interest here, and which can be determined by back analysis [1.11], [1.12], [1.13].*



L'équilibre mécanique de la section conduit aux équations suivantes, en notant  $b$  la contribution de la partie non fissurée et  $f$ , celle de la partie fissurée :

The mechanical equilibrium of the section results in the following equations, where  $b$  is the contribution of the uncracked part and  $f$  the contribution of the cracked part:

$$N_b = \frac{E \cdot \chi_m \cdot b \cdot h^2}{2} \left[ (1 - \alpha_n)^2 - (\alpha - \alpha_n)^2 \right]$$

$$N_f = \frac{\alpha \cdot h \cdot b}{w_0} \int_0^{w_0} \sigma_f \cdot dw$$

$$M_f = \alpha h \cdot N_f - \frac{(\alpha \cdot h)^2 \cdot b}{w_0} \int_0^{w_0} \sigma_f \cdot w \cdot dw$$

$$M_b = \frac{E \cdot \chi_m \cdot b \cdot h^3}{3} \left[ (1 - \alpha_n)^3 - (\alpha - \alpha_n)^3 \right] + h \cdot \alpha_n \cdot N_b$$

soit : moment résistant :  $M = Mb + Mf$   
effort normal :  $N = Nb + Nf = 0$

i.e. resistance moment:  $M = Mb + Mf$   
normal force:  $N = Nb + Nf = 0$

avec :

$\alpha$  la hauteur relative de la fissure (voir figure)  
 $\alpha_n$  la hauteur relative de l'axe neutre donnée  
par :  $\sigma_t = E \cdot \chi_m \cdot h \cdot (\alpha - \alpha_n)$

with:

$\alpha$  relative depth of the crack (see figure)  
 $\alpha_n$  relative height of the neutral fibre,  
given by:  $\sigma_t = E \cdot \chi_m \cdot h \cdot (\alpha - \alpha_n)$

$\chi_m$  la courbure de la partie non fissurée  
 $\sigma_t$  la résistance en traction de la matrice  
 $E$  le module élastique  
 $b, h$  la largeur et la hauteur de la section

$\chi_m$  curvature of the uncracked part  
 $\sigma_t$  tensile strength of the matrix  
 $E$  modulus of elasticity  
 $b, h$  breadth and height of the section

Pour relier l'ouverture de la fissure à la courbure de la partie non fissurée, une relation cinématique est utilisée de la forme suivante :

To link crack width to the curvature of the uncracked part, a kinematic relationship of the following type is used:

$$w_0 = \left[ \chi_m + 2 \cdot \chi_e \right] \frac{2 \cdot (\alpha h)^2}{3}$$

$$w_0 = \left[ \chi_m + 2 \cdot \chi_e \right] \frac{2 \cdot (\alpha h)^2}{3}$$

avec :  $\chi_e$  la courbure élastique équivalente, donnée par :  $\chi_e = M/EI$  et  $I$  l'inertie de la section rectangulaire

8.2. Processus itératif

Dans la mesure ou la relation contrainte de traction en fonction de l'ouverture de la fissure n'a pas une forme simple, nous recherchons des couples de points ( $w_i, \sigma_{fi}$ ), qui la définissent de façon discrète. Considérant alors que la discrétisation de l'abscisse qui correspond aux ouvertures de fissure est suffisamment fine, nous pouvons exprimer l'intégrale des contraintes par une approximation trapèze, soit par exemple :

$$\int_0^{w_{i+1}} \sigma_f . dw = \int_0^{w_i} \sigma_f . dw + \left( \frac{\sigma_{f_i} + \sigma_{f_{i+1}}}{2} \right) (w_{i+1} - w_i)$$

Par suite, les expressions précédentes de l'effort normal et du moment de la partie fissurée peuvent être exprimées de façon incrémentales :

$$N_{f_{i+1}} = N_{f_i} \cdot \frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_i} \cdot \frac{w_i}{w_{i+1}} + \alpha_{i+1} \cdot b \cdot h \cdot \left( \frac{\sigma_{f_i} + \sigma_{f_{i+1}}}{2} \right) \left( 1 - \frac{w_i}{w_{i+1}} \right)$$

$$M_{f_{i+1}} = M_{f_i} \left( \frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_i} \cdot \frac{w_i}{w_{i+1}} \right)^2 + \alpha_{i+1} \cdot h \cdot N_{f_{i+1}} \cdot \left( 1 - \frac{w_i}{w_{i+1}} \right) - \frac{(\alpha_{i+1} \cdot h)^2 \cdot b}{2} \cdot \left( 1 - \frac{w_i}{w_{i+1}} \right)^2 \cdot \sigma_{f_{i+1}}$$

Ainsi, considérant que la relation contrainte ouverture de fissure est connue jusqu'à l'itération  $i$ , nous obtenons les deux inconnues contrainte et hauteur relative de la fissure à l'itération  $i+1$  en mettant en œuvre les équations du modèle précédent, de façon à satisfaire la nullité de l'effort normal et un moment résistant de la section égale au moment expérimental.

8.3. Initialisation du procédé et stabilisation de la convergence

Afin de démarrer le processus incrémental, il suffit de prendre pour valeurs initiales le point défini comme moment de fissuration (fin du domaine élastique), avec une ouverture de fissure nulle :

where:  $\chi_e$  is the equivalent elastic curvature, given by  $\chi_e = M/EI$  and  $I$  is the inertia of the rectangular section.

8.2. Iterative process

Since the tensile stress/crack width relationship is complex, couples of points ( $w_i, \sigma_{fi}$ ) defining it discretely are sought. Considering that the discretization of the horizontal scale (crack width) is sufficiently fine, the integral of the stresses can be expressed by a trapezoidal approximation such as:

Subsequently, the previous expressions of the normal force and moment of the cracked part can be expressed incrementally:

Thus, considering that the stress/crack width relationship is known to iteration  $i$ , the two unknowns—stress and relative depth of the crack at iteration  $i+1$ —can be calculated with the equations of the previous model so as to obtain zero normal force and a resistance moment of the section equal to the test moment.

8.3. Initialization of the process and stabilization of convergence

To start the incremental process, take as starting values the point defined as the cracking point (end of the elastic range), with a crack width of zero:

$$M_b^0 = M_{\text{ext}} = \frac{-bh^2 \cdot \sigma_f^0}{6}$$

avec  $M_f^0 = 0$  ;  $N_b^0 = 0$  ;  $N_f^0 = 0$

Dans la mesure où la description des résultats expérimentaux est discrète, la méthode inverse mettant en œuvre une sorte de dérivée de la courbe des moments, une oscillation de la relation contrainte en fonction de l'ouverture de la fissure est fréquente. Afin de stabiliser ce phénomène, nous avons pu vérifier qu'il suffit de corriger l'itération  $i$  après avoir calculé l'itération  $i+1$ .

En pratique, il suffit de repositionner la contrainte de l'itération  $i$  en effectuant une moyenne mobile du type suivant :

$$\sigma_i = (2 \cdot \sigma_i + \sigma_{i+1})/3$$

Dans la mesure où la contrainte ne varie pas brusquement, et c'est le cas en pratique, cette correction n'affecte pas la réponse de la méthode et conduit à des résultats beaucoup plus réalistes. Notons que cette opération de stabilisation doit être effectuée à la fin de chaque itération afin d'être prise en compte lors du calcul des itérations suivantes.

#### 8.4. Correction de l'effet d'échelle

Il a été décidé de retenir dans certains cas l'essai de flexion 3 points sur prisme entaillé. En fait, l'objectif de l'entaille a simplement pour but de localiser la fissure dans une section précise et en aucun cas de se placer dans les hypothèses de la mécanique de la rupture qui considèrent un rayon de courbure nul en fond d'entaille. Par suite, la fissuration qui correspond à la perte de linéarité de la courbe des moments est affectée d'un effet d'échelle, tout comme dans le cas des essais de flexion sur prismes non entaillés.

Il est donc nécessaire de corriger cet effet afin d'obtenir une valeur réaliste de la contrainte de fissuration. L'approche retenue est similaire à celle exposée au paragraphe 7.1 :

$$M_b^0 = M_{\text{ext}} = \frac{-bh^2 \cdot \sigma_f^0}{6}$$

with  $M_f^0 = 0$  ;  $N_b^0 = 0$  ;  $N_f^0 = 0$

*Since the description of the test results is discrete, the back-analysis method using a sort of derivative of the moment curve, oscillation of the stress/crack width relationship often occurs. It has been shown that it can be stabilized by correcting iteration  $i$  after calculating iteration  $i+1$ .*

*In practice, it is sufficient to reposition the stress of iteration  $i$  by determining a moving average of the following type:*

$$\sigma_i = (2 \cdot \sigma_i + \sigma_{i+1})/3$$

*If the stress does not vary suddenly—which is the case in practice—this correction does not affect the response of the method and leads to much more realistic results. It should be observed that this stabilization operation must be carried out at the end of each iteration in order to be taken into account in the calculation of the following iterations.*

#### 8.4. Correction of scale effect

*In some cases it was decided to adopt the centre-point flexural test with notched prisms. The purpose of the notch is simply to initiate the crack in a specific section, and has nothing to do with the assumptions of fracture mechanics considering a zero radius of curvature at the bottom of the notch. Accordingly, the cracking which corresponds to loss of linearity of the moment curve is affected by scale effect, as in the case of flexural tests on un-notched prisms.*

*It is therefore necessary to correct the scale effect to obtain a realistic value for the cracking stress. The approach adopted is similar to that outlined in paragraph 7.1:*

$$R_t = R_{fl} * \frac{2.0 * \left(\frac{h}{h_0}\right)^{0.7}}{1 + 2.0 * \left(\frac{h}{h_0}\right)^{0.7}} \quad \text{avec } h_0 = 100 \text{ mm}$$

Pour appliquer une telle formule, il faut adopter pour  $h$ , la hauteur réduite de la section, c'est à dire la hauteur résiduelle après entaille, soit  $0.9a$ . En soi, cette valeur a un caractère purement numérique et en aucun cas elle ne peut être considérée comme représentative de la vraie résistance en traction du matériau.

Par contre, l'effet de l'entaille disparaît rapidement lorsque la fissure se propage et nous avons pu vérifier que dans la cadre de la mise en œuvre de la méthode inverse, il est préférable de considérer le prisme comme non entaillé, c'est à dire ayant une hauteur non réduite. Sans qu'il soit possible de justifier rationnellement cette observation, nous pouvons simplement constater que dans tous les cas, une telle position tend à réduire les contraintes dans la fissure et donc nous place du côté de la sécurité.

*To apply a formula such as this,  $h$  must be taken as the reduced depth of the section, i.e. the residual thickness after notching, i.e.  $0.9a$ . In itself this value is of a purely numerical nature and under no circumstances can be considered to be representative of the actual tensile strength of the concrete.*

*On the other hand, the effect of the notch quickly disappears as the crack propagates, and it has been demonstrated that when the back-analysis method is used, it is preferable to consider the prism as un-notched, i.e. not with the reduced depth. Although it is not possible to rationally substantiate this observation, it can simply be observed that in all cases this approach tends to reduce the stresses in the crack and therefore puts things on the safe side.*

### ANNEXE 3

## Caractérisation d'un BFUP utilisé en plaque mince à partir d'essais de flexion

#### 1. Principe

Afin d'obtenir une loi de comportement caractérisant le matériau, on réalise une série d'essais de flexion sur prismes minces puis on traite les résultats expérimentaux par une méthode inverse. Ce principe est également défini dans le cas des poutres et des plaques épaisses mais il convient de l'adapter aux particularités des pièces minces.

La faible épaisseur de ces structures influence leur réponse en flexion, notamment par l'effet de la distribution des fibres qui est particulièrement conditionnée par les parois du coffrage. L'objectif est donc de caractériser le matériau en réalisant des essais sur des corps d'épreuve dont l'épaisseur est égale à celle de la structure réelle.

Nota : si l'épaisseur réelle n'est pas connue au moment des essais, celle des corps d'épreuve ne devra pas être inférieure à  $\max(3 \times L_f ; L / 50)$ ,  $L$  étant la portée de la future structure, compte-tenu du domaine de définition des plaques minces précisé plus haut.

Ce choix étant fait sur l'épaisseur, la taille des prismes ne paraît plus compatible avec la présence d'une entaille permettant la mesure de l'ouverture d'une fissure. Les essais se limitent donc à une flexion sur prismes non entaillés et à mesurer la flèche au centre en fonction de l'effort appliqué.

### ANNEX 3

## Characterization of UHPFRC used for thin slabs, using flexural tests

#### 1. Principle

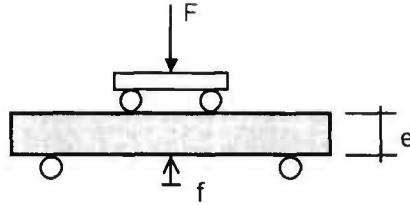
To obtain a constitutive law characterizing the material, it is proposed to carry out a series of flexural tests on thin prisms and to process the test results by back analysis. This principle is also applied to beams and thick slabs, but has to be adapted to the specific features of thin slabs.

