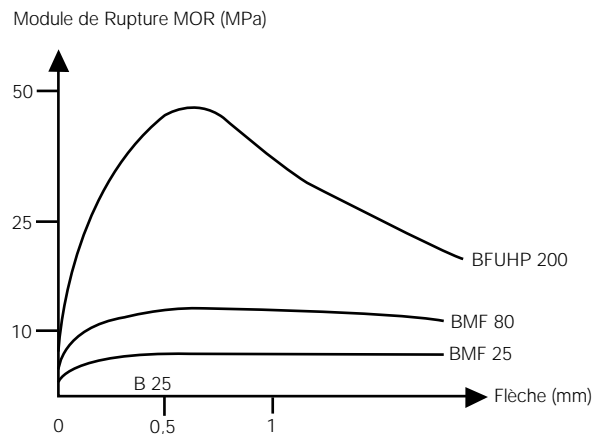


5.7 Les bétons fibrés ultraperformants BFUP

Les progrès dans le domaine des adjuvants, des méthodes de formulation et de l'utilisation des ultra-fines ont conduit à une évolution spectaculaire des bétons : des bétons courants de résistance en compression de 30 MPa, la gamme s'est élargie aux bétons à hautes performances.

Une rupture technologique est intervenue au début des années 90 avec la mise au point de bétons dont la résistance est de l'ordre de 200 MPa en compression et de 40 MPa en traction par flexion. Grâce à cette dernière caractéristique, on peut désormais envisager de se passer des armatures passives dans les éléments structurels.



Courbes types en flexion 3 points sur éprouvettes 4 x 4 x 16 cm
 FM = Fibres Métalliques.
 200 = 200 MPa en compression.
 Source : Ductal® FM 200

Principes

On retrouve dans la famille des BFUP des bétons réalisés suivant 2 concepts différents :

1. Concept d'optimisation multi-échelle de composants et de fibres, qui permet d'obtenir un comportement ductile.
2. Concept d'utilisation de granulats à haute résistance mécanique.

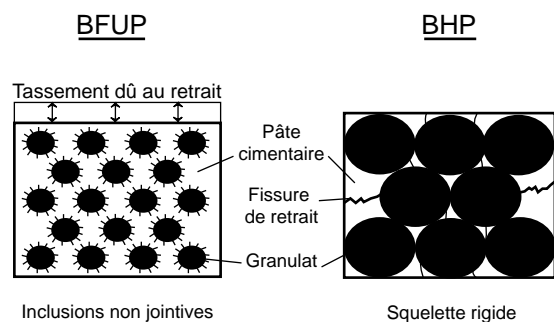
L'obtention de résistances élevées et de faibles perméabilités aux agents agressifs passe par une réduction très importante de la porosité et plus précisément du réseau des pores connectés, en jouant sur deux paramètres.

- Une teneur en eau extrêmement faible (rapport eau/ciment < 0,25) grâce à l'utilisation optimisée de superplastifiants qui déflocculent les particules fines et permettent un meilleur empilement granulaire. D'une part, la quantité d'eau nécessaire au remplissage des vides s'en trouve réduite, et d'autre part, la surface spécifique des grains, donc, à terme, leur hydratation, est accrue.

- Une compacité maximale, obtenue en utilisant des composants correspondant à plusieurs classes granulométriques (classiquement quatre, qui incluent le ciment et les ultrafines défloculées).

Les ultrafines utilisées dans les BFUP sont des fumées de silice de haute pureté, sous forme de billes submicrométriques qui remplissent les espaces intergranulaires, et qui réagissent avec la chaux issue de l'hydratation du ciment. Ce faisant, elles participent activement à la résistance de l'ensemble et ferment le réseau des pores à la diffusion des ions et des gaz.

Dans le cas des BFUP, la taille et la quantité des plus gros grains est considérablement réduite. Le squelette granulaire y gagne en souplesse, ce qui réduit considérablement les effets de microfissuration liés au retrait.



