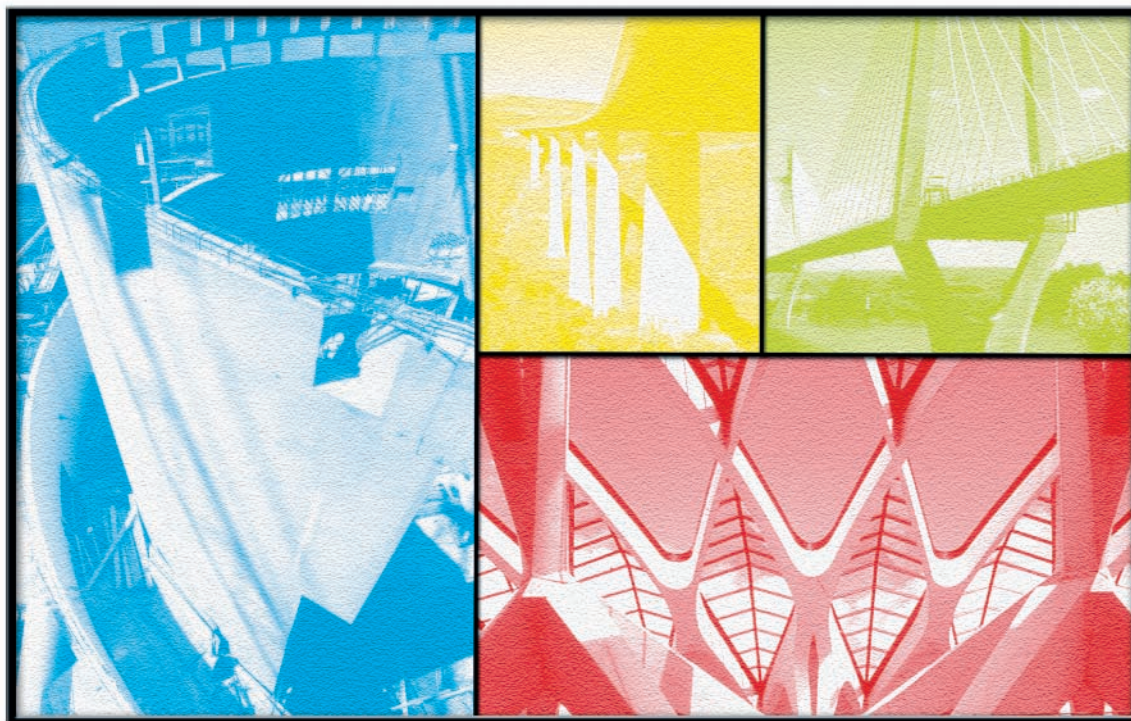


BÉTONS ET GÉNIE CIVIL

Les nouvelles solutions des bétons prêts à l'emploi



Avant-propos

Les civilisations antiques érigeaient déjà des constructions avec des mortiers à base de chaux.

Ancêtre de notre béton contemporain, le béton fabriqué par les Romains, au premier siècle de notre ère, permettait de construire des édifices en maçonnerie. Le mortier était composé de sable, de chaux et de poudre de roches volcaniques qui, mélangé avec de l'eau, durcissait.

Le Colisée et le Pont du Gard témoignent indiscutablement de la longévité du matériau, premier matériau composite de l'histoire de la construction.

Le mot béton apparaît vers 1170 sous la plume du poète Benoît de Sainte Maure, auteur du "Roman de Troie", un poème enrichi de nombreux termes techniques.

Mais c'est seulement en 1755 que l'on trouve une première définition du béton : "sorte de mortier qu'on jette dans les fondements, et qui durcit extrêmement".

Coût faible, disponibilité et versatilité ont été les facteurs déterminants du succès du béton prêt à l'emploi en tant que produit de construction, et ce depuis qu'il a été introduit il y a 100 ans. Ce succès n'est pas prêt de se démentir, grâce aux évolutions actuelles du BPE .

Les nouveaux Bétons à Hautes Performances s'adaptent et s'intègrent plus facilement à leur environnement, offrant un gain de performances et de durabilité qui s'inscrit bien dans le concept du développement durable. Leurs résistances particulièrement élevées permettent de nouvelles prouesses techniques, telles que la création de structures élancées.

Cette évolution est complétée par le développement des Bétons Autoplaçants (BAP) dont l'excellente homogénéité optimise encore l'esthétique de l'ouvrage dans son environnement global. Pour les professionnels, ces nouveaux bétons mis en œuvre sans vibration et sans choc diminuent la "pénibilité" et améliorent les conditions de travail et la sécurité. Le chantier génère moins d'impact sonore pour les riverains.

Les “Bétons Autoplaçants” sont appelés à devenir les bétons courants de demain, retenus par le prescripteur dès la conception de l’ouvrage. Ces nouveaux produits ont d’ailleurs fait l’objet d’un plan national (PN BAP) d’envergure qui concerne toute la filière scientifique et constructive.

Aujourd’hui, le développement des nouveaux Bétons peut répondre à toutes les contraintes techniques et esthétiques des architectes et des maîtres d’ouvrages. Impression de légèreté, haut niveau de résistance, grande pérennité, le béton a changé de peau, certains architectes parlent même “d’une peau minérale”...

Contributions à l’ouvrage

Ce document a été rédigé par un groupe de travail composé d’experts du SNBPE, du SNPB et de CIMBETON.

Sommaire

● 1 - Introduction	5
---------------------------	----------

● 2 - La norme béton NF EN 206-1	9
2.1 - Contexte de la norme NF EN 206-1	10
2.2 - Domaines d'application	11
2.3 - Évolutions de la norme	11
2.3.1 - Clarification des responsabilités des différents intervenants	12
2.3.2 - Désignation des bétons	13
2.3.3 - Classification des bétons	15
2.3.4 - Contrôles de conformité et de production	17
2.3.5 - Classes d'exposition	17

● 3 - Les Eurocodes	25
3.1 - Présentation et objectifs des Eurocodes	26
3.2 - L'Eurocode 2 : NF EN 1992	29
3.3 - La philosophie de l'enrobage suivant l'Eurocode 2	30

● 4 - Les nouvelles offres du matériau béton	33
4.1 - Béton Autoplaçant (BAP)	34
4.1.1 - Définition	34
4.1.2 - Formulation des Bétons Autoplaçants	35
4.1.3 - Fabrication des Bétons Autoplaçants	36
4.1.4 - Contrôle des Bétons Autoplaçants	36
4.1.5 - Atouts des Bétons Autoplaçants pour la réalisation des parements	38
4.1.6 - Autres atouts des Bétons Autoplaçants	40
4.1.7 - Projet National Bétons Autoplaçants (PN@P)	42
4.1.8 - Conclusion	43
4.2 - Bétons à Hautes Performances (BHP)	44
4.2.1 - Définition	44
4.2.2 - Principes de formulation des BHP	45
4.2.3 - Constituants des BHP	47
4.2.4 - Contrôle des BHP	48
4.2.5 - Dimensionnement des structures en BHP	49
4.2.6 - Atouts des BHP	49
4.2.7 - Projet National BHP 2000	52
4.2.8 - Conclusions	52

● 5 - Techniques de mise en œuvre	55
5.1 - Pompage du béton	56
5.1.1 - Procédé de pompage	56
5.1.2 - Matériel de pompage	56
5.1.3 - Atouts du pompage du béton	57
5.1.4 - Utilisation des pompes à béton	59
5.1.5 - Positionnement de la pompe, respect des consignes de sécurité	60
5.2 - Mise en œuvre des Bétons Autoplaçants	61
5.3 - Mise en œuvre des Bétons à Hautes Performances	63

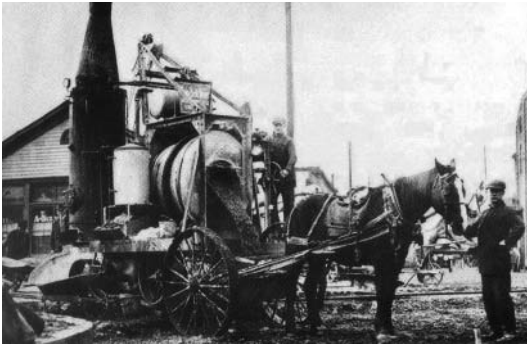


Chapitre

1

Introduction

Né avec le XX^{ème} siècle, le béton moderne est un matériau jeune qui a connu ces vingt dernières années des développements considérables. Il a profité en particulier des évolutions de la chimie minérale et organique et de l'amélioration des outils de production. Au-delà des progrès constants du matériau (sur son ouvrabilité, ses performances mécaniques et sa durabilité), les recherches sur les bétons se sont considérablement accélérées depuis 10 ans et ont abouti aujourd'hui aux solutions les plus innovantes tant en termes de conception, que de mise en œuvre et d'esthétisme. Les bétons sont devenus les matériaux de la modernité et de l'innovation. L'étendue de leurs performances physiques, mécaniques et esthétiques s'élargit sans cesse.