The thinness of the elements affects their flexural response, particularly as a result of the distribution of fibres which is highly affected by the walls of the form. The objective is therefore to characterize the material by carrying out tests on specimens of the same thickness as the actual structure concerned.

NB: If the actual thickness is not known at the time of testing, the thickness of the test specimen must not be less than  $3 \times L_f$  or  $L / 50$  ( $L$  being the span of the element), whichever is greater, taking account of the range of what constitutes thin slabs as defined above.

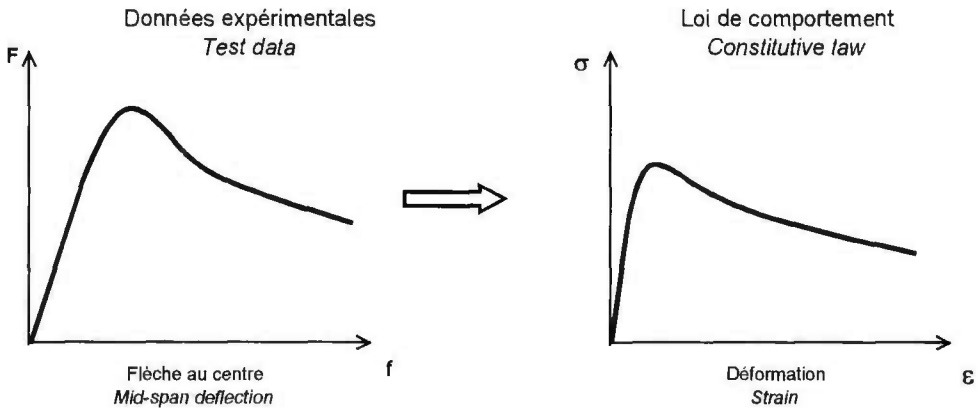
Given the thickness chosen, the size of prisms is not consistent with notching for measurement of crack width. Tests are therefore confined to bending un-notched prisms and measuring the mid-span deflection for the force applied.





Une méthode inverse spécifique aux plaques minces est alors proposée et permet d'obtenir la loi de comportement du matériau.

*A special method of back analysis for thin slabs is proposed for obtaining the constitutive law of the material.*

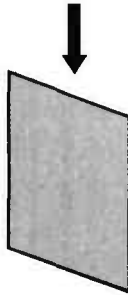


Cependant, aux effets de parois évoqués précédemment se conjuguent ceux liés au mode de bétonnage d'une plaque mince. Les essais à réaliser doivent en rendre compte, et notamment de l'éventuelle anisotropie de distribution des fibres au sein d'une plaque.

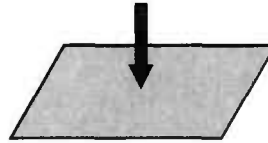
*However, in addition to the sidewall effects there are also the effects of the way the concrete of a thin slab is placed. The tests to be carried out must take this into account too, particularly the anisotropy of fibre distribution within the slab.*

On distingue idéalement deux modes de fabrication de plaques à l'échelle industrielle :

*Two methods of making thin slabs at the industrial scale are ideally distinguished:*



Coulage entre deux panneaux de coffrage parallèles et verticaux  
Casting between two vertical parallel formwork panels



Coulage sur un moule horizontal  
Casting in a horizontal mould

## 2. Protocole expérimental

### 2.1. Hypothèses

- La structure réelle est une plaque d'épaisseur  $e$  (si  $e$  n'est pas connue on considère la valeur :  $\text{Max} [ 3 \times L_f ; L / 50 ]$ ).
- La longueur des fibres du BFUP vaut  $L_f$ .
- Le mode de bétonnage est déterminé.

### 2.2. Confection des corps d'épreuve

Détermination des dimensions utiles :

- Longueur prismes :  $L_p = \min [ 20 \times e ; 60\text{cm} ]$
- Largeur des prismes :  $l_p = 8 \times L_f$
- Epaisseur des prismes :  $e$
- Distance au bord :  $d = \text{Max} [ L_f ; 2\text{cm} ]$
- Réalisation de 4 plaques carrées de côté égal à  $\text{Max} [ L_p + 2d ; 26L_f + 2d ]$ , d'épaisseur  $e$ , coulées selon le même mode de bétonnage que la structure (coffrages verticaux ou moule horizontal).
- Repérage des deux directions principales des plaques (axes X et Y) et leur correspondance avec le mode de bétonnage.
- Sciage de 3 prismes dans chaque plaque, selon les dimensions et l'implantation définies sur la figure ci-après.

## 2. Test procedure

### 2.1. Assumptions

- The actual structure is a slab of thickness  $e$  (if  $e$  is not known, take  $3 \times L_f$  or  $L/50$ , whichever is greater).
- The length of UHPFRC fibres is  $L_f$ .
- The concreting method is known.

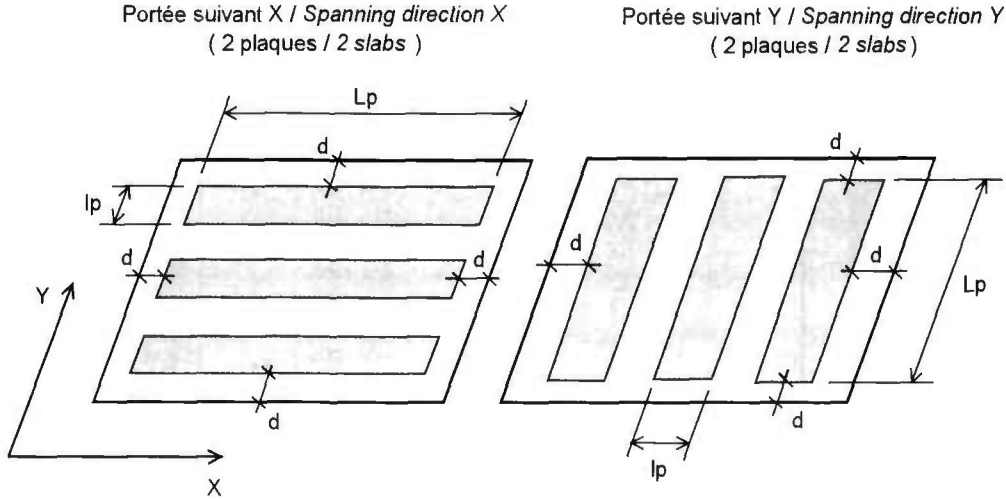
### 2.2. Manufacturing test specimens

Determination of relevant dimensions:

- Prism length:  $L_p = \min [ 20 \times e ; 60\text{cm} ]$
- Prism width:  $l_p = 8 \times L_f$
- Prism depth:  $e$
- Distance to edge:  $d = \text{Max} [ L_f ; 2\text{cm} ]$
- Make four square slabs with a side length of  $\text{Max} [ L_p + 2d ; 26L_f + 2d ]$ , and of thickness  $e$ ; they should be cast in the same way as the actual structure (vertical forms or horizontal mould).
- Identify the two main directions of the slabs (X and Y axes) and their correspondence with the method of casting.
- Saw three prisms from each slab, to the dimensions and orientation shown in the figure below.

Deux séries de 6 prismes sont ainsi obtenues, l'une suivant l'axe X, l'autre suivant l'axe Y,

Two sets of 6 prisms are thus obtained, one along the X axis and one along the Y axis.

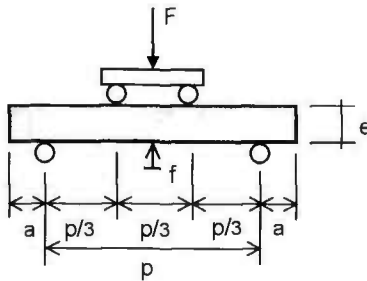


2.3. Réalisation des essais

2.3. Testing

Les prismes sont testés en flexion circulaire (4 points), tel que décrit ci-dessous :

Bend-test the prisms (third-point test) as described below:

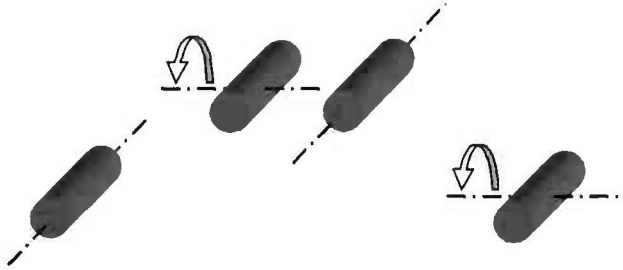


$$a = \max [ e/2 : 3em ]$$

$$p = Lp - 2a$$

Les appuis et pièces d'application de la charge sont des rouleaux dont deux sont articulés transversalement.

The bearings and points of load application are rollers, two of which are hinged transversally.



Un capteur de déplacement est placé à mi-travée et permet de mesurer la flèche (avec correction des tassements d'appuis) du prisme au cours de l'essai. Ce capteur doit permettre de piloter l'essai à une vitesse constante de 100 mm / min.

*Place a displacement sensor at mid-span to measure the deflection (with correction due to settlement at bearings) of the prism during the test. The sensor must be suitable for controlling the test at a constant rate of 100 mm / min.*

Un dispositif d'acquisition permet l'enregistrement de la flèche ( $f$ ) et de l'effort appliqué ( $F$ ).

*Use a logging system to record the deflection ( $f$ ) and the force applied ( $F$ ).*

#### 2.4. Traitement des résultats

#### 2.4. Processing results

Pour chaque série (direction X et direction Y), les 6 courbes Moment fléchissant / flèche sont rassemblées sur un graphique.

*Plot the 6 bending moment/deflection curves for each set (direction X and direction Y) on a graph.*

$$M = \frac{F \cdot p}{6}$$

$$M = \frac{F \cdot p}{6}$$

Sur chacun des 2 graphiques, les courbes moyenne et caractéristique (loi de Student avec fractile de 5% - Cf. AFREM [1.1]) sont tracées.

*Trace the mean and characteristic curves (Student's law with a 5% quantile - from AFREM [1.1]) on each of the two graphs.*

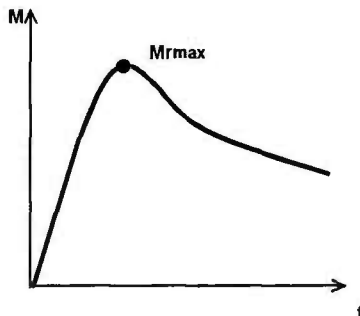
#### Détermination de $M_{rmax}$

#### Determination of $M_{rmax}$

Des courbes caractéristiques on déduit  $M_{rmax}/X$  et  $M_{rmax}/Y$  (moment résistant maximum dans la direction X (respectivement Y)).

*From the characteristic curves deduce  $M_{rmax}/X$  and  $M_{rmax}/Y$  (maximum resistance moment in directions X and Y).*

Courbe caractéristique / Characteristic curve



Détermination de  $f_{ij}$  et  $E$

Sur les 6 courbes brutes de chaque série, on repère visuellement les inflexions  $\Delta M$  puis on linéarise les enregistrements correspondant à l'intervalle  $\Delta M/3 ; 2\Delta M/3$ , tel que défini sur le graphique suivant.

Chaque droite ainsi obtenue permet de calculer un module  $E$  à partir de la pente élastique. De ces 6 valeurs on détermine une valeur moyenne et si nécessaire une valeur caractéristique du module (loi de Student avec fractile de 5%).

En prolongeant ces droites au-delà de  $\Delta M$ , on relève les 6 moments  $M^*$  correspondant à la perte de linéarité et on calcule :

$$\frac{6 \cdot M^*}{l_p \cdot e^2}$$

Des six valeurs obtenues on détermine la valeur caractéristique  $f_{ij}$  (loi de Student avec fractile de 5%).

Determination of  $f_{ij}$  and  $E$

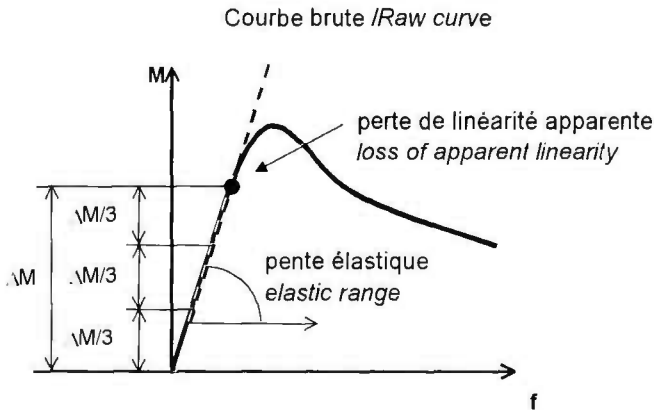
On the six raw curves of each set, locate visually the inflexions  $\Delta M$  and linearize the recordings corresponding to the interval  $\Delta M/3 ; 2\Delta M/3$  as defined in the following graph.

Each straight line thus obtained serves to calculate the modulus of elasticity  $E$  from the elastic-range slope. From these 6 values can be determined the characteristic value of the modulus (Student's law with 5% quantile).