Effet de la souplesse du squelette granulaire sur le retrait endogène et la microfissuration.
 Source : Ductal®

Dernier composant clé des BFUP : les fibres, qui, lorsque leur dosage est suffisamment élevé, confèrent au matériau sa ductilité. Ces fibres, en acier à très haute résistance (> 2 000 MPa), ou organiques, ont une longueur adaptée à la taille du plus gros grain et une section la plus faible possible pour garantir un bon ancrage.

A titre d'exemple, une formulation typique de BFUP est donnée dans le tableau suivant (pour 1 m³) :

Ciment NF	Sable fin	Quartz broyé	Fumée de silice	Fibres métalliques	Adjuvant (extrait sec)	Eau totale
710 kg	1 020 kg	215 kg	203 kg	160 kg	10 kg	140 l

Fabrication des BFUP

Les BFUP peuvent être fabriqués dans une centrale à béton classique moyennant un réglage des pales du malaxeur, et un allongement du temps de malaxage (5 minutes ou plus). L'utilisation d'un tourbillon produit un fort cisaillement, ce qui améliore les performances du matériau et permet de réduire le temps de malaxage.

■ Ouvrabilité

Les formules types de BFUP sont généralement de consistance fluide ce qui permet un remplissage aisé des coffrages. La plage d'ouvrabilité est cependant très large : il est possible de réaliser des BFUP d'extrusion ou autoplaçants.

■ Mise en œuvre

La mise en œuvre peut s'effectuer à la benne, avec une manchette, par pompage, ou par injection.

■ Cinétique du durcissement

Selon les conditions du chantier ou de préfabrication, on recherchera plutôt une résistance à la compression à 16 h de 50 MPa qui permet la mise en tension précoce de câbles de précontrainte par post-tension, ou une résistance à la compression de 200 MPa après un traitement thermique adapté.

Caractéristiques mécaniques

Le tableau ci-dessous résume les résistances comparées obtenues sur BFUP avec et sans traitement thermique.

Caractéristiques	A 28 jours sans traitement thermique	A 3 jours après traitement thermique
Résistance à la compression (MPa)	180	220
Résistance à la flexion 3 points (MPa)	36	40
Résistance à la traction directe (MPa)	8	10
Module d'élasticité (MPa)	60 000	55 000
Coefficient de dilatation thermique (en 10 ⁻⁶ /°C)	12	12
Masse volumique (kg/m ³)	2 500	2 500

Exemple de performances obtenues sur une formulation Ductal®.

■ Retrait - Fluage

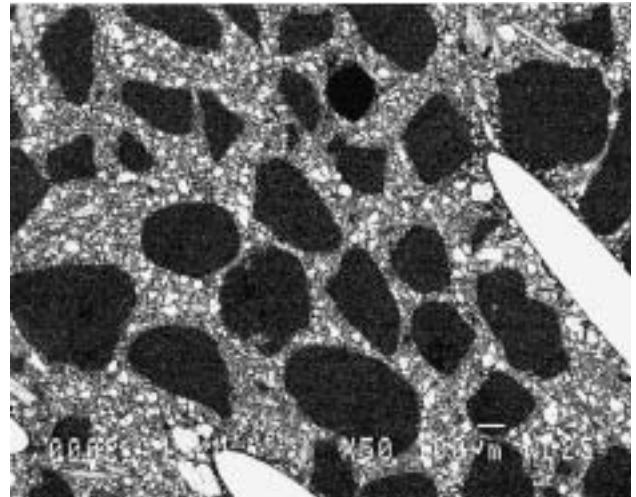
Dans les BFUP, le retrait endogène de la matrice cimentaire est de l'ordre de 500 µm/m, comme pour les BHP, suite au faible rapport eau/ciment qui conduit à un diamètre des pores réduit. Ce retrait endogène n'est pas gêné par le squelette granulaire, et la formation de microfissures est extrêmement faible.

Grâce à la faible teneur en eau du matériau et à l'utilisation de fumées de silice, la déformation sous charges permanentes (fluage) est très fortement réduite.

Sur certaines formulations, il est possible, avec un traitement thermique adapté, de stabiliser le retrait, et donc d'éviter tout risque de fissuration par retrait empêché, ainsi que les déformations de fluage qui sont limitées très rapidement à une valeur très faible (ref Ductal®).