Le béton au début du XX^{ème} siècle

Les qualités initiales de résistances mécaniques se sont déclinées, différenciées. Les bétons s'adaptent désormais à toutes les exigences des concepteurs, aux contraintes des chantiers et aux agressions de l'environnement. Au fil des années, les caractéristiques du béton se sont complexifiées pour répondre à des utilisations de plus en plus diversifiées ; à des résistances toujours plus importantes, à des envi-

ronnements de plus en plus agressifs, à des contraintes esthétiques, et à de nouvelles exigences de mise en œuvre.

Les qualités intrinsèques du béton (durabilité, comportement mécanique et résistance aux agressions chimiques, tenue au feu, diversité des formes, des couleurs et des aspects...) sont les garants d'ouvrages pérennes, efficaces, écologiques, économes et harmonieux.

Cet ouvrage présente l'offre multiple du matériau béton et les diverses techniques de mise en œuvre. Il fait le point sur le contexte normatif actuel et les avancées récentes, aussi bien dans le domaine de la mise en œuvre que dans celui des propriétés et des performances offertes.



Le béton aujourd'hui



Chapitre

2

La norme béton NF EN 206-1

2.1 - Contexte de la norme NF EN 206-1

2.2 - Domaines d'application

2.3 - Évolutions de la norme

2.1 - Contexte de la norme NF EN 206-1

La norme NF EN 206-1 est l'aboutissement de 20 ans de travail de normalisation européenne réalisé par le TC 104 du Comité Européen de Normalisation (CEN). Après la publication en 1990 de la pré-norme européenne ENV 206, les pays membres ont publié des normes nationales s'inspirant de cette pré-norme européenne expérimentale, ce fut le cas en France avec la norme XP P18-305.

La norme NF EN 206-1 avec son Annexe Nationale est devenue, depuis 2005, la base normative pour tous les bétons de structure.

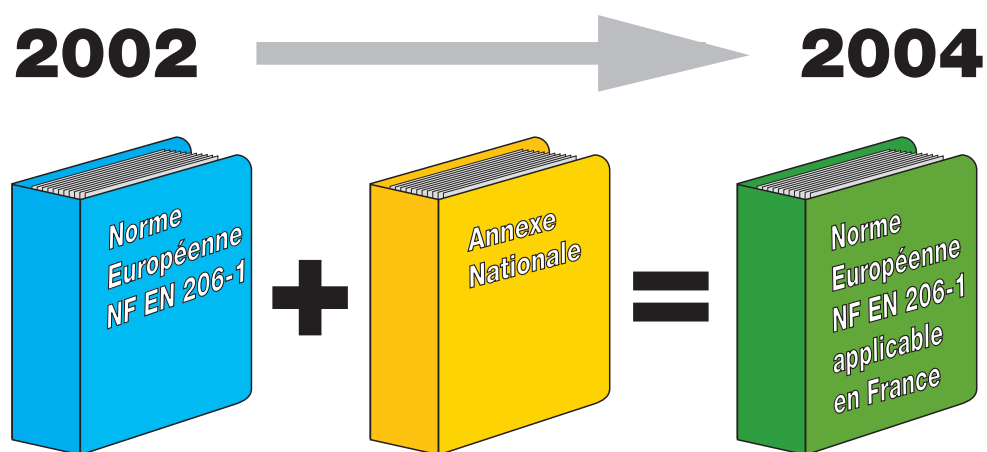


Schéma n°1 : Évolution de la norme NF EN 206-1

Elle s'inscrit dans un contexte normatif global qui comprend :

- ▶ des **normes de constituants** : granulats pour béton (NF EN 12620 et XP P 18-545), ciments courants (NF EN 197-1), adjuvants pour béton (NF EN 934-2) et eau de gâchage (NF EN 1008) ;
- ▶ des **normes d'essais** (séries NF EN 12350 et NF EN 12390) ;
- ▶ des **normes de dimensionnement** (Eurocodes) en particulier la série des normes NF EN 1992 ou Eurocode béton (EC 2) ;

- les **normes d'exécution** des bâtiments (NF P 18-201 : DTU 21) ;
- les **règles techniques de conception et les fascicules du CCTG** (Fascicule 65, livret SNCF...).

2.2 - Domaines d'application

La norme NF EN 206-1 s'applique aux bétons de structure qu'ils soient des bétons prêts à l'emploi ou des bétons réalisés sur chantier (par l'utilisateur du béton), destinés aux bâtiments et aux ouvrages de génie civil.

Pour les produits préfabriqués structuraux en béton, autres que les blocs, les normes européennes harmonisées s'appuient sur la norme NF EN 13369, laquelle précise et complète, pour les aspects concernant les produits préfabriqués structuraux, la norme NF EN 206-1.

Pour les autres produits préfabriqués, dont les blocs, il existe des normes qui contiennent en elles-mêmes toutes les spécifications nécessaires.

En ce qui concerne le Béton Prêt à l'Emploi, la norme NF EN 206-1 s'applique également aux bétons lourds et à certains bétons légers, mais ne couvre pas :

- les bétons non-structuraux (bétons de remplissage, bétons de tranchées, bétons de calage de bordures de trottoir, bétons de propreté...)
- les bétons aérés ;
- les bétons mousses ;
- les bétons poreux (caverneux) ;
- les bétons très légers (masse volumique $< 800 \text{ kg / m}^3$) ;
- les bétons réfractaires ;
- les bétons de granulats non minéraux.

2.3 - Évolutions de la norme

2.3.1 - Clarification des responsabilités des différents intervenants

La norme NF EN 206-1 précise le rôle de chaque intervenant : le prescripteur, le producteur et l'utilisateur du béton. Ainsi :

- le **prescripteur** est responsable de la spécification du béton. Il doit s'assurer de prendre bien en compte tous les paramètres pour définir parfaitement le béton à utiliser ;

- ▶ le **producteur** est responsable de la conformité et du contrôle de production du béton ;
- ▶ l'**utilisateur** est responsable de la mise en place du béton dans la structure.

Dans le cas du BPE, l'acheteur du béton frais doit fournir au producteur, à chaque commande, toutes les spécifications normatives du béton.