By extending the straight sections beyond  $\Delta M$  the six moments  $M^*$  at which linearity is lost are found, and the following calculation can be carried out:

$$\frac{6 \cdot M^*}{l_p \cdot e^2}$$

These six values are used to determine the characteristic value  $f_{ij}$  (Student's law with 5% quantile).

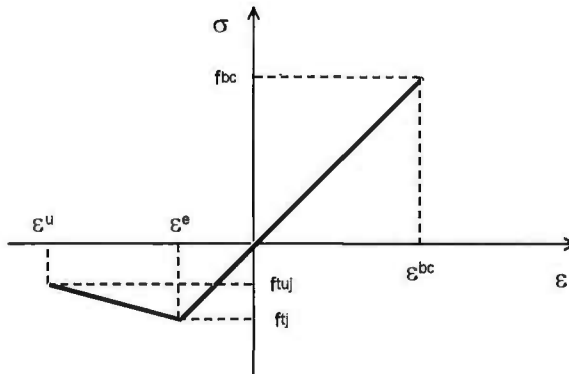


3. Méthode inverse

On fait l'hypothèse que la loi de comportement du BFUP peut être représentée par une courbe simplifiée du type :

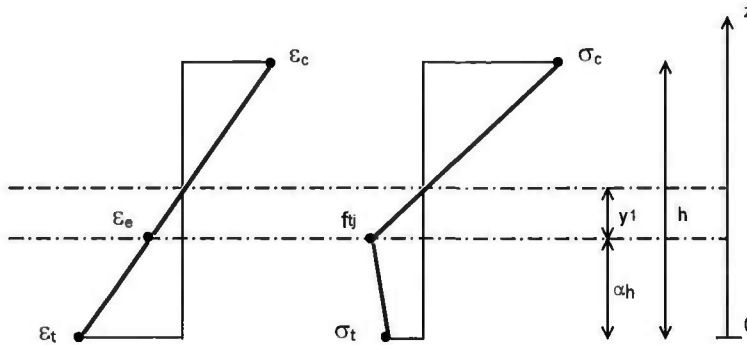
3. Back analysis method

It is assumed that the UHPFRC constitutive law can be represented by a simplified curve such as:



Les diagrammes des déformations et des contraintes dans une section fissurée fléchie, de hauteur h, sont :

The diagrams of deformation and stress in a bent cracked section of depth h are:



En notant  $\chi$  la courbure de la partie non fissurée, il vient :  $y_1 = \frac{-ft_j}{E \cdot \chi}$

With  $\chi$  being the curvature of the uncracked section we get:  $y_1 = \frac{-ft_j}{E \cdot \chi}$

Les contraintes sur les hauteur fissurée ( $\sigma_f$ ) et non fissurée ( $\sigma_b$ ) sont :

The stresses in the cracked depth ( $\sigma_f$ ) and uncracked depth ( $\sigma_b$ ) are:

$$\sigma_f(z) = ft_j + E \cdot \chi \cdot (z - \alpha h) \cdot \frac{ft_{uj} - ft_j}{E \cdot \epsilon_u - ft_j}$$

$$\sigma_b(z) = ft_j + E \cdot \chi \cdot (z - \alpha h)$$

En explicitant l'équilibre des efforts normaux dans la section fissurée, à partir des expressions des contraintes, il vient :

Detailing the balance of normal forces in the cracked section, using the stress expressions, we get:

$$\alpha(\chi) = \frac{1}{1-K} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\frac{2ft_j \cdot (K-1)}{E \cdot \chi \cdot h} + K} \right] \quad \text{avec} \quad K = \frac{ft_{uj} - ft_j}{E \cdot \epsilon_u - ft_j}$$

En procédant de la même façon pour l'équilibre des moments, on obtient :

$$Mr(\chi) = \frac{f_{tj} \cdot b \cdot h^2}{2} + \frac{E \cdot \chi \cdot b}{6} \cdot \left[ \alpha(\chi)^3 \cdot h^3 \cdot (1 - K) - 3\alpha(\chi) \cdot h^3 + 2h^3 \right]$$

Ainsi, pour une valeur donnée de la courbure  $\chi$ , le moment résistant de la section peut être calculé.

Application de la méthode inverse

Les données sont :

- $E$  module de déformation instantanée, d'où on déduit  $\varepsilon_x = f_{ix} / E$  ( $f_{ix}$  étant obtenue par des essais de compression) et  $\varepsilon_c = f_{ij} / E$
- $h$  hauteur du prisme
- $b$  largeur du prisme
- $f_{ij}$  résistance en traction de la matrice du BFCP ( $f_{ij} < 0$ )
- $\varepsilon_i = -10^{-3}$  ( $\varepsilon_i < 0$ )
- $M_{max}$  moment résistant obtenu par les essais de flexion

L'objectif est de déterminer la valeur de  $f_{tj}$  ( $f_{tj} < 0$ ), dernière inconnue de la loi de comportement. Pour ce faire, on procède à une itération sur  $f_{tj}$ .

Pour chaque valeur de  $f_{tj}$  on trace la courbe  $Mr(\chi)/\chi$  en faisant varier  $\chi$  de  $\chi_0$  jusqu'à la valeur de  $\chi$  qui engendre le moment maximum.

$$\chi_0 = \frac{-2f_{tj}}{E \cdot h}$$

$$Mr(\chi) = \frac{f_{tj} \cdot h \cdot h^2}{2} + \frac{E \cdot \chi \cdot h}{6} \cdot \left[ \alpha(\chi)^3 \cdot h^3 \cdot (1 - K) - 3\alpha(\chi) \cdot h^3 + 2h^3 \right]$$

$$\text{avec } \alpha(\chi) = \frac{1}{1 - K} \cdot \left[ 1 - \sqrt{\frac{2f_{tj} \cdot (K - 1)}{E \cdot \chi \cdot h} + K} \right] \quad \text{et } K = \frac{f_{tj} - f_{tj}}{E \cdot \varepsilon_u - f_{tj}}$$

L'itération sur  $f_{tj}$  est poursuivie jusqu'à obtenir un moment maximum égal à  $M_{max}$  des essais.

*Doing the same for the balance of moments we get:*

*Thus, the resistance moment of the section can be calculated for any value on curvature  $\chi$ .*

*Application of the back analysis method*

*The data is:*

- $E$  : instantaneous modulus of deformation, used to get  $\varepsilon_x = f_{ix} / E$  ( $f_{ix}$  being determined by compressive tests) and  $\varepsilon_c = f_{ij} / E$
- $h$  : prism height
- $b$  : prism breadth
- $f_{ij}$  : tensile strength of UHPFRC matrix ( $f_{ij} < 0$ )
- $\varepsilon_i = -10^{-3}$  ( $\varepsilon_i < 0$ )
- $M_{max}$  : resistance moment obtained from flexural testing.

*The objective is to determine the value of  $f_{tj}$  ( $f_{tj} > 0$ ), the last unknown of the constitutive law. To do this, iterations are carried out on  $f_{tj}$ .*

*For each  $f_{tj}$  value, plot the  $Mr(\chi)/\chi$  curve by varying  $\chi$  from  $\chi_0$  to the value of  $\chi$  corresponding to the maximum moment.*

*Iteration on  $f_{tj}$  is carried out until a maximum moment equal to the  $M_{max}$  of the tests is obtained.*

## ANNEXE 4

### Retrait - Fluage

Dans le cadre d'une thèse de doctorat, A.Loukili [1.23] a entrepris un travail de caractérisation et de compréhension des phénomènes différés dans les bétons à ultra haute performances. En complément, et dans le cadre du chantier Cattenom, d'autres essais ont été réalisés à la base technique des Sablons et au CEBTP [1.22] [1.23] [1.24] [1.25].

Il est important de distinguer le BPR avec et sans traitement thermique. En effet, les BPR sans traitement thermique exhibent un comportement similaire aux BHP, alors que le BPR traité thermiquement, ne présente quasiment pas de retrait et un faible fluage.

#### 1. Synthèse des résultats de Loukili

##### Retrait libre

Les conclusions du travail de thèse [1.23] sont les suivantes :

- après traitement thermique, le retrait propre est nul ;
- le retrait propre augmente avec E/L dans le domaine des très faibles E/L :  
 $E/L = 0,09 \quad \varepsilon_r = 250 \mu\text{m}/\text{m}$   
 $E/L = 0,15 \quad \varepsilon_r = 350 \mu\text{m}/\text{m}$
- le retrait total est de  $550 \mu\text{m}/\text{m}$  pour  
 $E/L = 0,17 - 0,20$

L'expression proposée pour la cinétique de retrait propre est :

$$\varepsilon_{re}(t) = A \exp\left[\frac{B}{\sqrt{t+C}}\right]$$

avec :  $A = 525$   
 $B = -2,5$   
 et  $C = -0,5$  [  $\varepsilon_{re}(\infty) = 525 \mu\text{m}/\text{m}$  ]

## ANNEX 4

### Shrinkage - Creep

*As part of the work for a Ph.D. thesis, A. Loukili [1.23] set out to characterize and understand delayed. Additionally, in connection with the Cattenom nuclear power plant project, other tests were carried out at the Les Sablons technical centre and at the Centre Expérimental de recherches et d'études du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP) [1.22] [1.23] [1.24] [1.25].*

*It is important to distinguish between BPR with and without heat treatment. Without heat treatment, BPR behaves in a manner similar to HPC, whereas when it has been heat treated it has practically no shrinkage and little creep.*

#### 1. Summary of Loukili's results

##### Free shrinkage

*The conclusions of the thesis research [1.23] are as follows :*

- *After heat treatment there is no autogenous shrinkage*
- *Autogenous shrinkage increases with w/c (water/cementitious materials):*  
 $w/c = 0,09 \quad \varepsilon_r = 250 \mu\text{m}/\text{m}$   
 $w/c = 0,15 \quad \varepsilon_r = 350 \mu\text{m}/\text{m}$
- *Total shrinkage is  $550 \mu\text{m}/\text{m}$  for*  
 $w/c = 0,17 - 0,20$

*The expression proposed for autogenous shrinkage is:*

$$\varepsilon_{re}(t) = A \exp\left[\frac{B}{\sqrt{t+C}}\right]$$

*with*  $A = 525$ ,  
 $B = -2,5$ ,  
 and  $C = -0,5$  [  $\varepsilon_{re}(\infty) = 525 \mu\text{m}/\text{m}$  ]



**Fluage**

Les conclusions de ce travail sont :

- après traitement thermique, le fluage est fortement réduit. La modélisation est présentée dans le chapitre 3 de cette annexe ;
- pour le BPR sans traitement thermique, la cinétique  $f(t - t_0)$  dépend de  $t_0$  alors que pour les BIIP,  $f$  ne dépend que de  $(t - t_0)$  ;
- le BPR ( $E/L_c = 0.17$ ) sans traitement thermique présente le comportement différé suivant :

Date de chargement (jours) <i>Date of loading (days)</i>	Fluage spécifique J à l'infini / <i>Specific creep at infinity J</i> ( $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$ )	$K_{\text{fl}}$
1	46.9	2.27
4	37.2	1.80
7	32.5	1.57
28	22.2	1.08

Nota :

J est le taux d'accroissement de la déformation de fluage pour une contrainte appliquée de 1 MPa, appelé fluage spécifique :  $J(t, t_0) = \epsilon_f(t) / \sigma_0$

$$K_{\text{fl}} = (\epsilon_{\text{totale}} - \epsilon_{\text{instantanée}}) / \epsilon_{\text{instantanée}} = E_{28} * J_x$$

Les courbes de fluage ont été modélisées. La figure 1 présente une comparaison entre courbes expérimentales et courbes numériques.

La cinétique du fluage propre spécifique a pour expression :

$$\epsilon_s = k(t_0) * f(t-t_0) + h(t_0)$$

avec :

$$k(t_0) = 19 * \exp \sqrt{\frac{0.1}{t_0 - 2.65}}$$

$$f(t - t_0) = \frac{\sqrt{t - t_0}}{\sqrt{3t_0 - 5}} \frac{\sqrt{t - t_0} + 1}{\sqrt{3t_0 - 5}}$$

**Creep**

The conclusions of this research are:

- After heat treatment, creep is much reduced. The model is presented in Chapter 3 of this Annex.
- For BPR without heat treatment, the evolution of  $f(t - t_0)$  depends on  $t_0$  where as for HPC,  $f$  depends only on  $(t - t_0)$ .
- BPR ( $w/c = 0.17$ ) without heat treatment has the following delayed behaviour:

NB:

J is the rate of increase in creep deformation for an applied stress of 1 MPa, called the specific creep:  $J(t, t_0) = \epsilon_f(t) / \sigma_0$

$$k_{\text{fl}} = (\epsilon_{\text{totale}} - \epsilon_{\text{instantanée}}) / \epsilon_{\text{instantanée}} = E_{28} * J_x$$

The creep curves have been modelled. Figure 1 compares experimental and numerical curves.