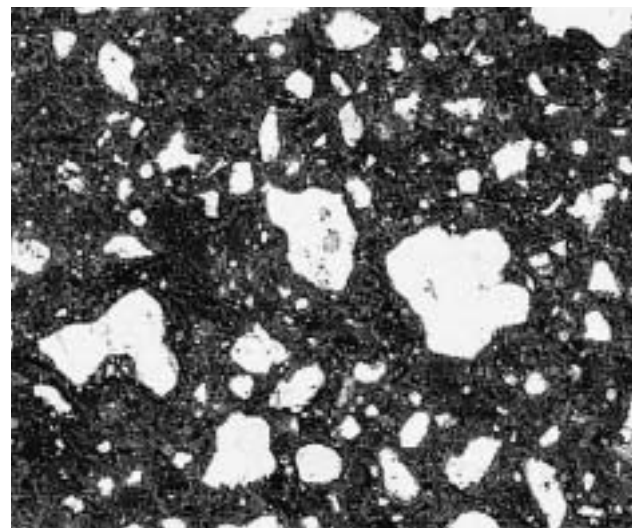
Microstructure des BFUP

Les composants des BFUP varient du millimètre au nanomètre.

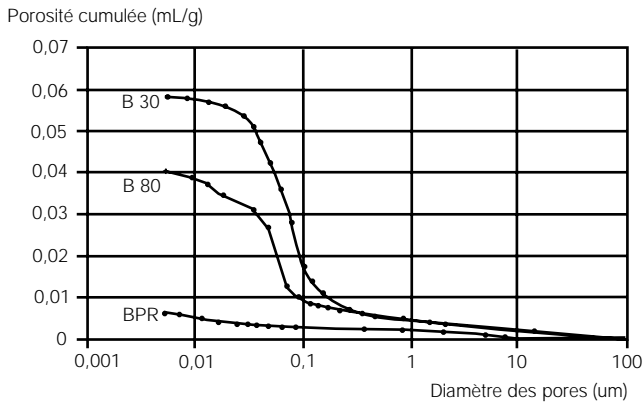


Micrographie au microscope électronique à balayage d'un BFUP200 (grossissement 50) : la phase grise interstitielle représente le mélange des silicates de calcium hydratés et de fumée de silice. En foncé les grains de sable ; les grains blancs sont du clinker anhydre. Les ellipses blanches sont des sections de fibres métalliques. Pour observer la microstructure de la phase interstitielle (« pâte de BFUP »), une micrographie par microscopie électronique à balayage a été réalisée en mode électrons rétrodiffusés sur section polie (grossissement 200).

Source : Ductal® FM200



A grossissement relativement faible (200), la pâte d'un BFUP laisse apparaître en clair des particules de clinker non hydraté qui joue le rôle de microgranulats à surface très active et de haut module d'élasticité (120 000 MPa). Il est très lié aux silicates de calcium hydratés comme le montre la micrographie. La phase grise interstitielle représente le mélange des silicates de calcium hydratés et de fumée de silice, et permet de réduire très sensiblement la porosité.



Porosité ouverte comparée d'un BFUP (type BPR) et de bétons courants ou à hautes performances.

Dans certains cas, un traitement thermique permet d'améliorer encore la microstructure, donc la résistance mécanique et, surtout, la durabilité.

Durabilité

Du fait de leur microstructure extrêmement dense, les BFUP présentent des propriétés de durabilité exceptionnelles, notamment dans les domaines suivants : résistance au gel-dégel, résistance aux sels de déverglaçage, résistance à la carbonatation, résistance à la pénétration d'ions agressifs (chlorures, sulfates, acides faibles), résistance à l'abrasion.

	BFUP	B25 courant
Porosité	< 2 %	8 à 10%
Perméabilité à l'azote	1 à 5.10 ⁻²⁰ m ²	10 ⁻¹⁶ à 10 ⁻¹⁷
Gel-dégel : - module résiduel après 300 cycles - perte de masse après 300 cycles	100 % < 10 g/m ²	(fonction de la formulation)
Abrasion (coefficient CNR)*	1,3	2 à 4
Carbonatation : - pénétration sur 15 mm	> 12 000 ans	15 / 20 ans
Corrosion : - coefficient de diffusion effectif	0,02	10 à 12

* Par rapport au verre.