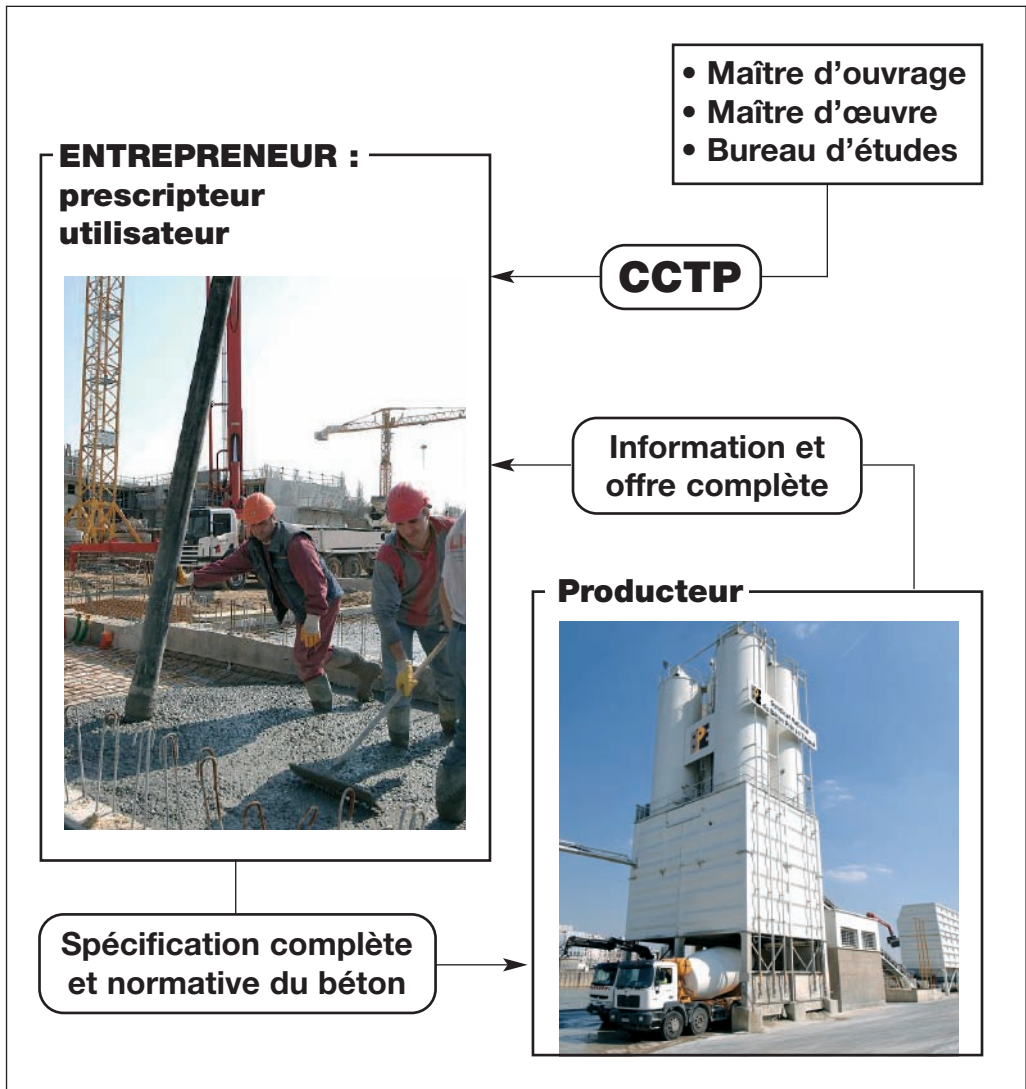


Schéma n°2 : Relations entre les divers intervenants

2.3.2 - Désignation des bétons

La norme NF EN 206-1 définit trois types de bétons :

- ▶▶ les **Bétons à Propriétés Spécifiées : BPS**
- ▶▶ les **Bétons à Composition Prescrite : BCP**
- ▶▶ les **Bétons à Composition Prescrite dans une Norme : BCPN**

Les BPS

Il s'agit de béton pour lequel les propriétés requises et les caractéristiques supplémentaires sont spécifiées au producteur qui est responsable de fournir un béton satisfaisant à ces exigences.

Les spécifications de base sont les suivantes :

- la conformité à la norme NF EN 206-1 ;
- la classe de résistance à la compression ;
- la classe d'exposition ;
- la classe de consistance ;
- la classe de teneur en chlorures ;
- la dimension nominale maximale des granulats.

Des caractéristiques complémentaires (type de ciment...) peuvent, le cas échéant, être demandées en plus des spécifications de base, avec des niveaux de performances contrôlées suivant des méthodes d'essais définies.

Nota

Pour le béton léger, il faut spécifier la classe de masse volumique ou masse volumique cible et pour le béton lourd, la masse volumique cible.

Les BPS sont les bétons principalement fabriqués et commercialisés par les centrales de BPE.



Les BCP

Il s'agit de béton pour lequel la composition et les constituants à utiliser sont spécifiés au producteur par le prescripteur.

Le prescripteur a la responsabilité de s'assurer que les prescriptions sont conformes aux exigences de la norme NF EN 206-1 et que la composition prescrite est capable d'atteindre les performances attendues pour le béton.

Un BCP ne doit être formulé que par un prescripteur expérimenté disposant d'une réelle compétence dans la formulation du béton.

Le producteur est responsable de fournir un béton respectant cette composition prescrite.

Les contrôles sur les performances atteintes ne sont pas de la responsabilité du producteur (ils incombent au prescripteur ou à l'utilisateur).

Les principales spécifications de base sont les suivantes :

- conformité à la norme NF EN 206-1 (la responsabilité du producteur se limite au respect de la composition prescrite) ;
- dosage en ciment ;
- type et classe de résistance du ciment ;
- rapport Eau efficace / Liant équivalent ou consistance ;
- dimension nominale maximale des granulats, et toute limitation de leur fuseau granulaire ;
- type et catégorie des granulats et leur teneur maximale en chlorures (la masse volumique maximale ou minimale pour les bétons légers ou les bétons lourds,) ;
- le type et la quantité des adjuvants ou additions et l'indication de leur origine le cas échéant ;

Les BCP dans une Norme

Ce type de béton est réservé à certains ouvrages simples de bâtiment (par exemple, chantier de catégorie A, tel que défini dans la norme NF P 18-201 article 6.5)

Cas des ouvrages d'art

Le fascicule 65 précise (chapitre 8 article 8.1 projet 2006) :

“Dans le cas général, le prescripteur recourt à un béton à propriétés spécifiées.

Dans certains cas particuliers, le prescripteur peut recourir à un béton à composition prescrite, sous réserve de justifier que cette composition permet de respecter les spécifications du béton définies dans les documents particuliers du marché.”

2.3.3 - Classification des bétons

» Classes de résistance à la compression

La classe de résistance à la compression des bétons à 28 jours est désignée par la lettre C de “concrete” suivi de deux nombres correspondant aux résistances mesurées respectivement sur éprouvettes cylindriques et cubiques (par exemple C 20/25 ; C30/37).

**Tableau n°1 : Classe de résistance à la compression
pour les bétons de masse volumique normale et les bétons lourds**

Classe de résistance à la compression	Résistance caractéristique minimale sur cylindres	Résistance caractéristique minimale sur cubes
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

» Résistance caractéristique en compression à 28 jours

La résistance caractéristique est définie avec un fractile de 5 % quel que soit le niveau de résistance du béton.

Nota

La norme XP P18-305 admettait 10 % de résultats en dessous de la résistance caractéristique spécifiée jusqu'à 30 MPa et 5 % au-dessus de 30 MPa. La norme NF EN 206-1 impose donc des spécifications plus sévères, gage de plus grande qualité.

» **Classes de consistance**

Il existe 5 classes de consistance des bétons (S1 à S5).

La mesure de l'affaissement est réalisée à l'aide du cône d'Abrams (Slump test).

Tableau n°2 : Classes de consistance

Classes de consistance	S1	S2	S3	S4	S5
Affaissement (mm)	10-40	50-90	100-150	160-210	> 220

Les consistances peuvent également être spécifiées par d'autres essais, temps VEBE, indice de serrage ou diamètre d'étalement.

» **Classes de chlorures**

Quatre classes de chlorures sont définies dans la norme NF EN 206-1 (0,20, 0,40, 0,65 et 1,0). Ce rapport correspond à la teneur maximale en ions Cl⁻ rapportée à la masse de ciment.

Tableau n°3 : Classes de chlorures à respecter en fonction de l'utilisation du béton

Utilisation du béton	Classe de chlorures	Teneur maximale en ions chlorure (Cl ⁻) rapportée à la masse de ciment + additions prises en compte
Contenant des armatures de précontrainte en acier	Cl 0,20	0,20 %
Contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées	Cl 0,40	0,40 %
Contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées et formulées avec des ciments de type CEM III	Cl 0,65	0,65 %
Ne contenant ni armatures en acier, ni pièces métalliques noyées	Cl 1,0	1 %

De plus, le fascicule 65 précise :

“La classe Cl 0,40 est retenue pour le béton armé non soumis à une exposition fréquente à des sels de déverglaçage ou d'origine marine.