The expression for specific basic creep is:

$$\epsilon_s = k(t_0) * f(t-t_0) + h(t_0)$$

with:

$$h(t_0) = 18 * \exp \sqrt{\frac{0.2}{t_0 + 1.2}}$$

**MODELLING OF BASIC CREEP OTHER THAN SHRINKAGE AT 1 MPa**  
**MODELISATION DU FLUAGE PROPRE HORS RETRAIT SOUS 1 MPa**

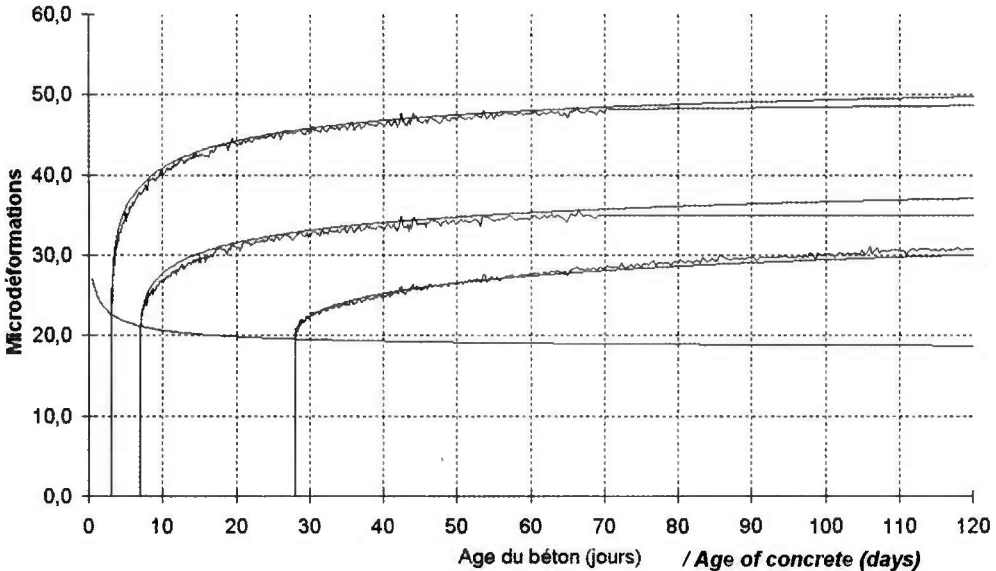


Figure 1 : Comparaison essai – modélisation numérique  
 Figure 1 : Comparison of testing and numerical modelling

**2. Comportement à long terme sous contrainte soutenue**

En utilisant le bâti de fluage mis au point par Loukili, on a procédé à la base technique des Sablons à un essai de fluage sous une charge élevée (supérieure à  $0,85 f_{c28}$ ).

La figure 2 présente le bâti d'essai de fluage. Il est composé d'un vérin hydraulique de 35 t connecté à un réservoir d'huile. Les éprouvettes sont des cylindres de 9 cm de diamètre et 60 cm de longueur. L'instrumentation est constituée par 3 capteurs de déplacement disposés sur 3 génératrices à  $120^\circ$ C.

On a mis en charge une éprouvette sous une contrainte initiale de 168 MPa.

Cette valeur a diminué dans le temps pour atteindre 157 MPa après 90 jours.

**2. Long-term behaviour under sustained strain**

The Sablons technical centre has used the creep test apparatus developed by Loukili to carry out a creep test under high load (more than  $0.85 f_{c28}$ ).

Figure 2 shows the creep test apparatus. It consists of a 35 tonne hydraulic cylinder connected to an oil reservoir. The test specimens are 60 cm long 9 cm diameter cylinders. The instrumentation consists of three displacement sensors located around the cylinder at  $120^\circ$  intervals.

A test specimen was loaded to an initial stress of 168 MPa.

This was gradually reduced to 157 MPa over a period of 90 days.

Le taux de chargement varie donc entre 0,93 et 0,87 fois la résistance caractéristique à la compression ( $f_{c28} = 180 \text{ MPa}$ ).

The loading ratio therefore varied from 0.93 to 0.87 of the characteristic compressive stress ( $f_{c28} = 180 \text{ MPa}$ ).

La figure 3 présente les enregistrements des 3 capteurs de déplacement ainsi que l'évolution de la contrainte dans le temps.

Figure 3 presents the recordings of the 3 displacement sensors and the evolution of stress over time.

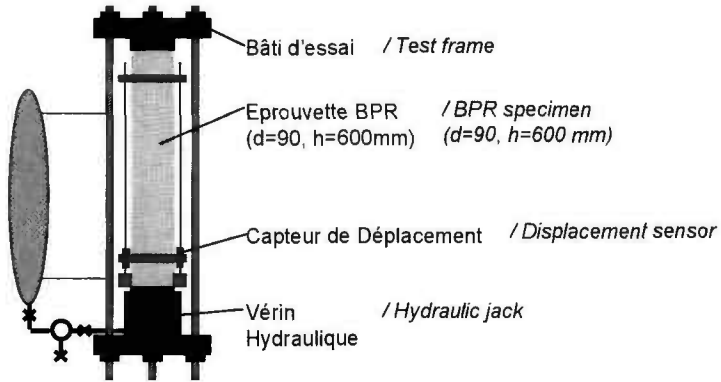


Figure 2 : Bâti d'essai de fluage  
Figure 2 : Creep test rig

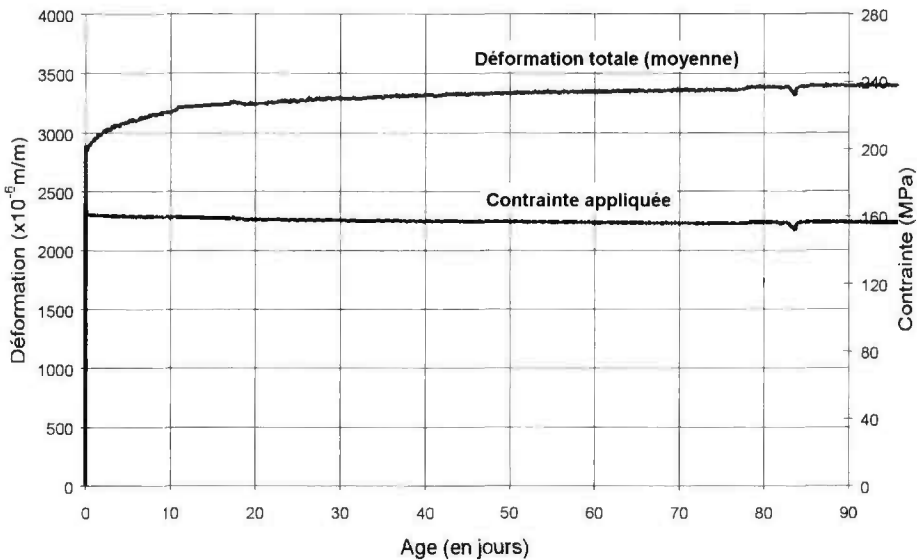


Figure 3 : Evolution de la déformation dans le temps  
Figure 3 : Evolution of strain over time

La figure 4 présente une comparaison essai-calcul dans laquelle la déformation totale est modélisée par la fonction :

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_1} [1 + K_{\beta} f(t - t_0)]$$

- $\varepsilon$  déformation totale
- $\sigma$  contrainte (168 MPa)
- $E_1$  module d'Young (58 000 MPa)
- $K_{\beta}$  coefficient de fluage (0,30)
- $t$  temps
- $f(t-t_0)$  fonction d'évolution

Nous prenons pour la fonction  $f$  l'expression générale donnée par Acker et al et identifiée par A.Loukili :

$$f(t - t_0) = \frac{(t - t_0)^{\alpha}}{(t - t_0)^{\alpha} + \beta}$$

où  $\alpha = 0,6$  et  $\beta = 10$  (pour du BPR traité thermiquement, voir Loukili, p127)

Figure 4 compares testing and calculation in which the total strain is modelled by the function:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_1} [1 + K_{\beta} f(t - t_0)]$$

- $\varepsilon$  Total strain
- $\sigma$  Stress (168 MPa)
- $E_1$  Modulus of elasticity (58,000 MPa)
- $K_{\beta}$  Creep coefficient (0.30)
- $t$  Time
- $f(t-t_0)$  Evolution function

Function  $f$  is taken as the general expression given by Acker et al and validated by A. Loukili:

$$f(t - t_0) = \frac{(t - t_0)^{\alpha}}{(t - t_0)^{\alpha} + \beta}$$

where  $\alpha = 0.6$  and  $\beta = 10$  (for heat-treated BPR, cf. Loukili, p127).

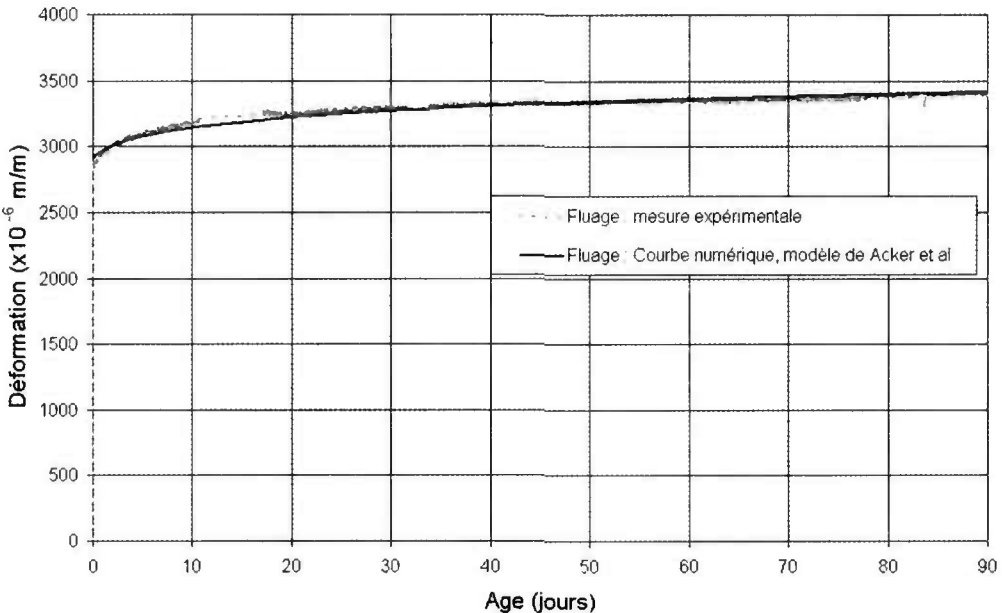


Figure 4 : Comparaison courbe expérimentale – courbe numérique  
*Figure 4 : Comparison of test curve and numerical curve*

On constate que la modélisation numérique de cet essai à partir de fonctions identifiées par A.Loukili permet de rendre compte correctement du comportement expérimental.

Par ailleurs, cet essai a permis de vérifier la tenue dans le temps du matériau sous de fortes charges et s'assurer du caractère sécuritaire de la prise ne compte de l'effet de charge soutenue par l'extrapolation du coefficient 0,85 du BAEL.

### 3. Chantier Cattenom

Dans le cadre du chantier Cattenom trois essais de fluage ont été réalisés. Deux essais ont été réalisés sur des éprouvettes confectionnées avec du BPR sans traitement thermique ; une des éprouvettes était protégée, l'autre non. La contrainte appliquée était de 16 MPa.

La troisième éprouvette, fabriquée avec du BPR traité thermiquement, a été testée sous une charge de 36 MPa. Cette éprouvette a été protégée lors de l'essai contre les échanges hydriques avec l'extérieur.