Les lois de comportement et de tenue au feu des BFUP sont différentes de celles des bétons courants. En revanche, comme les autres bétons, le BFUP est incombustible (M0). Les dispositions constructives doivent être étudiées au cas par cas au regard de la résistance au feu.

Domaines d'applications

Au vu des nombreuses qualités des BFUP, on peut s'intéresser à des applications jusque là inaccessibles au matériau béton et réservées à d'autres matériaux.

On peut classer les domaines d'applications en fonction des caractéristiques du matériau principalement valorisées : résistance, durabilité, esthétique, flexibilité des formes.

■ Valorisation de la résistance des BFUP

Le domaine du génie civil vient le premier à l'esprit, car le comportement mécanique du matériau permet de concevoir des ouvrages d'art particulièrement élancés et légers, notamment avec des concepts innovants tels que des structures en treillis.

Pour les bâtiments de grande hauteur, par exemple, ces matériaux permettent de réduire la section des poutres et de construire à coûts et à hauteur égaux un étage supplémentaire.

De même, il devient possible de travailler avec des portées plus grandes, et de réaliser des plateaux libres permettant d'accroître la surface d'habitation.

■ Valorisation de la durabilité des BFUP

L'exemple le plus frappant est celui des conteneurs à haute intégrité conçus pour l'entreposage de matières faiblement radioactives.

On peut également citer l'utilisation dans des environnements particulièrement agressifs, alliant de fortes variations de température et d'humidité aux agents agressifs tels que des ions chlorures ou acides faibles.

■ Valorisation des qualités esthétiques des BFUP

La gamme des BFUP fluides permet d'obtenir des parements lisses très réguliers. L'utilisation de fibres organiques et de pigments minéraux permet en outre d'utiliser une large plage de coloris pour la réalisation de panneaux architectoniques.

■ Valorisation de la liberté de forme des BFUP

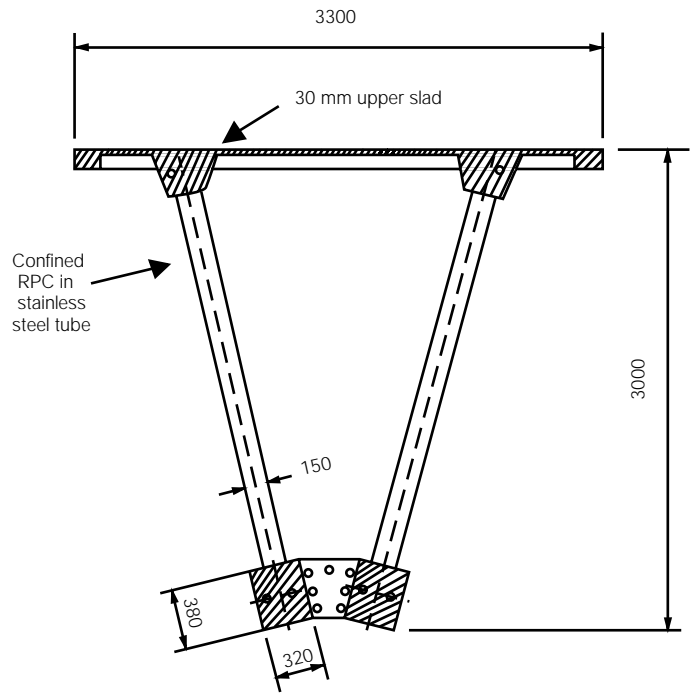
L'absence d'armatures passives et les résistances élevées du matériau permettent d'utiliser une grande variété de formes pour la construction de structures légères et élancées, et d'envisager la réalisation de formes complexes, comme par exemple des coques ou des sculptures.