Dans le cas contraire, la classe Cl 0,20 % est retenue pour le béton armé.”

» Dimension des granulats

Le béton est spécifié selon la dimension maximale des granulats. La classification est fonction de la dimension nominale supérieure du plus gros granulat présent dans le béton.



2.3.4 - Contrôles de conformité et de production

La norme NF EN 206-1 décrit très précisément la nature et la fréquence des contrôles, et les critères de conformité, selon que la production fasse l'objet ou non d'une certification.

La possibilité de réaliser des contrôles de résistance à l'aide d'éprouvettes soit cylindriques, soit cubiques, est admise par la norme NF EN 206-1.

2.3.5 - Classes d'exposition

La norme NF EN 206-1 définit 18 classes d'exposition regroupées par risque de corrosion ou d'attaques dépendant des actions et conditions environnementales auxquelles le béton de l'ouvrage, ou de la partie de l'ouvrage, est soumis. À ces classes sont associées des exigences minimales que le béton doit respecter. En France, la spécification de la classe d'exposition doit être suivie du sigle F (l'Annexe Nationale a adapté les classes d'exposition définies dans la norme EN 206-1 au contexte climatique et géographique français).

Un même béton peut être soumis à plusieurs classes d'exposition différentes.

Dans ce cas, le béton doit respecter la sélection des plus sévères exigences définies pour chaque classe.



► **Classes d'exposition "courantes"**

Elles correspondent aux expositions rencontrées le plus fréquemment dans les ouvrages de bâtiment et de génie civil ; la présentation qui en est faite ci-dessous a été retenue par souci de simplification et ne correspond pas à un regroupement opéré par la norme NF EN 206-1, ni par son Annexe Nationale.

• **X0 : Aucun risque de corrosion, ni d'attaque (gel/dégel, abrasion, attaque chimique)**

Cette classe ne peut concerner que les bétons non armés ou faiblement armés avec un enrobage d'au moins 5 cm.

• **XC : Corrosion induite par carbonatation**

Ces classes s'appliquent au béton contenant des armatures et exposé à l'air et à l'humidité. Les conditions d'humidité peuvent être considérées comme le reflet de l'humidité ambiante, sauf s'il existe une barrière entre le béton et son environnement.

Les conditions d'humidité définissent les quatre classes d'exposition suivantes :

- > XC1 : Sec ou humide en permanence.
- > XC2 : Humide rarement sec (mêmes exigences minimales que pour XC1 en France).
- > XC3 : Humidité modérée (mêmes exigences minimales que pour XF1 en France).
- > XC4 : Alternance d'humidité et de séchage (mêmes exigences minimales que pour XF1 en France).

Pour les ouvrages d'art, les bétons exposés à l'air situés en atmosphère extérieure relèvent de la classe d'exposition XC4 (fascicule 65).

• **XF : Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage.**

Ces classes s'appliquent lorsque le béton est soumis à une attaque significative due à des cycles de gel/dégel alors qu'il est mouillé :

- > XF1 : Faible saturation en eau sans agent de déverglaçage.
- > XF2 : Faible saturation en eau avec agents de déverglaçage.
- > XF3 : Forte saturation en eau sans agent de déverglaçage.
- > XF4 : Forte saturation en eau avec agents de déverglaçage.

En France, sauf spécifications particulières fondées sur l'état de saturation en eau du béton, les classes d'exposition XF1 à XF4 sont indiquées sur la carte des zones de gel ci-après.

> Carte des zones de gel

(précisée par canton et par commune dans le fascicule de documentation FD P 18-326) :

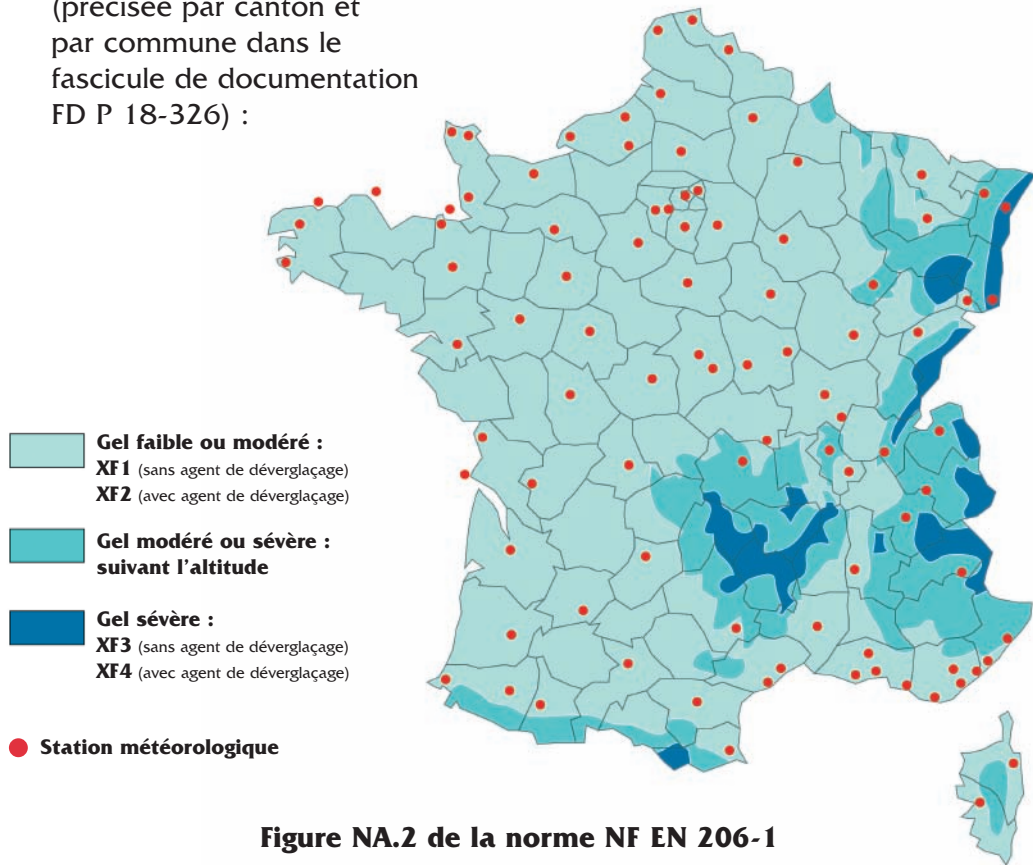


Figure NA.2 de la norme NF EN 206-1

Pour les classes d'exposition courantes, les valeurs limites spécifiées sont les suivantes :