La figure 5 présente la déformation totale mesurée ainsi que la courbe numérique en utilisant la fonction  $f$  donnée en 1. et les valeurs numériques suivantes :

$$\begin{aligned}\sigma &= 36 \text{ MPa} \\ E_i &= 56000 \text{ MPa} \\ K_{fl} &= 0,25\end{aligned}$$

*It can be seen that numerical modelling of this test using the functions identified by A. Loukili faithfully reproduces the behaviour observed by physical testing.*

*In addition, this test proved the material's durability under high loading and gave reassurance regarding the 0.85 reduction factor of the BAEL rules.*

### 3. Cattenom project

*Three creep tests were carried out in connection with the Cattenom project. Two tests were carried out on specimens made with BPR reactive power concrete without heat treatment. One of these was protected from water exchange with the external environment, one not. The stress applied was 16 MPa.*

*The third specimen, made with heat-treated BPR, was tested under a load of 36 MPa. It was protected as above.*

*Figure 5 presents the total measured strain and the numerical curve using the  $f$  function given in [1]:*

$$\begin{aligned}\sigma &= 36 \text{ MPa} \\ E_i &= 56,000 \text{ MPa} \\ K_{fl} &= 0.25\end{aligned}$$

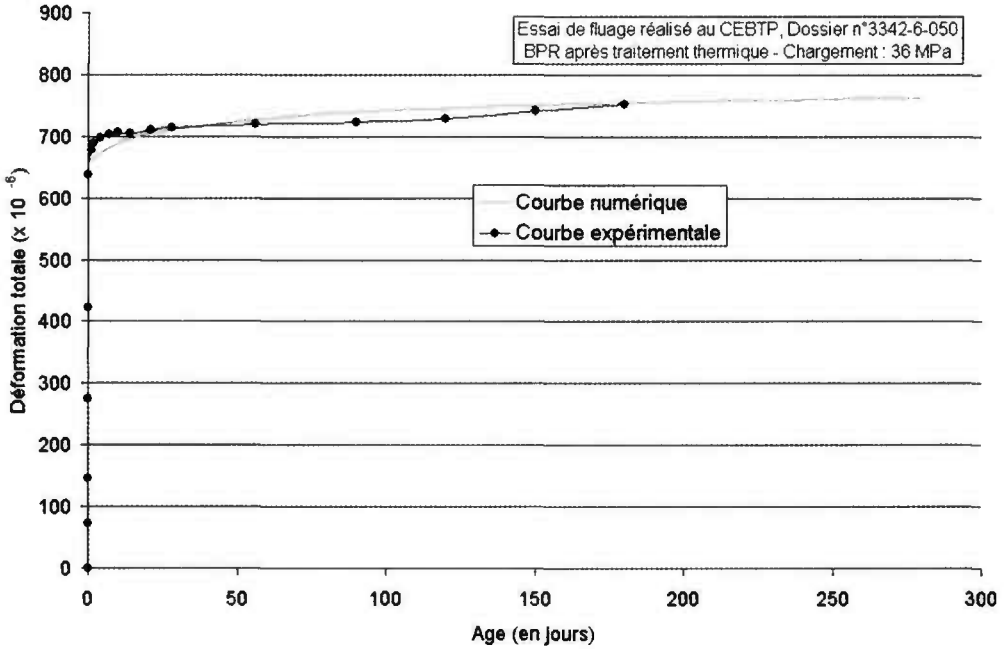


Figure 5 : Essai CEBTP : Comparaison courbe expérimentale – courbe numérique  
 Figure 5 : CEBTP test : Comparison of test curve and numerical curve

**4. Conclusions**

**Retrait**

Après traitement thermique, le retrait est nul.  
 Le retrait propre du BPR sans traitement thermique a pour expression :

$$\varepsilon_{re}(t) = 525 \exp \left[ \frac{-2,5}{\sqrt{t - 0,5}} \right]$$

**Fluage**

Après traitement thermique l'expression de la déformation totale est :

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_1} \left[ 1 + K_{fl} f(t - t_0) \right]$$

avec  $K_{fl} = 0,30$  et

$$f(t - t_0) = \frac{(t - t_0)^{0,6}}{(t - t_0)^{0,6} + 10}$$

**4. Conclusion**

**Shrinkage**

There is no shrinkage after heat treatment.  
 The autogenous shrinkage (re) of BPR without heat treatment is expressed as follows:

$$\varepsilon_{re}(t) = 525 \exp \left[ \frac{-2,5}{\sqrt{t - 0,5}} \right]$$

**Creep**

Total strain after heat treatment is expressed as follows:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_1} \left[ 1 + K_{fl} f(t - t_0) \right]$$

with  $K_{fl} = 0.30$  and

$$f(t - t_0) = \frac{(t - t_0)^{0,6}}{(t - t_0)^{0,6} + 10}$$

Les courbes de fluage propre spécifique du BPR sans traitement thermique sont données sur la figure 6.

The specific basic creep curves for BPR without heat treatment are given in Figure 6.

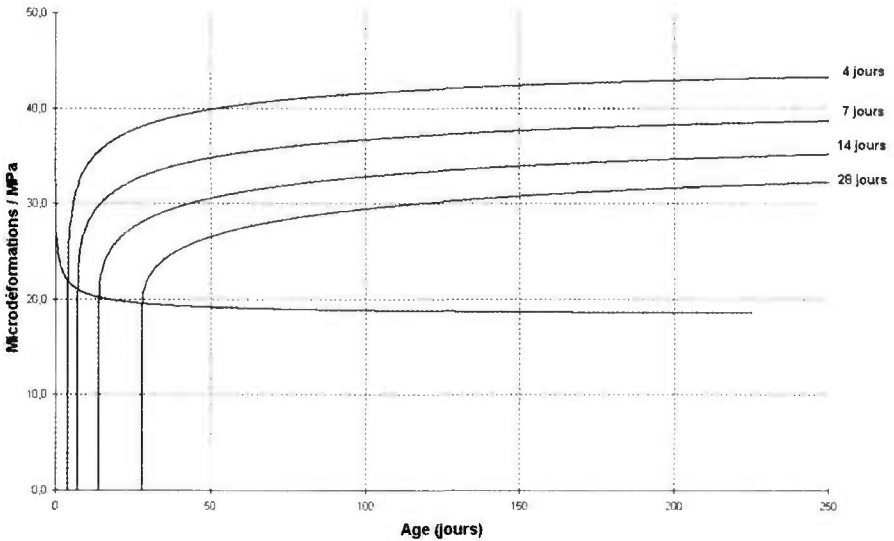


Figure 6 : Fluage propre spécifique du BPR 200 sans traitement thermique  
 Figure 6 : Specific basic creep of BPR 200 without heat treatment

Le fluage propre spécifique a pour expression :

The expression for specific basic creep is as follows:

$$\varepsilon_s = k(t_0) * f(t-t_0) + h(t_0)$$

$$\varepsilon_s = k(t_0) * f(t-t_0) + h(t_0)$$

with:

avec :

$$k(t_0) = 19 * \exp \sqrt{\frac{0.1}{t_0 - 2.65}}$$

$$f(t - t_0) = \frac{\sqrt{\frac{t - t_0}{3t_0 - 5}}}{\sqrt{\frac{t - t_0}{3t_0 - 5}} + 1}$$

$$h(t_0) = 18 * \exp \sqrt{\frac{0.2}{t_0 + 1.2}}$$

**ANNEXE 5**

**ANNEX 5**

**Résistance aux chocs des BFUP**

***UHPFRC impact strength***

**Quelques données sur le comportement au choc des BFUP (caractérisation en traction à différentes vitesses) en vue d'une application à des conteneurs (d'après [1.37])**

***Data on the impact performance of UHPFRC (characterization of tensile strength at different pace rates) with a view to application for special containers (from [1.37])***

Courbes issues de caractérisation en traction directe de BPR, à vitesse lente et rapide :

*Curves from axial tensile strength test characterization of UHPFRC at fast and slow pace rates:*

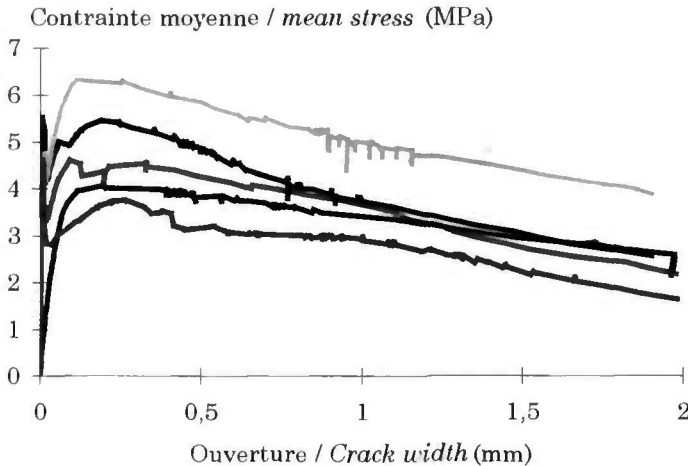


Figure 1. a) Essais sur éprouvettes entaillées. Vitesse d'ouverture 0,15  $\mu\text{m/s}$ . Éprouvettes de la direction A. Faible efficacité des fibres. D'après Réf. [1.37].

*Figure 1.a): Tests on notched specimens. Crack-opening speed of 0.15  $\mu\text{m/s}$ . Specimens from direction A. Little fibre efficiency. From Ref. [1.37].*



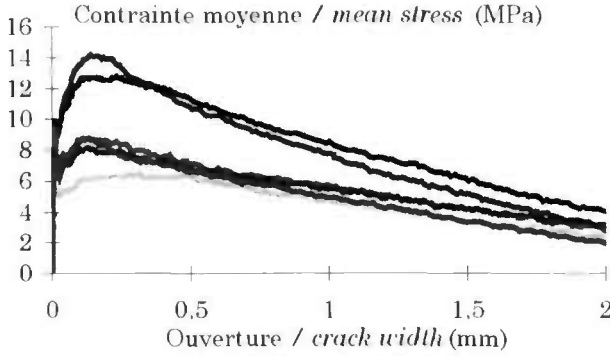


Figure 1. b) Essais sur éprouvettes entaillées. Vitesse d'ouverture moyenne 3.2 m/s. Éprouvettes de la direction A. Faible efficacité des fibres. D'après Réf. [1.37].

Figure 1. b) Tests on notched specimens. Mean crack-opening speed of 3.2 m/s. Specimens from direction A. Little fibre efficiency. From Ref. [1.37].

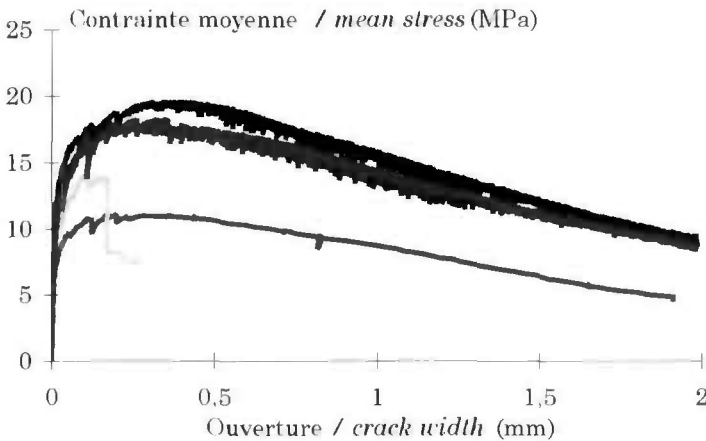


Figure 2. a) Essais sur éprouvettes entaillées. Vitesse d'ouverture 0.15 µm/s. Éprouvettes de la direction C. Forte efficacité des fibres. D'après Réf. [1.37].

Figure 2. a) Tests on notched specimens. Crack-opening speed of 0.15 µm/s. Specimens from direction C. High fibre efficiency. From Ref. [1.37].

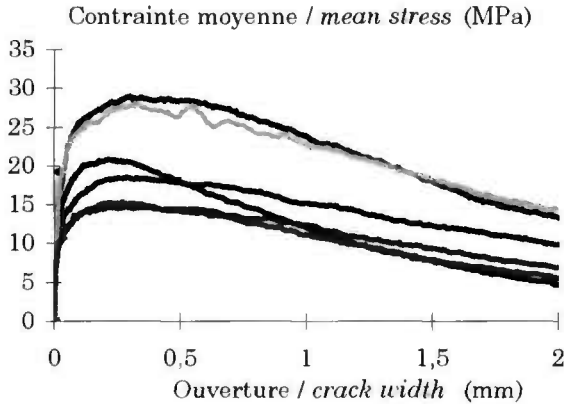


Figure 2. b) Essais sur éprouvettes entaillées. Vitesse d'ouverture moyenne 2,8 m/s. Éprouvettes de la direction C. Forte efficacité des fibres. D'après Réf. [1.37].

Figure 2. b) Tests on notched specimens. Mean crack-opening speed of 2.8 m/s. Specimens from direction C. High fibre efficiency. From Ref. [1.37].

Grandeur / Quantity	Direction	Valeur quasi-statique (interpolation pour 0,05 MPa / s) et écart-type Quasi-static value ((interpolation for 0.05 MPa/s) and standard deviation	Tendance d'évolution avec la vitesse Trend for change with speed
Module d'Young Modulus of elasticity	A	50.9 GPa (2 GPa)	+0.32 GPa / u. log.
	C	53.9 GPa (2.5 GPa)	+0.38 GPa / u. log.
	A + B + C	52.2 GPa	+0.31 GPa / u. log.
Contrainte maxi (éprouvettes non entaillées) Max stress (un-notched specimens)	A	5.96 MPa (2 MPa)	+0.82 MPa / u. log.
	C	11.17 MPa (3 MPa)	+0.77 MPa / u. log.
	A + B + C	8.52 MPa	+0.65 MPa / u. log.
Contrainte maxi (éprouvettes entaillées) Max stress (notched specimens)	A	4.29 MPa (2 MPa)	+0.70 MPa / u. log.
	C	16.35 MPa (5 MPa)	+0.73 MPa / u. log.
	A + B + C	9.65 MPa	+0.40 MPa / u. log.
Contrainte seuil équivalente (ouverture 1 mm) Equivalent stress (for 1 mm wide crack)	A	3.75 MPa (1.6 MPa)	+0.53 MPa / u. log.
	C	13.99 MPa (3.8 MPa)	+0.62 MPa / u. log.
	A + B + C	8.06 MPa	+0.45 MPa / u. log.

**Tableau 1.** Caractérisation en traction du BPR et effets de vitesse. Résultats (moyennes). A, B et C sont les trois directions perpendiculaires des prélèvements dans une pièce en L jugée représentative pour le projet (figure 3). D'après Réf [1.37].