Exemples d'applications

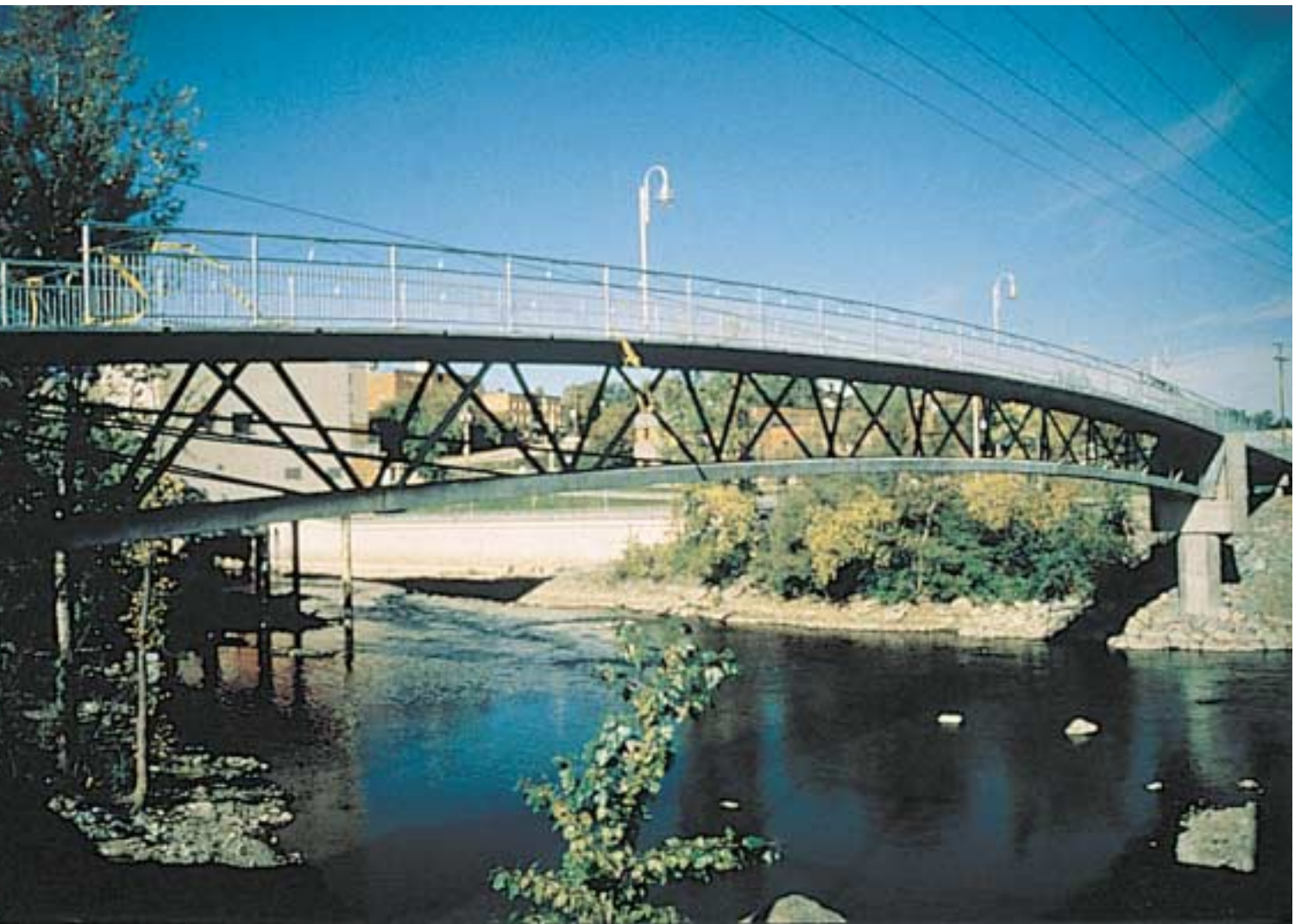
Les applications réalisées à ce jour ont été dimensionnées en collaboration avec les maîtres d'œuvre sur la base des connaissances et des recommandations établies pour les bétons à très hautes performances et les bétons de fibres. Un groupe de travail animé par le SETRA et soutenu par l'AFGC est chargé d'élaborer des recommandations pour le calcul des structures en BFUP.