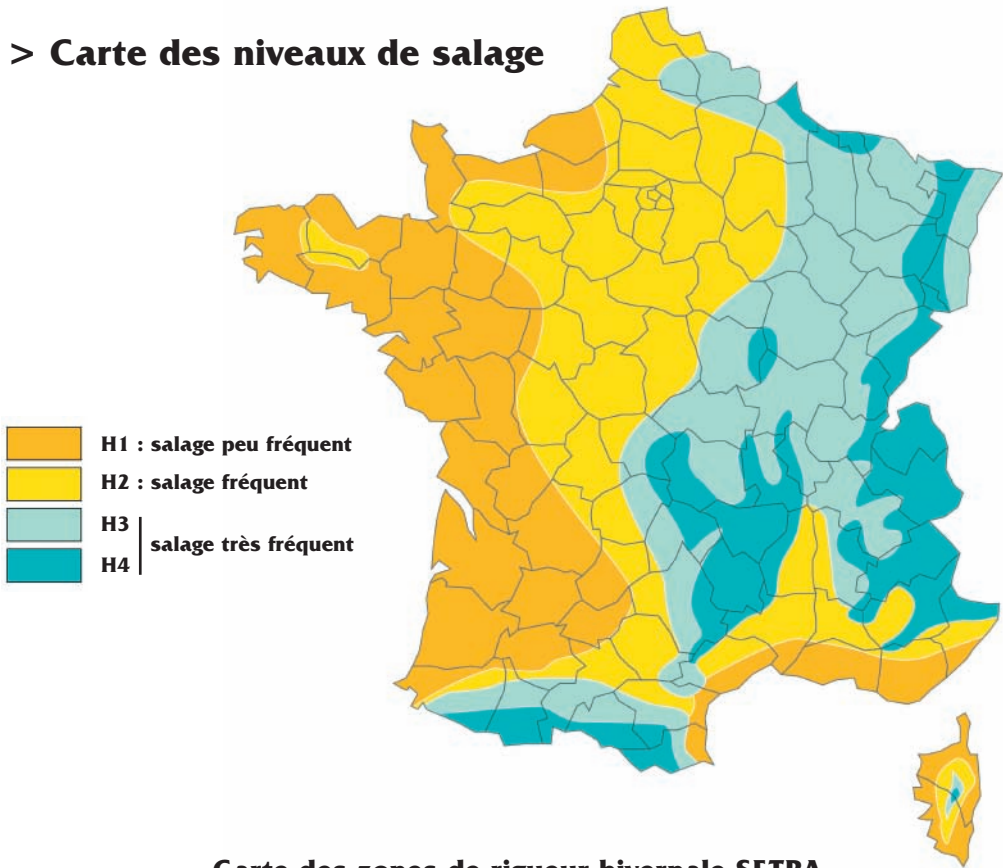
Tableau n°4 : Valeurs limites spécifiées pour les classes d'exposition courantes						
Classes d'exposition	X0	XC1/XC2	XF1 XC2, XC4, XD1	XF2	XF3	XF4
E_{EFF}/Liant équivalent maximal	-	0,65	0,60	0,55	0,55	0,45
Classe de résistance minimale	-	C20/25	C25/30	C25/30	C25/30	C30/37
Teneur minimale en liant équivalent (kg/m³)	150	260	280	300	315	340
Teneur minimale en air (%)	-	-	-	4	4	4
Additions maximales ex : cendres volantes	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,15

Cas des ouvrages d'art

Prise en compte des attaques gel/dégel.

En complément de la carte des zones de gel définie par la figure NA.2 de la norme NF EN 206-1 (cf p. 19), le Fascicule 65 précise les classes à prendre en compte en fonction du niveau de salage de l'itinéraire sur lequel est situé l'ouvrage.

> Carte des niveaux de salage



Carte des zones de rigueur hivernale SETRA

Tableau n°6 : Classes d'exposition à retenir en fonction du lieu de l'ouvrage

	Zones de gel modéré	Zone de gel sévère
Salage peu fréquent	XF1	XF3
Salage fréquent	XD3 +XD2 (pour les parties d'ouvrage très exposées)	XF4
Salage très fréquent	XF4	XF4

► Classes d'exposition "particulières"

Ces classes concernent des ouvrages exposés à l'eau de mer, à des chlorures ou à des milieux chimiquement agressifs.

• **XS : Corrosion induite par des chlorures présents dans l'eau de mer.**

Ces classes s'appliquent lorsque le béton, contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées, est soumis aux chlorures présents dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin.

Les différentes classes d'exposition sont :

- > XS1 : Exposé à l'air véhiculant du sel marin mais pas en contact direct avec l'eau de mer. Cette classe est à utiliser pour les structures situées à moins de 1 km de la côte (AN).
- > XS2 : Immergé en permanence.
- > XS3 : Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns.

• **XD : Corrosion induite par des chlorures ayant une origine autre que marine.**

Ces classes s'appliquent lorsque le béton, contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées, est soumis au contact d'une eau autre que marine, contenant des chlorures, y compris des sels de déverglaçage entraînés par des véhicules.

Les différentes classes d'exposition sont :

- > XD1 : Humidité modérée.
- > XD2 : Humide, rarement sec.
- > XD3 : Alternance d'humidité et de séchage.

• **XA : Attaque chimique.**

Ces classes s'appliquent lorsque le béton est exposé aux attaques chimiques, se produisant dans les sols naturels, les eaux de surface ou les eaux souterraines :

- > XA1 : Environnement à faible agressivité chimique.
- > XA2 : Environnement d'agressivité chimique modérée.
- > XA3 : Environnement à forte agressivité chimique.



Nota

Le tableau 2 de la norme NF EN 206-1, article 4.1, définit les valeurs limites des paramètres correspondants aux attaques chimiques des sols naturels et des eaux souterraines.

Nota

Le Fascicule de Documentation FD P 18-011 fournit des recommandations complémentaires aux exigences de la norme NF EN 206-1, pour les bétons soumis aux environnements chimiques agressifs.

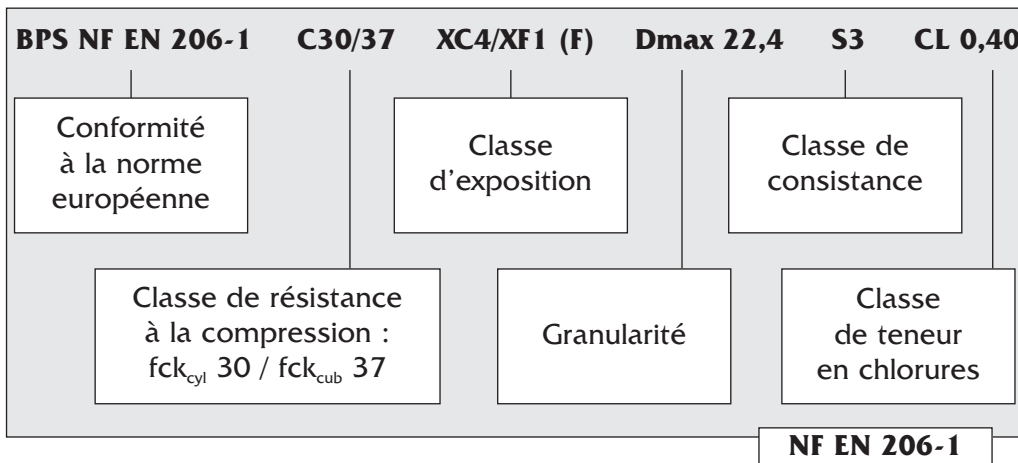
Pour les classes d'exposition particulières, les valeurs limites spécifiées sont les suivantes :

Tableau n°5 : Valeurs limites spécifiées pour les classes d'exposition particulières

Classes d'exposition	MARINS		CHLORES		CHIMIQUES		
	XS2/XS1	XS3	XD2	XD3	XA1	XA2	XA3
E_{EFF}/Liant équivalent maximale	0,55	0,50	0,55	0,50	0,55	0,50	0,45
Classe de résistance minimale	C30/37	C35/45	C30/37	C35/45	C30/37	C35/45	C40/50
Teneur minimale en liant équivalent (kg/m³)	330	350	330	350	330	350	385
Teneur minimale en air (%)	-	-	-	-	-	-	-
Additions maxi ex : cendres volantes	0,15	0,15	0,15	0,15	0,30	0,15	0,00
Nature ciment	PM	PM	-	-	-	-	

P18-011

Désignation d'un BPS conforme à la norme NF EN 206-1 :



Prise en compte de la durabilité.

Le Fascicule 65 précise (chapitre 8, article 8.1. 22) :

“Sauf dispositions différentes du marché, les spécifications destinées à assurer la durabilité du béton sont celles données dans la norme de référence, complétées par les spécifications suivantes”.