**Table 1.** Characterization of BPR tensile performance and speed effects. Results (mean values). A, B, and C are the three orthogonal directions of specimens taken from an L-shaped unit deemed to be representative of the project (Figure 3). From Ref [1.37].

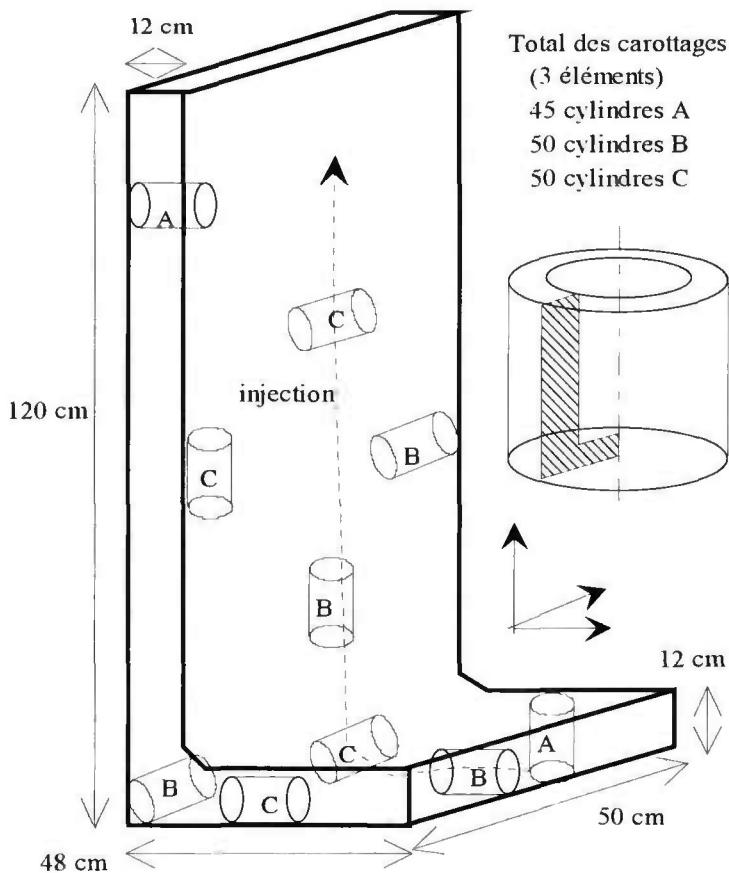


Figure 3 : Schéma de prélèvement des éprouvettes caractérisées en traction directe à différentes vitesses pour déterminer les paramètres décrivant le comportement au choc du matériau BFUP, dans une structure prototype de conteneur. D'après Réf. [1.37].

Figure 3 : Diagram showing sampling of specimens characterized by direct tensile strength testing at different pace rates to determine the parameters defining the impact performance of UHPFRC for a prototype container structure. From Ref. [1.37].

Core samples taken from 3 elements - 45 type A, 50 type B, 50 type C

## ANNEXE 6

### Essais exigés dans le cadre des épreuves d'étude de la centrale de Cattenom

Ces tableaux sont issus de la pratique des bétons HP et nécessitent une simplification eu égard au nombre de constituants des BFUP. Pour le chantier de CATTENOM cette méthode a été utilisée afin de disposer d'éléments de comparaison avec les autres BHP.

Une autre approche consiste à faire les essais dont les paramètres sont les plus défavorables ou une combinaison de certains d'entre eux.

Cette approche a été utilisée pour les pré-mélangés à sec (tableau 2).

## ANNEX 6

### *Tests required as design testing for the Cattenom nuclear power plant project*

*The following tables are taken from practice with HP concrete and need to be simplified to take account of the number of ingredients in UHPFRC. For the Cattenom project, this method was used to provide data that compared with other HPCs.*

*Another approach involves carrying out the tests whose parameters are the most critical, or a combination of some of those parameters.*

*This approach was used for the dry premixed concrete mixes (Table 2).*

ESSAIS	NORME	Base	Ciment - 25kg	Ciment + 25kg	Sable - 4%	Sable + 4%	A(6) - 4%	A(6) + 4%	Fumées de silice - 10kg	Fumées de silice + 10kg	Dosage en eau - 4%	Dosage en eau + 4%	Fluid - 4%	Fluid + 4%	Fibres - 10 kg	Fibres + 10 kg
Plasticité	(1)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
D.P.U	NF P 18451	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Rc avant et après T.T	NF P 18406	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Traction avant et après T.T	(2)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Traction directe avant et après T.T	(3)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Module d'Young avant et après 28 j		X														
Densité - Porosité à 105°C		X									X					
Absorption capillaire	NF P 18353	X														
Perméabilité à l'air		X									X					
Coefficient de dilatation thermique		X														
Carbonatation accélérée( 28 et 90j)		X								X	X	X				
Essai Gel Dégel		X														
Retrait - séchage	NF P 15433	X									X	X				
Fluage propre et de dessiccation	(5)	X														
Mesure directe de la chaux libre et pH à coeur		X							X							

Tableau 1 : BFUP avec fumées de silice non incorporées au ciment.  
Epreuve d'étude des BFUP fabriqués avec constituants séparés en centrale à béton



TESTS	Standard	Nominal	Cement - 25kg + 25kg	Sand - 4% + 4%	Addi- tions (6) - 4% + 4%	Addi- tions (6) - 4% + 4%	Silica fume - 10kg + 10kg	Silica fume - 4% + 4%	Water content - 4% + 4%	Super- plast. - 4% + 4%	Super- plast. - 4% + 4%	Fibres - 10 kg + 10 kg	Fibres + 10 kg
Plasticity	(1)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Practical working life	NF P 18451	X						X	X				X
Re before and after H.T.	NF P 18406	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Flex. tensile strength before and after H.T.	(2)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
direct tensile strength before and after H.T.	(3)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Modulus of elasticity before and after 28 days		X											
Density - Voids ratio at 105°C		X							X				
Capillary absorption	NF P 18353	X							X				
Air permeability		X							X				
Thermal expansion coefficient		X										X	
accelerated carbonation ( 28 & 90 days)		X										X	
Freeze / thaw test		X											
Shrinkage - drying	NF P 15433	X										X	
Basic creep & drying creep	(5)	X											
Direct measurement of free lime and internal pH		X										X	

Table 1 : UHPFRC with silica fume not incorporated in the cement.  
Design study of UHPFRC made with separate ingredients in a batching plant

**138 - Recommandations provisoires**

ESSAIS	NORME	Base	Nombre d'éprouvettes par gâchées	Dosage en eau + 10 litre	Nominale - 2% liquide + 2% solide	Nominale + 2% liquide - 2% solide	Nombre d'éprouvettes par gâchées
			Pour 3 gâchées				Pour 2 gâchées
Plasticité	(1)	X	1	X	X	X	1
DPU	NF P 18451	X	1	X	X	X	1
Rc avant et après traitement thermique	NF P 18406	X	3	X	X	X	3
Traction avant et après traitement thermique	(2)	X	3	X	X	X	3
Traction directe avant et après traitement thermique	(3)	X	3	X	X	X	3
Module d'Young avant et après 28j		X	3				3
Densité - Porosité à 105°C		X	1	X			1
Absorption capillaire	NF P 18353	X	1				1
Perméabilité à l'air		X	1	X		X	1
Coefficient de dilatation thermique		X	2				2
Carbonatation accélérée (28 et 90j)		X	2	X		X	2
Essai Gel Dégel		X	2				2
Retrait - séchage	NF P 15433	X	1	X			1
Fluage propre et de dessiccation	(5)	X	2				2
Mesure directe de la chaux libre et pH à cœur		X	1				1

**Tableau 2 : BFUP avec fumées de silice non incorporées au ciment  
Epreuve d'étude des BFUP fabriqués en pré-mélange à sec**



TEST	STRANDARD	Nominal	Number of specimens per batch	Water content + 10 litre	Nominal MD - 2% liquids + 2% solids	Nominal MD + 2% liquids - 2% solids	Number of specimens per batch
			For 3 batches				For 2 batches
Plasticity	(1)	X	1	X	X	X	1
Practical working life	NFP 18451	X	1	X	X	X	1
Rc before and after heat treatment	NFP 18406	X	3	X	X	X	3
Tensile strength before and after H.T.	(2)	X	3	X	X	X	3
Direct tensile strength before and after H.T.	(3)	X	3	X	X	X	3
Modulus of elast. before and after 28 days		X	3				3
Density - Voids ratio at 105°C		X	1	X			1
Capillary absorption	NFP 18353	X	1				1
Air permeability		X	1	X		X	1
Thermal expansion coefficient		X	2				2
Accelerated carbonation (28 & 90 days)		X	2	X		X	2
Freeze / thaw test		X	2				2
Shrinkage - drying	NFP 15433	X	1	X			1
Basic creep and drying creep	(5)	X	2				2
Direct measurement of free lime and internal pH		X	1				1

Table 2 : UHPFRC with silica fume not incorporated in cement  
Design test for UHPFRC made from pre-mixed dry ingredients



ESSAIS TESTS	NORME STANDARD	Base Nominal
Plasticité / <i>Plasticity</i>	(1)	X
D.P.U / <i>Practical working life</i>	NF P 18451	X
Re avant et après traitement thermique <i>Re before and after heat treatment</i>	NF P 18406	
Traction avant et après traitement thermique <i>Tensile strength before and after heat treatment</i>	(2)	X
Traction directe avant et après traitement thermique <i>Direct tensile strength before and after heat treatment</i>	(3)	X
Module d'Young avant et après 28 j <i>Modulus of elasticity before and after 28 days</i>		X
Densité – Porosité à 105°C <i>Density – Voids ratio at 105°C</i>		X
Essai Gel Dégel <i>Freeze / thaw test</i>		X

Tableau 3 : BFUP avec fumées de silice non incorporées au ciment  
Epreuve de convenance  
*Table 3 : UHPFRC with silica fume not incorporated in cement  
Suitability test*

- (1) Essai selon ASTM C 230 – DIN XPP 18-585 – EN 459-2 – ISO 2768-1  
*Tests as per ASTM C 230 - DIN XPP 18-585 - EN 459-2 - ISO 2768-1*
- (2) Essais sur la formule de base par flexion selon la norme NFP EN 196-I sur barreau de 4x4x16 et selon la norme NFP 18-409 sur 7x7x28 ; essais par flexion pour les formules dérivées selon la norme ciment  
*Tests on the nominal mix design by bending as per Standard NF P EN 196-I with 4x4x16 bar and as per standard NF P 18-409 with 7x7x28 bar; flexural tests for derivative mix designs as per cement standard*
- (3) Essai de traction directe  
*Direct tensile test*
- (5) Selon mode opératoire  
*As per procedure*
- (6) Additions hors fumées de silice  
*Additions other than silica fume*

**ANNEXE 7**

**Caractéristiques indicatives de quelques BFUP**

**ANNEX 7**

**Characteristics of some UHPFRC mixes**

CARACTERISTIQUES	Ductal®	BSI	1463F (EDF)	ESSAIS
Résistance caractéristique à la compression à 28 j	200 MPa (après TT)	180 MPa	147 MPa	$\Phi \geq 5 L_f$ ou $\Phi \geq 6 D_{max}$
Résistance caractéristique à la traction directe à 28 j (pic)	9 MPa (avec entaille)	9,1 MPa (sans entaille)	en cours	$\Phi = 70 \text{ mm}$
Traction par flexion sur prisme	42 MPa	45 MPa	20 MPa	Prisme 4 X 4 X 16
$\sigma_{bt}$ (w = 0,3 mm) moyenne	12 MPa	7,9 MPa	en cours	Mode opératoire AFREM = Courbe
Module d'élasticité E	58 GPa	65 GPa	57 GPa	Essai sur prisme
Module dynamique Ed (0.5 mm, 1 à 10 Hz)	60 GPa	60,1 GPa	56,5 GPa	
Module de cisaillement G	24 GPa	25 GPa	24 GPa	
Coefficient de Poisson	0,2	0,2	0,183	Mode opératoire Norme NF
Coefficient de dilatation thermique	11,8 $\mu\text{m} / \text{m} / ^\circ\text{C}$	10,4 $\mu\text{m} / \text{m} / ^\circ\text{C}$		
Retrait total	550 $\mu\text{m} / \text{m}$	570 $\mu\text{m} / \text{m}$		NF-P 15 - 433
Fluage propre et de dessiccation	$K_{fl} = 0,3$ après TT $K_{fl} = 1,0$ sans TT	$K_{fl} = 0,8$ sans TT		Mode opératoire LCPC/RILEM
Porosité	1,9 %			
Absorption	0,06 g / cm <sup>2</sup>	0,22 g / cm <sup>2</sup>		
Perméabilité à l'air	< 10 <sup>-20</sup> m <sup>2</sup>			
Essai de Gel – Dégel	0 %	2,8 %		
Flow Test	550 mm	640 mm		