■ Passerelle de Sherbrooke (Québec ; 1997)

Cette passerelle de 60 m de portée est de conception particulièrement innovante. Le hourdis supérieur est une dalle nervurée en BFUP de 30 mm d'épaisseur. Les âmes sont des diagonales mixtes, inclinées dans les deux directions, mettent en œuvre du BFUP confiné dans une enveloppe mince. Huit diagonales étaient placées dans un gabarit avant le coulage des poutres inférieures et de la dalle supérieure afin de réaliser un voussoir de 10 m de long. Ces voussoirs ont été assemblés par demi-travées avec un câble de précontrainte, puis levés à la grue et posés sur une culée et une pile provisoire. La précontrainte finale, composée de câbles intérieurs filants et de câbles extérieurs déviés a permis de libérer l'appui central. Aucune armature passive n'est utilisée dans cette structure.



Coupe transversale de la passerelle.





Plaque d'ancrage pour le renforcement de murs en terre armée à La Réunion. Ref Ductal®.

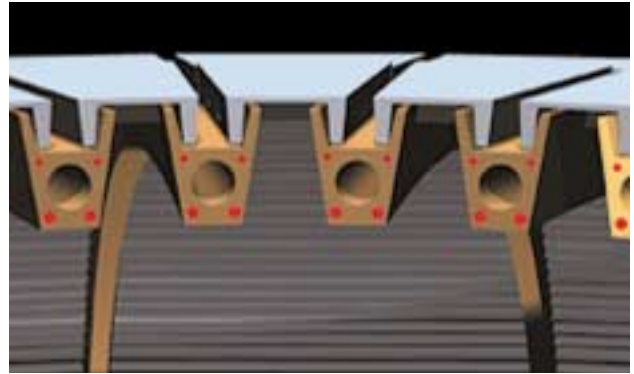


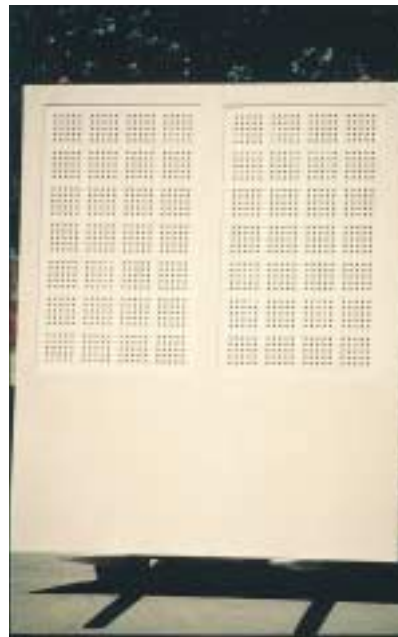
Image de synthèse montrant le détail des arcs et des « tuiles » en Ductal®.

■ **Plaques d'ancrage** **(Ile de la Réunion ; 1999)**

Des plaques en BFUP à fibres organiques ont été utilisées pour l'ancrage de tirants précontraints destinés à conforter la tenue des écaïlles d'un mur de soutènement en terre armée. Ces plaques ont été choisies en substitution des éléments d'ancrage traditionnels plus coûteux réalisés en fonte ductile.

■ **Poutres et poutrelles de Cattenom** **(France ; 1998)**

Dans le cadre de la rénovation de la structure interne des aéroréfrigérants de centrales EDF, il a été décidé de remplacer le système d'échanges constitué de poutres et de poutrelles précontraintes. Les contraintes sont à la fois la légèreté et une très haute durabilité. Les BFUP apportent ici une solution intéressante. Plus de 1500 m³ de BFUP ont été utilisés sous forme de poutres et de poutrelles précontraintes par prétension. Les règles de calcul pour les poutres précontraintes ont été développées avec le maître d'œuvre et validées à cette occasion sur des essais de structures au CEBTP et au LCPC.



Panneau antibruit pour la gare souterraine de Monaco.



Préfabrication des poutres précontraintes pour l'aéroréfrigérant de la centrale de Cattenom.



Arbre Martel.

■ **Arbre Martel**

Une sculpture représentant un arbre a été mise en place sur la place de L'Hôtel de Ville de Boulogne Billancourt. Cet arbre dessiné par l'architecte Mimram a été fabriqué en Ductal® avec des fibres organiques et un ciment blanc. Le tronc est précontraint de manière à reprendre les efforts de flexion élevés dus à l'action du vent sur les feuilles. Les feuilles sont assemblées par boulonnage.