Tableau n°7 : Extrait des spécifications complémentaires du Fascicule 65						
Classes d'exposition	XC1-XC2-XC3		XC4 XS1-XS2 XD1-XD2 XF1-XF2 XA1	XF3	XS3 XD3 XA2	XF4
	E_{EFF} /Liant équivalent maximal	0,55		0,50	0,50	0,45
Classe de résistance minimale	BA	C25/30	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45
	BP	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C35/45
Teneur minimale en liant équivalent (kg/m ³) [1]	280		330	385	350	385

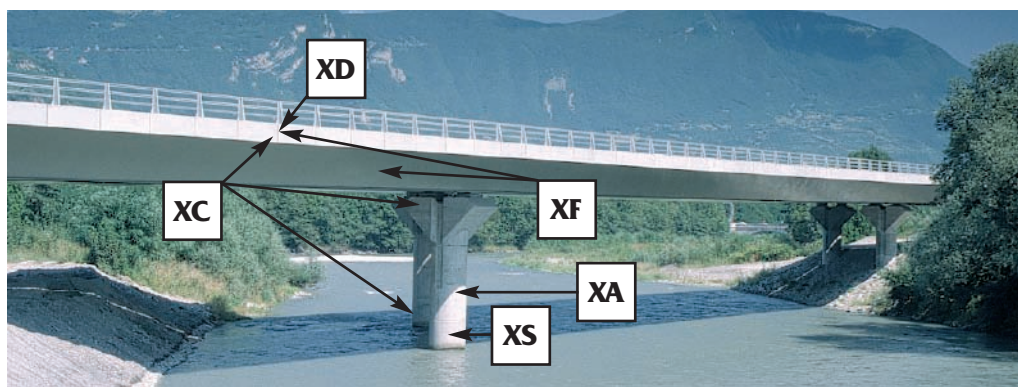
[1] Pour les bétons relevant de la classe d'exposition XF3 ou XF4, il est autorisé de réduire les dosages en liant équivalent en dessous de 385 kg/m³, dans la limite de 350 kg/m³ pour la classe XF3 et de 370 kg/m³ pour la classe XF4, sous réserve de justifier de la résistance au gel interne.

Sauf disposition différente du marché, pour les bétons soumis aux classes d'exposition XF2 et XF4, le ciment utilisé doit avoir le caractère PM ou ES. Il en est de même en classe d'exposition XD, si l'agression par les chlorures provient de sels de déverglaçage ou d'agents agressifs contenant des sulfates.

Pour les bétons ne relevant pas des classes XF3, XF4, ou XA, il est autorisé de modifier les spécifications relatives au dosage en liant équivalent sous réserve de justifier, par une approche performantielle validée, la durabilité du béton.

Pour la classe d'exposition XA3, le prescripteur réalise une étude spécifique prenant en compte l'agressivité du milieu, sur la base des données fournies par le maître d'ouvrage.

Exemple de classes d'exposition.





Chapitre

3

Les Eurocodes

3.1 - Présentation et objectifs des Eurocodes

3.2 - L'Eurocode 2 : NF EN 1992

**3.3 - La philosophie de l'enrobage
suivant l'Eurocode 2**

3.1 - Présentation et objectifs des Eurocodes

- ▶ Les EUROCODES sont des normes européennes de conception et de calcul pour les bâtiments et les ouvrages de génie civil.
- ▶ Ils fournissent une série de méthodes et de règles techniques communes pour calculer la résistance mécanique des éléments ayant une fonction structurelle dans un ouvrage de construction.
- ▶ Ils concernent les aspects techniques du calcul structural et du calcul au feu.

Les EUROCODES définissent des exigences fondamentales pour atteindre des niveaux de performance appropriés en matière de fiabilité des constructions dont les 4 composantes sont :

- ▶ la SÉCURITÉ STRUCTURALE pour les personnes, les animaux domestiques...
- ▶ l'APTITUDE AU SERVICE, fonctionnement, confort...
- ▶ la ROBUSTESSE en cas de situations accidentelles ;
- ▶ la DURABILITÉ, compte tenu des conditions environnementales auxquelles sont soumis les ouvrages pendant leur durée de service.

Les EUROCODES sont moins directifs que les règlements antérieurs, ils laissent au concepteur et au calculateur plus de liberté dans le choix des méthodes et un plus haut niveau de responsabilité. Le concepteur doit choisir ses méthodes de calcul en fonction de la complexité du problème à traiter.

Les EUROCODES sont des normes modernes qui supposent que :

- ▶ le choix du système structural et le projet de structure sont réalisés par un personnel suffisamment qualifié et expérimenté ;
- ▶ l'exécution est confiée à un personnel suffisamment compétent et expérimenté ;
- ▶ une surveillance et une maîtrise de la qualité adéquates sont assurées au cours du travail, à savoir dans les bureaux d'études, les usines, les entreprises et sur le chantier ;
- ▶ la structure bénéficiera de la maintenance adéquate ;
- ▶ l'utilisation de la structure sera conforme aux hypothèses admises dans le projet.

Une brève histoire des Eurocodes :

- ▶▶ 1971-1976
 - Directive marchés publics de travaux (1971)
 - Étude d'un projet de référentiel technique européen pour le jugement des appels d'offres
- ▶▶ 1976-1990
 - Rédaction d'un premier ensemble de textes (Eurocodes)
 - Enquêtes internationales (1980)
 - Directives Produits de Construction (1989)
 - Transfert au CEN
- ▶▶ 1990-1998
 - Travaux de mise sous forme normative des premiers Eurocodes (normes provisoires ENV)
- ▶▶ 1998-2005
 - Transformation des Eurocodes provisoires (ENV) en normes EN
- ▶▶ 2006
 - Maintenance et évolution des Eurocodes

L'ensemble des EUROCODES est constitué de 10 documents :

NF EN 1990 Eurocode 0 : Bases de calcul des structures

NF EN 1991 Eurocode 1 : Actions sur les structures

NF EN 1992 Eurocode 2 : Calcul des structures en béton

NF EN 1993 Eurocode 3 : Calcul des structures en acier

NF EN 1994 Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton

NF EN 1995 Eurocode 5 : Calcul des structures en bois

NF EN 1996 Eurocode 6 : Calcul des structures en maçonnerie

NF EN 1997 Eurocode 7 : Calcul géotechnique

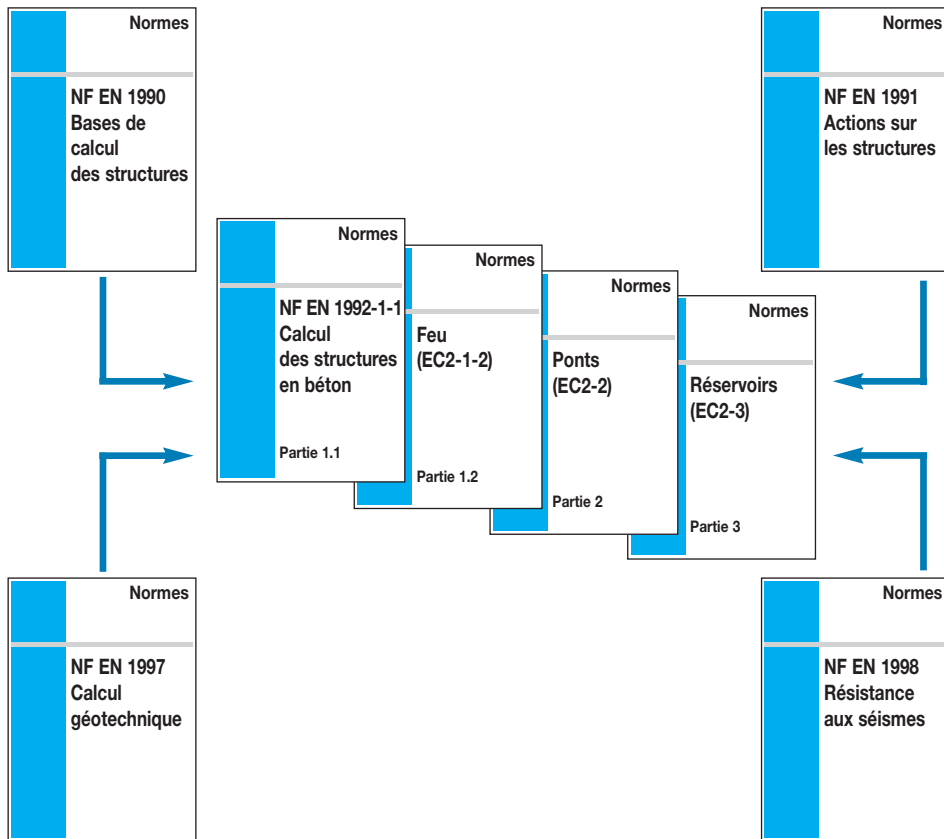
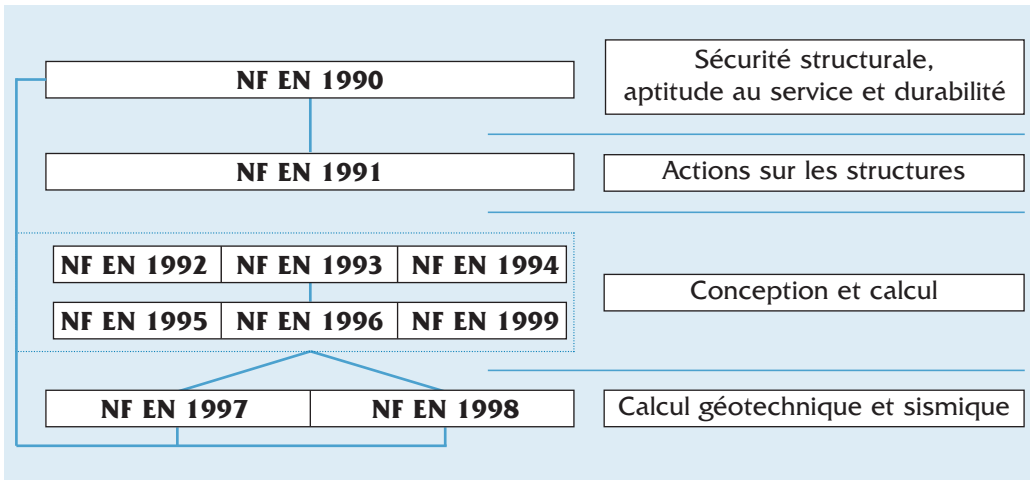
NF EN 1998 Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes

NF EN 1999 Eurocode 9 : Calcul des structures en alliages d'aluminium

Nota

Les 10 Eurocodes constituent un ensemble de 59 normes (environ 5000 pages).

Liens entre les Eurocodes :

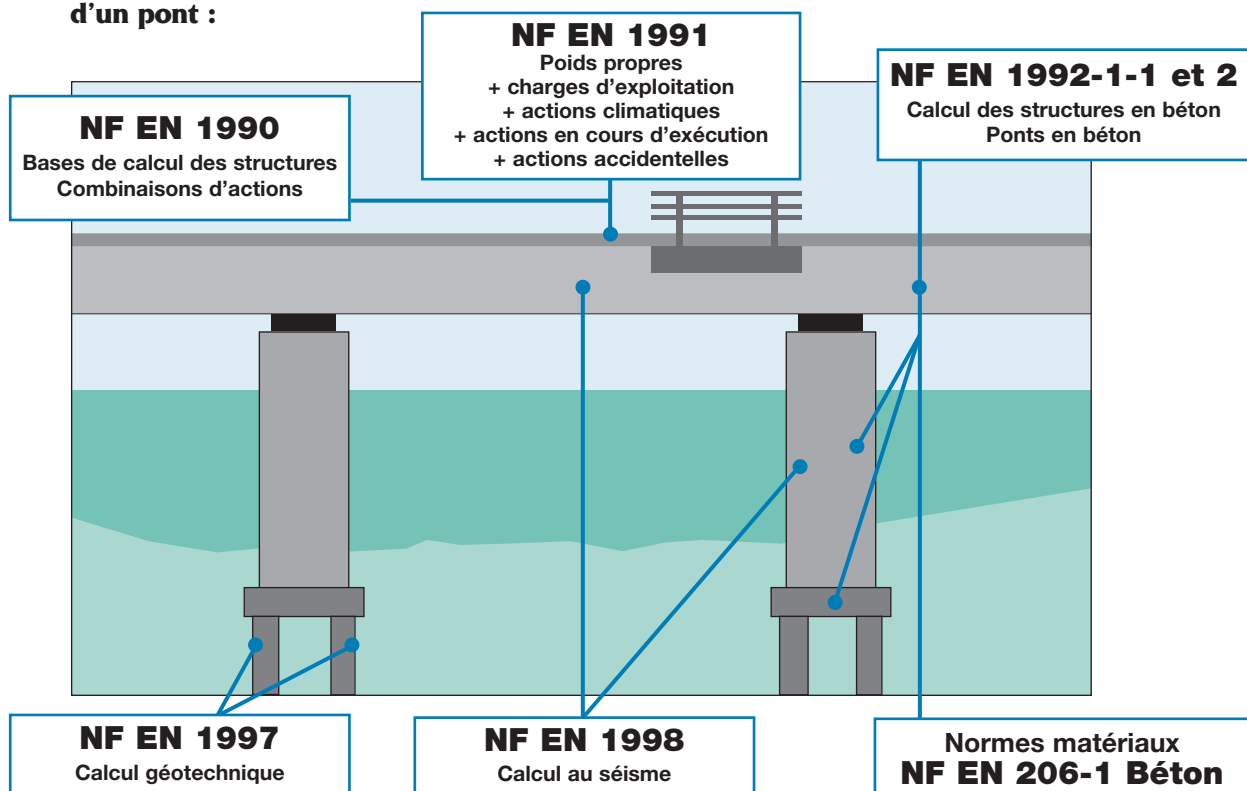


Calcul des structures en béton avec les Eurocodes

3.2 - L'Eurocode 2 : NF EN 1992

- ▶ L'EUROCODE 2 s'applique au calcul des bâtiments et des ouvrages de génie civil en béton armé ou non armé, ou en béton précontraint. Il est conforme aux principes et exigences de sécurité et d'aptitude au service des ouvrages et aux bases de calcul et de vérification données dans l'EUROCODE 0 : Bases de calcul des structures.
- ▶ L'EUROCODE 2 ne traite que ce qui concerne, les exigences de résistance mécanique, d'aptitude au service, de durabilité et de résistance au feu des structures en béton.
- ▶ Comme pour tous les Eurocodes, l'application en France de l'Eurocode 2 ne peut se faire qu'en concomitance avec son Annexe Nationale.
- ▶ Il se décline selon les normes suivantes :
 - NF EN 1992-1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments,
 - NF EN 1992-1-2 : Règles générales - Calcul du comportement au feu,
 - NF EN 1992-2 : Ponts - Calcul et dispositions constructives,
 - NF EN 1992-3 : Silos et réservoirs.
- ▶ Les normes EUROCODE 2 (NF EN 1992 parties 1-1, 1-2, 2 et 3) sont destinées à remplacer :
 - les règles Béton Armé aux États Limites 91 révisées 99 : BAEL,
 - les règles Béton Précontraint aux États Limites 91 révisées 99 : BPEL.

Exemple d'utilisation des divers Eurocodes pour l'application à la conception d'un pont :



3.3 - La philosophie de l'enrobage suivant l'EUROCODE 2

Les recommandations de l'EUROCODE 2 en matière d'enrobage sont novatrices. Elles visent, en conformité avec la norme NF EN 206-1, à optimiser de manière pertinente la durabilité des ouvrages

La détermination de la valeur de l'enrobage doit prendre en compte :

- ▶ la classe d'exposition dans laquelle se trouve l'ouvrage (ou la partie d'ouvrage),
- ▶ la durée d'utilisation de projet attendue,
- ▶ la classe de résistance du béton,
- ▶ le type de systèmes de contrôles qualité mis en œuvre pour assurer la régularité des performances du béton,
- ▶ la nature des armatures (acier au carbone, inox),
- ▶ la maîtrise du positionnement des armatures.

La valeur de l'enrobage peut ainsi être optimisée en particulier :

- ▶ si l'on choisit un béton présentant une classe de résistance à la compression supérieure à la classe de référence (définie par la classe d'exposition),
- ▶ s'il existe un système de contrôle de régularité des performances du béton et de maîtrise du positionnement des armatures.

L'EUROCODE 2 permet aussi de dimensionner l'ouvrage pour une durée d'utilisation de projet supérieure en augmentant la valeur de l'enrobage.

L'optimisation des performances du béton et de l'enrobage des armatures constitue un facteur de progrès essentiel pour garantir la durabilité des ouvrages.