CARACTERISTIQUES	Ductal®	BSI	1463F (EDF)	TESTS
28-day characteristic compressive strength	200 MPa (after H.T.)	180 MPa	147 MPa	$\Phi \geq 5 L_f$ ou $\Phi \geq 6 D_{max}$
28-day characteristic direct tensile strength (peak)	9 MPa (notched sample)	9.1 MPa (without notch)	In progress	$\Phi = 70 \text{ mm}$
Flexural tensile strength on prism	42 MPa	45 MPa	20 MPa	Prism 4 X 4 X 16
$\sigma_{bt}$ ( $w = 0.3 \text{ mm}$ ) mean	12 MPa	7.9 MPa	In progress	AFREM procedure = Curve
Modulus of elasticity E	58 GPa	65 GPa	57 GPa	Test on prism
Dynamic modulus of elasticity $E_d$ (0.5 mm, 1 to 10 Hz)	60 GPa	60.1 GPa	56.5 GPa	
Shear modulus G	24 GPa	25 GPa	24 GPa	
Poisson's ratio	0.2	0.2	0.183	NF standards procedure
Thermal expansion coefficient	11.8 $\mu\text{m} / \text{m}/^\circ\text{C}$	10.4 $\mu\text{m} / \text{m}/^\circ\text{C}$		
Total shrinkage	550 $\mu\text{m} / \text{m}$	570 $\mu\text{m} / \text{m}$		NF-P 15 - 433
Basic creep and drying creep	$K_{\beta} = 0.3$ after HT $K_{\beta} = 1.0$ without HT	$K_{\beta} = 0.8$ without HT		LCPC/RILEM procedure
Voids ratio	1.9 %			
Absorption	0.06 g / cm <sup>2</sup>	0.22 g / cm <sup>2</sup>		
Air permeability	< 10 <sup>-20</sup> m <sup>2</sup>			
Freeze-thaw test	0 %	2.8 %		
Flow Test	550 mm	640 mm		

Les valeurs données ci-avant sont des valeurs indicatives proposées par les fournisseurs de BFUP. Elles sont tirées d'un dossier technique disponible auprès de ces mêmes fournisseurs.

The values given in the above table are guideline values given by UHPFRC suppliers. They are taken from technical data available from those suppliers.

## ANNEXE 8

### Proposition de coefficients de passage "K" applicables aux BFUP : l'expérience de Bourg-lès-Valence

Préalablement au démarrage de la préfabrication des poutres des ouvrages de Bourg-lès-Valence, un élément témoin a été réalisé. Il s'agit d'une poutre de 5m, de section identique à celle retenue pour le projet.

Des éprouvettes 11x11x40 ont été prélevées dans cette poutre, à différents endroits et selon différentes inclinaisons, afin d'étudier l'influence conjuguée du coffrage et du bétonnage sur la distribution des fibres.

Cinq séries ont ainsi été réalisées :

Série <i>Set</i>	Emplacement <i>Location</i>	Direction du sciage <i>Direction of cut</i>	Nombre de prismes <i>No. of prisms</i>
A	âme / <i>web</i>	inclinée à 45°	10
B	Ame / <i>web</i>	verticale	10
C	Ame / <i>web</i>	horizontale	9
D	Table / <i>flange</i>	transversale	10
E	Table / <i>flange</i>	longitudinale	10

Les éprouvettes ont été testées à l'ENTPE, en flexion 3 points (portée 36 cm). Une entaille de 10 mm de profondeur et 2 mm d'épaisseur a été réalisée au centre de chaque prisme, sur sa face inférieure (pour les familles D et E il s'agit de la face opposée à la surface libre de bétonnage, pour les autres il s'agit de l'une des deux faces non coffrées).

## ANNEX 8

### Proposed design safety factors for UHPFRC: the experience of Bourg-lès-Valence

*Before casting of the beams for the Bourg-lès-Valence bridges started, a trial beam was made. This 5 m long beam was identical in cross-section to the beams designed for the bridges.*

*Specimens measuring 11x11x40 were taken from different locations and at different angles in this beam in order to study the combined effect of form walls and concrete placement on the distribution of fibres.*

*Five sets of specimens were taken:*

*The specimens were tested in centre-point bending (span of 36 cm) at the Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE). A 10 mm deep, 2 mm wide notch was cut at the centre of each specimen, on its bottom face (for sets D and E this is the face opposite the concreting top surface; for the others it is one of the unshuttered faces).*

Résultats expérimentaux bruts

Les coefficients K recherchés, sont à appliquer à une loi de comportement caractéristique obtenue par analyse inverse d'essais de flexion. On se propose donc de déterminer ces coefficients par une analyse des grandeurs moyennes issues des résultats expérimentaux précédents, évitant ainsi une redondance statistique.

Après analyse des résultats obtenus aux pics des courbes Effort / Ouverture de fissure, enregistrées au cours des essais selon la procédure de l'annexe 3, on obtient les valeurs suivantes :

Raw test data

The K factors sought are to be applied to a characteristic constitutive law obtained by back analysis of flexural tests. It is therefore proposed to determine the safety factors by analyzing mean values from previous test results, thus avoiding statistical redundancy.

After analysis of the results recorded at the peaks of force / crack width curves, the following values are obtained:

Série / Set	Contrainte équivalente à la rupture Equivalent stress at fracture (MPa)
A	23.4
B	28.9
C	19.3
D	18.6
E	22.9

Analyse des résultats

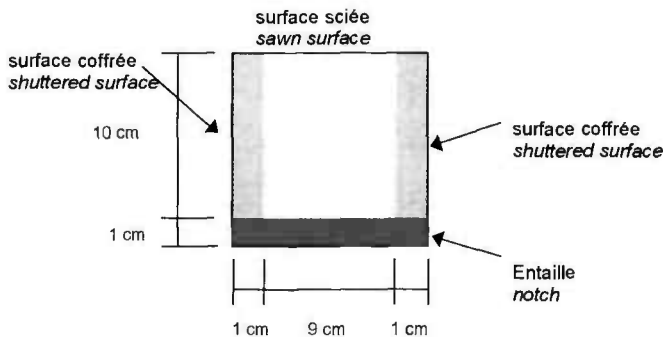
Les dispositions relatives aux cinq séries étant différentes (faces sciées, coffrées, libres), il est impossible de comparer les résultats expérimentaux bruts entre eux. Il convient de les analyser afin d'en déduire des grandeurs supposées intrinsèques.

Analysis of results

Since the modalities for the five sets (sawn faces, shuttered faces, free faces) are different, it is impossible to compare all the raw test data. The data has to be analyzed to determine the assumed intrinsic values.

Séries A, B et C :

Sets A, B, and C:



Les fibres utilisées ayant une longueur de 20mm, une zone perturbée de 10mm est considérée de chaque côté de la section (effet de paroi).

Since the fibres used are 20 mm long, a 10 mm deep zone of disturbance is taken into account on each side of the cross-section.

Les fibres présentes dans la partie centrale d'un prisme ne sont pas perturbées par le coffrage. On suppose qu'elle présentent une distribution 3D isotrope et le facteur d'orientation vaut  $\alpha = 0,405$  dans cette zone [1.7].

The fibres in the inner part of a prism are not disturbed by the formwork. They are assumed to be distributed isotropically in 3D, and the orientation factor in the inner area is  $\alpha = 0.405$  [1.7].

Les fibres situées dans les bandes verticales subissent l'effet des parois. Celles situées contre la paroi présentent une orientation 2D ( $\alpha = 0,637$ ) et celles situées à  $L_f/2$  une orientation 3D ( $\alpha = 0,405$ ). L'évolution du facteur d'orientation dans l'épaisseur des bandes verticales, est décrite ci-dessous.

The fibres in the vertical bands at the sides are affected by the formwork. Those against the form are oriented in 2D ( $\alpha = 0.637$ ) and those at a distance of  $L_f/2$  are oriented in 3D ( $\alpha = 0.405$ ). The evolution of fibre orientation in the vertical bands is described below.

La valeur moyenne  $\alpha = 0,587$  sur les bandes de largeur  $L_f/2$  est retenue pour la suite de cette étude.

The mean value of  $\alpha = 0.587$  in the bands ( $L_f/2$  wide) is used in what follows.

A partir des valeurs du facteur d'orientation, on détermine le facteur d'orientation moyen sur l'ensemble de la section d'un prisme :

The orientation factors are used to determine the mean orientation factor for the entire cross-section of a prism:

$$\alpha_{\text{moyen}} = (0,405 \times 9 + 0,587 \times 2)/11 = 0,438$$

$$\alpha_{\text{mean}} = (0.405 \times 9 + 0.587 \times 2)/11 = 0.438$$

Le coefficient à appliquer aux résultats bruts, permettant de supprimer l'effet des parois est donc :

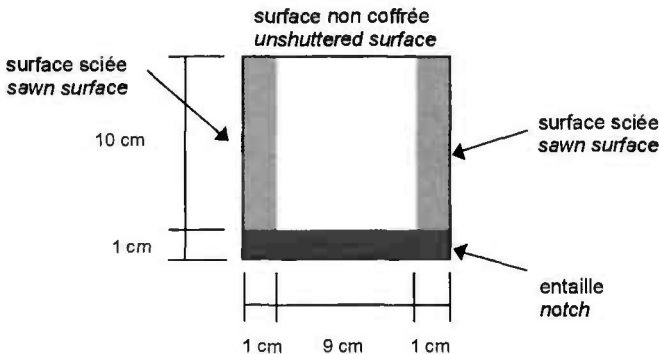
The factor to be applied to the raw results to overcome the effect of sidewalls is therefore:

$$\gamma = 0,438/0,405 = 1,082$$

$$\gamma = 0.438/0.405 = 1.082$$

Séries D et E :

Sets D and E:



Les fibres utilisées ayant une longueur de 20mm, une zone perturbée de 10mm est considérée de chaque côté de la section.

Les fibres présentes dans la partie centrale d'un prisme ne sont pas perturbées par le sciage. On suppose qu'elle présentent une distribution 3D isotrope.

Les fibres situées sur une bande de largeur 10mm de chaque côté de la section, présentent également une distribution isotrope 3D, mais leur longueur a été réduite par l'effet du sciage. On considère alors qu'une fibre dont le centre de gravité se trouve sur la paroi sciée, n'est plus ancrée. Cet ancrage ne redevient pleinement efficace que pour les fibres dont le centre de gravité est à  $Lf/2 = 10$  mm de la paroi.

Dans l'intervalle  $[0 ; Lf/2]$ , on suppose donc une efficacité des fibres de 50%. On définit ainsi un coefficient d'efficacité moyen sur l'ensemble de la section, donné par :

$$\lambda = (0.5 \times 2 + 1 \times 9) / 11 = 0.91$$

Bilan

Les résultats (contraintes équivalentes à la rupture exprimées en MPa) sont résumés dans le tableau ci-dessous :

*Since the fibres used are 20 mm long, a 10 mm deep zone of disturbance is taken into account on each side of the cross-section.*

*The fibres in the inner part of a prism are not disturbed by the formwork. They are assumed to be distributed isotropically in 3D.*

*The fibres in a 10 mm deep band on each side of the section are also distributed isotropically in 3D, but their length has been reduced by sawing. It is therefore considered that a fibre whose centre of gravity is on the sawn face is no longer anchored. Anchoring becomes fully effective only for fibres whose centre of gravity is at  $Lf/2 = 10$  mm from the face.*

*In the intervening area  $[0 ; Lf/2]$ , it is assumed that the fibres are 50% effective. From this is defined a mean efficiency factor for the entire cross-section. It is given by:*

$$\lambda = (0.5 \times 2 + 1 \times 9) / 11 = 0.91$$

*Outcome*

*The results (equivalent stress at fracture, in MPa) are summarized in the following table:*

Série <i>Set</i>	Résultat brut <i>Raw result</i>	Coefficient	Résultat intrinsèque <i>Intrinsic result</i>
A	23.43	1/1.082	<b>21.65</b>
B	28.88	1/1.082	<b>26.69</b>
C	19.26	1/1.082	<b>17.80</b>
D	18.55	1/0.91	<b>20.38</b>
E	22.91	1/0.91	<b>25.18</b>

Les effets parasites liés aux sciages et à l'influence des parois ayant été isolés, il devient possible de déterminer un coefficient traduisant les effets de l'interaction coffrage/mode de bétonnage, dans le cadre des essais. Ce coefficient sera noté K.

*With secondary effects due to sawing and forms isolated, it is possible to use tests to determine a factor reflecting the effects of formwork/concrete placement interaction. This factor will be designated K.*

Il convient dans un premier temps de déterminer la valeur de référence, supposée correspondre au comportement intrinsèque.

Moyenne générale des séries A,B,C,D,E  
 $\sigma_{\text{général}} = 22,43 \text{ MPa}$

Moyenne des séries E,D (table)  
 $\sigma_{E,D} = 22,78 \text{ MPa}$

Moyenne des séries A,B,C (âme)  
 $\sigma_{A,B,C} = 22,19 \text{ MPa}$

Calcul théorique avec loi moyenne du BSI  
 $\sigma_{\text{théo}} = 22,20 \text{ MPa}$

On observe une concordance très satisfaisante entre le résultat du calcul théorique et les différentes moyennes expérimentales (l'écart entre la valeur théorique et les moyennes générale, dans la table et dans l'âme est respectivement de 1%, 2,6% et 0,05%).

Ces constats nous autorisent donc à considérer la valeur théorique ( $\sigma = 22,2 \text{ MPa}$ ) comme référence.

On est alors en mesure d'étudier la variation de contrainte autour de cette référence, pour chaque série de prismes.

To start with, determine the reference value, assumed to correspond to intrinsic behaviour.

General mean of sets A, B, C, D, and E:  
 $\sigma_{\text{general}} = 22.43 \text{ MPa}$

Means of sets E, D (table)  
 $\sigma_{E,D} = 22.78 \text{ MPa}$

Mean of sets A,B,C (web)  
 $\sigma_{A,B,C} = 22.19 \text{ MPa}$

Theoretical calculation with mean law for BSI concrete  
 $\sigma_{\text{theo}} = 22.20 \text{ MPa}$

There is a very satisfying match between the result of the theoretical calculation and the various mean values from tests (the deviations between the theoretical value and the general means in flanges and webs are 1%, 2.6%, and 0.05% respectively).

These observations justify taking the theoretical value ( $\sigma = 22.2 \text{ MPa}$ ) as the reference value.

It is then possible to study the variation in stress around this reference value, for each set of prisms.

Série Set	Contrainte de rupture $\sigma$ Breaking stress	$K = \sigma \text{ théo} / \sigma$
A	21.65	<b>1.025</b>
B	26.69	<b>0.832</b>
C	17.80	<b>1.247</b>
D	20.38	<b>1.089</b>
E	25.18	<b>0.882</b>

Le cas le plus défavorable est donné par max ( K ), soit  $K = 1,247$ .

L'analyse de cette campagne d'essais conduit donc à considérer un coefficient de sécurité  $K = 1,25$  pour tenir compte de la variabilité de la réponse en traction du matériau causée par l'interaction coffrage/mode de bétonnage.

The most unfavourable case is with Max ( K ), i.e.  $K = 1.247$ .

Analysis of this campaign of tests therefore results in a safety factor  $K = 1.25$  being adopted to take account of the variability of the tensile response of the concrete as a result of form/concrete placement interaction.



Ce coefficient ayant été déterminé par l'analyse de moyennes de séries d'essais, il doit pouvoir être utilisé pour des justifications d'ensemble d'une structure. En revanche, pour des justifications locales, il semble prudent de reprendre l'analyse précédente en considérant les résultats les plus faibles obtenus dans chacune des cinq séries.

*Since this factor was determined by analyzing the mean values of sets of tests, it should be possible to use it for all overall verifications of a structure. On the contrary, for localized verifications, it would appear to be wise to carry out the above analysis again, using the lowest results obtained in each of the five sets*

Série Set	Résultat brut Raw result (valeur mini - min. value)	Coefficient	Contrainte de rupture Breaking stress $\sigma$	$K = \sigma \text{ théo} / \sigma$
A	16.49	1/1.082	15.21	<b>1.456</b>
B	19.67	1/1.082	18.18	<b>1.221</b>
C	13.95	1/1.082	12.89	<b>1.722</b>
D	15.08	1/0.91	16.57	<b>1.340</b>
E	17.80	1/0.91	19.56	<b>1.135</b>

Au regard des résultats ci-dessus, un coefficient  $K = 1.72$  permet de se placer en sécurité vis-à-vis d'un défaut vraisemblablement local.

*In light of the above figures, a K factor of 1.72 provides a good safety margin with respect to any defects which would probably be localized.*

#### Deuxième programme expérimental

#### *Second test programme*

Parallèlement à la campagne d'essais précédente, une série d'essais sur prismes moulés a été entreprise. Ces prismes, de dimensions 10x10x40, ont été confectionnés au cours de la préfabrication des poutres de Bourg-lès-Valence. 11 prismes ont ainsi été testés en flexion 3 points (portée 30 cm) dans un laboratoire privé. Chaque prisme a été entaillé en son centre (entaille de 10 mm de profondeur), et disposé sur le banc d'essai avec la face non coffrée sur le côté (rotation de 90° par rapport au coulage). Ces essais correspondent au protocole dans l'annexe 2 sans mesure de l'ouverture de fissure..

*A series of tests on cast prisms was carried out at the same time as the above test campaign. The 10x10x40 cm prisms were made when the Bourg-lès-Valence beams were being cast. Eleven such prisms were centre-point bend-tested (span of 30 cm) in a private laboratory. Each prism was notched mid-span (10 mm deep sawcut) and placed on the test apparatus with the unshuttered face at the side (turned 90° from the casting position). These tests used the procedure defined in annex 3, without crack width measurement.*

#### Résultats expérimentaux bruts

#### *Raw test results*

Une analyse détaillée de la mise en œuvre de la méthode inverse à partir de la mesure de la flèche, ayant montré la grande difficulté d'établir une relation de passage  $w = f(y)$ , l'analyse des résultats de cette campagne ne portera que sur les valeurs obtenues au pic.

*Since detailed analysis of application of the back analysis method using deflection measurement has shown the great difficulty in establishing a  $w = f(y)$  conversion relationship, the analysis of the results of this test campaign concerns only peak value.*

Contrainte équivalente au moment de rupture en MPa <i>Equivalent breaking moment stress in MPa</i>				
Poutre <i>Beam</i>	Prisme 1 <i>Prism 1</i>	Prisme 2 <i>Prism 2</i>	Prisme 3 <i>Prism 3</i>	Moyenne <i>Mean</i>
A4	-	31.64	33.89	32.8
A5	26.64	31.34	30.39	29.5
A6	35.10	29.91	34.73	33.2
B1	35.42	31.07	33.93	33.5

La valeur moyenne correspondant à l'ensemble des 11 prismes est de 32,2 MPa, pour une valeur caractéristique de 27,3 MPa (coefficient de Student 1,796).

#### Analyse des résultats

L'objet de cette analyse est de déterminer le coefficient traduisant les effets liés au protocole expérimental sur éprouvettes moulées. Afin d'obtenir une grandeur physiquement compatible avec les résultats développés à partir de la première campagne d'essais, il convient d'isoler les effets induits par les parois des moules.

On procède de la même façon que pour les séries A, B et C de la première campagne. Le coefficient à appliquer aux résultats bruts, permettant de supprimer l'effet des parois (le surfacage d'un prisme induit une redistribution des fibres proche de celle provoquée par une paroi) est donc :

$$\gamma = a_{\text{moyen}} / 0,405 \\ = [ (0,405 \times 8 + 0,587 \times 2) / 10 ] / 0,405 = 1,090$$

La contrainte équivalente moyenne intrinsèque vaut alors :

$$\sigma = 32,2 / 1,090 = 29,54 \text{ MPa}$$

Cette valeur est à comparer à la contrainte théorique calculée à partir de la loi moyenne du BSI, soit  $\sigma_{\text{théo}} = 22,40 \text{ MPa}$ .

Le coefficient recherché vaut donc :

$$29,54 / 22,40 = 1,3$$

*The mean value for the 11 prisms is 32.2 MPa, for a characteristic value of 27.3 MPa (Student's coefficient of 1.796).*

#### *Analysis of results*

*The purpose of this analysis is to determine the coefficient reflecting the effect of the test procedure on cast specimens. To obtain a figure that is physically compatible with the results derived from the first test campaign, the effects of the mould surfaces must be isolated.*

*The procedure is the same as for sets A, B, and C of the first campaign. The coefficient to be applied to the raw results to factor out the mould effect (surface preparation of a prism induces redistribution of fibres similar to that caused by a mould - cf. thesis of F. Atassi) is therefore:*

$$\gamma = a_{\text{mean}} / 0,405 \\ = [ (0,405 \times 8 + 0,587 \times 2) / 10 ] / 0,405 = 1,090$$

*The intrinsic mean equivalent stress is therefore:*

$$\sigma = 32.2 / 1.090 = 29.54 \text{ MPa}$$

*This figure bears comparison with the theoretical stress calculated with the mean law of BSI concrete,  $\sigma_{\text{theo}} = 22.40 \text{ MPa}$ .*

*The factor sought is therefore :*

$$29.54 / 22.40 = 1.3$$

Les effets de parois régis par le couple (taille du prisme ; longueur des fibres) ayant été identifiés, le coefficient défini ci-dessus est applicable quel que soit le prisme utilisé (7x7x28, 10x10x40 ou 14x14x56) et quelle que soit la longueur des fibres mises en œuvre.

*Having identified the wall effects governed by the combination of prism size and fibre length, the factor defined above can be applied to prisms of any size (7x7x28, 10x10x40, or 14x14x56) and for fibres of any length.*

## ANNEXE 9

### Teneur en portlandite de différents types de bétons

Elle est mesurée de préférence par thermogravimétrie, en faisant la différence des pertes d'eau entre 400°C et 550°C.

Cependant, l'ordre de grandeur de la teneur en portlandite dans les différents types de bétons peut être calculé simplement, sur la base du dosage en ciment  $c$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), du rapport  $e/c$ , et de la teneur  $s$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) en fumées de silice ou ajouts minéraux pouzzolaniques. La formule de calcul théorique est la suivante :

$$CH (\text{kg}/\text{m}^3) = \text{SUP}(0, \{c \cdot (\%C_3S/100) \cdot [\text{INF}(1, (e/c)/0.418)] \cdot 0.422 - s \cdot 0.617\})$$

où :

- le coefficient 0,418 est le rapport  $e/c$  stoechiométrique pour l'hydratation de  $C_3S$ , le rapport  $\alpha_m = \text{inf}(1, (e/c)/0.418)$  représente donc la limitation de l'avancement maximal de l'hydratation lorsque la teneur en eau est inférieure à la stoechiométrie,
- le coefficient 0,422 est la proportion de portlandite formée par unité de masse de  $C_3S$ , pour l'avancement de l'hydratation égal à l'unité,
- le coefficient 0,617 représente la masse de portlandite consommée à 28 jours environ par la réaction pouzzolanique (taux de réaction voisin de 0,5, valeur typique mesurée par RMN).

Ainsi, pour une teneur (typique) en  $C_3S$  du ciment de 60%, on trouve les valeurs typiques suivantes :

## ANNEX 9

### Portlandite content of different types of concrete

The portlandite content is preferably measured by thermogravimetric analysis, comparing water losses between 400°C and 550°C.

The order of magnitude of portlandite contents in different kinds of concrete can be calculated simply, on the basis of the cement content  $c$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), the W/C ratio, and the silica fume or other pozzolanic materials content  $s$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). The formula for this analysis is as follows:

where:

- the coefficient 0.418 is the stoichiometric W/C ratio for hydration of  $C_3S$ , so the ratio  $\alpha_m = \text{inf}(1, (w/c)/0.418)$  represents the limit on the maximum hydration ratio when the water content is less than the stoichiometric ratio.
- the coefficient 0.422 is the proportion of portlandite formed per unit mass of  $C_3S$ , for unit of hydration ratio.
- the coefficient 0.617 represents the mass of portlandite consumed after about 28 days by pozzolanic reaction (rate of reaction close to 0.5, the typical value measured by NMR).

Thus, for a cement  $C_3S$  content (typical) of 60%, the following typical values are found:

	B.O. OC	BHP HPC	BTHP VHPC	BFUP UHPFRC
Ciment (kg/m <sup>3</sup> ) = c <i>Cement (kg/m<sup>3</sup>) = c</i>	300	450	500	700
%C <sub>3</sub> S du ciment / 100 <i>% C<sub>3</sub>S in cement / 100</i>	0.6	0.6	0.6	0.6
Rapport e/c <i>W/C ratio</i>	0.6	0.37	0.32	0.2
$\alpha_m$	1	0.88	0.762	0.476
Teneur potentielle en clinker résiduel(kg/m <sup>3</sup> ) <i>Potential residual clinker content (kg/m<sup>3</sup>)</i>	0	54	119	367
Teneur en fumée de silice s (kg/m <sup>3</sup> ) <i>Silica fume content s (kg/m<sup>3</sup>)</i>	0	22.5	50	200
Teneur potentielle en portlandite (kg/m <sup>3</sup> ) <i>Potential portlandite content (kg/m<sup>3</sup>)</i>	76	86	66	0

Tableau 1 – Calcul estimatif des teneurs potentielles en clinker et portlandite résiduels des bétons.

*Table 1 – Calculation estimating potential residual clinker and portlandite contents of different concretes.*

**Page laissée blanche intentionnellement**

Ce document, co-édité par l'AFGC et le SETRA, est disponible :

- Au secrétariat de l'AFGC : C° SETRA 46 avenue Aristide Briand – 92225 Bagneux Cedex  
tel : 01 46 11 32 90 - fax : 01 46 11 32 88
- Au bureau de vente du SETRA : 46 avenue Aristide Briand – 92225 Bagneux Cedex  
tel : 01 46 11 31 53 - fax : 01 46 11 33 55

Référence SETRA : **F0211**  
Prix de vente : **42 €**