Tableau n°8 : Enrobage minimal en fonction des classes d'exposition (C_{min}, dur mm)

Classe structurale	X0	XC1	XC2 XC3	XC4	XD1 XD2	XD3 XS2	XD3 XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Critères	X0	XC1	XC2 XC3	XC4	XD1 XS1 XA1	XD2 XS2 XA2	XD3 XS3 XA3
Durée d'utilisation de projet de 100 ans	Majoration de 2 points						
Classe de résistance minimale	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C40/50	C40/50	C45/55
	si classe de résistance supérieure, minoration de 1 point						
Maîtrise particulière de la qualité de production du béton	Minoration de 1 point						

Exemple de détermination de l'enrobage minimal en fonction des classes d'exposition et de la classe structurale de l'ouvrage (par exemple pour un bâtiment, une durée d'utilisation de 50 ans correspond à une classe S4).





Chapitre

4

Les nouvelles offres du matériau béton

4.1 - Béton Autoplaçant (BAP)

4.2 - Béton à Hautes Performances (BHP)

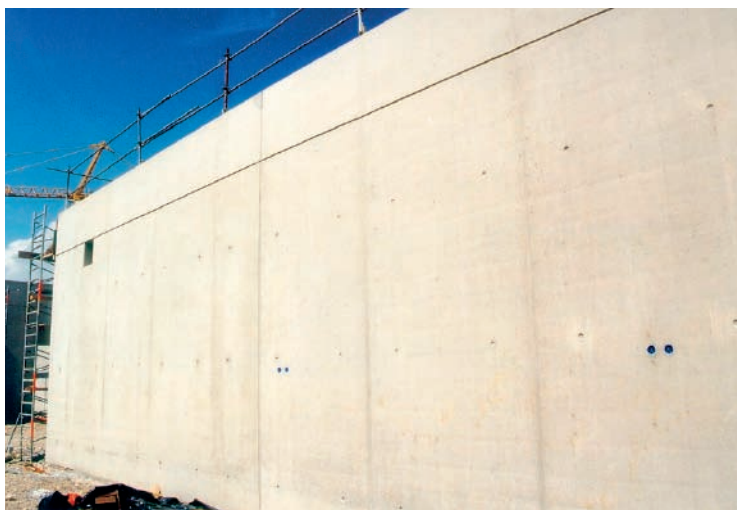
4.1 - Béton Autoplaçant

4.1.1 - Définition

Obtenir un parement esthétique de qualité nécessite un matériau facile à mettre en œuvre, homogène et stable et garantissant un bon remplissage du coffrage.

Les travaux de recherche menés sur l'ouvrabilité des bétons ont permis la mise au point de bétons dits autoplaçants (BAP), répondant à ces critères.

Cette nouvelle famille de bétons a été développée afin d'obtenir un matériau se mettant en œuvre sans faire appel à la vibration, ce qui présente de nombreux avantages sur les chantiers, tant au niveau de la diminution des nuisances sonores que de l'amélioration des conditions de travail du personnel de chantier. Les BAP sont particulièrement adaptés pour les ouvrages de grande hauteur ou de formes complexes et pour les structures très ferrillées. Ces bétons permettent d'obtenir des gains de productivité considérables sur chantier et, bien évidemment, offrent de très bons résultats en matière de qualité esthétique des parements.



Les BAP sont :

- ▶▶ très fluides (Classe de consistance S5 au sens de la norme NF EN 206-1),
- ▶▶ absolument homogènes,
- ▶▶ mis en œuvre sans vibration,
- ▶▶ ils présentent des résistances et des durabilités analogues à celles des bétons traditionnels ou à celles des Bétons à Hautes Performances mis en œuvre par vibration.

Pour être utilisés en structure, ils doivent être conformes à la norme NF EN 206-1. Les prescriptions et normes de conception et de dimensionnement des structures s'appliquent aux BAP.

Ils sont spécifiés par les essais définis au paragraphe 4.1.4.

4.1.2 - Formulation des Bétons Autoplaçants

Les BAP font désormais partie des bétons de formulation courante proposés par les centrales de BPE.

Les BAP doivent présenter une grande fluidité pour pouvoir s'écouler avec un débit suffisant sans apport d'énergie externe (vibration) à travers des zones confinées (armatures). Ils doivent donc offrir une bonne résistance à la ségrégation "dynamique" (en phase de coulage) mais aussi une fois en place (ségrégation "statique") afin de garantir l'homogénéité des caractéristiques et de ne pas présenter de ressuage ou de tassement. Ils doivent aussi être pompables.

Ils doivent être stables sous l'effet de la gravité au cours de l'écoulement et dans les phases précédant la prise et le durcissement et permettre la réalisation de parements de qualité.

La formulation des BAP fait appel à :

- ▶▶ **des superplastifiants** pour obtenir la fluidité souhaitée et quelques fois des agents de viscosité pour maîtriser la ségrégation. Les superplastifiants permettent d'obtenir une meilleure répartition des grains de ciment et assurent le maintien de la fluidité. Les agents de viscosité empêchent le ressuage et limitent la ségrégation en rendant la pâte plus épaisse,
- ▶▶ **une quantité de fines** (ciments, fillers calcaires, cendres volantes) élevée ($\pm 500 \text{ kg/m}^3$) pour assurer une bonne maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage,
- ▶▶ **un faible volume de gravillons** afin d'éviter le "blocage du béton" dans les zones confinées (rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 voire inférieur). Les granulats ont en général un D_{max} compris entre 10 et 16 mm afin d'améliorer l'écoulement,
- ▶▶ **du ciment** (dosage à optimiser pour obtenir les performances souhaitées),

- ▶ un rapport E/C faible et un dosage en eau limité,
- ▶ éventuellement un agent entraîneur d'air pour assurer la protection contre les effets du gel/dégel.

L'optimisation du squelette granulaire est indispensable pour obtenir les caractéristiques nécessaires à la fluidité et à l'écoulement en milieu confiné.

4.1.3 - Fabrication des Bétons Autoplaçants

Les formulations des BAP et leur fabrication nécessitent la mise en œuvre de procédures de fabrication et de contrôles adaptés.



La plupart des malaxeurs peuvent fabriquer des BAP. Le temps de malaxage est toutefois légèrement supérieur à celui d'un béton classique. Il faut que le mélange, riche en éléments fins et en adjuvants, soit le plus homogène possible. Certaines formules peuvent nécessiter des séquences de malaxage spécifiques (ordre d'introduction des consti-

tuants dans le malaxeur, temporisation, temps de malaxage adaptés...).

L'un des points les plus importants de la fabrication est le contrôle strict de la teneur en eau du mélange, par conséquent, il est important de contrôler celle des granulats. La fabrication des BAP nécessite un contrôle renforcé des constituants afin de garantir la régularité des performances.

L'hyperfluidité du béton conduit à prendre des dispositions spécifiques pour éviter des déversements et à adapter l'ouvrabilité au temps de transport et de mise en œuvre.

4.1.4 - Contrôle des Bétons Autoplaçants

Trois principaux essais permettent de caractériser et de contrôler la rhéologie des BAP :

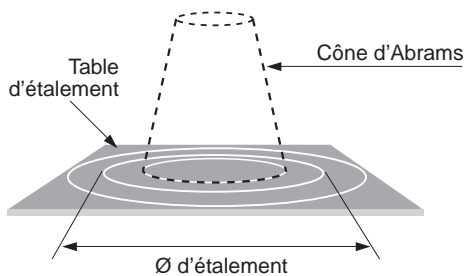
- ▶ La mesure d'étalement au cône d'Abrams

La fluidité des BAP peut être caractérisée par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (essai d'étalement ou slump flow).

Des valeurs cibles de l'ordre de 600 à 750 mm correspondent à l'étalement moyen conseillé d'un BAP. La valeur cible d'étalement doit être définie en fonction des caractéristiques de la formulation et des conditions et méthodes de mise en œuvre.

Cet essai caractérise la mobilité du BAP en milieu non confiné. Il permet en particulier de vérifier la fluidité du béton lors de sa réception sur chantier.

Le matériel utilisé pour pratiquer cet essai est constitué d'un cône d'Abrams posé sur une plaque métallique. L'essai consiste à remplir le cône d'Abrams en une fois, puis à le soulever et à mesurer le diamètre moyen de la galette d'étalement obtenue.

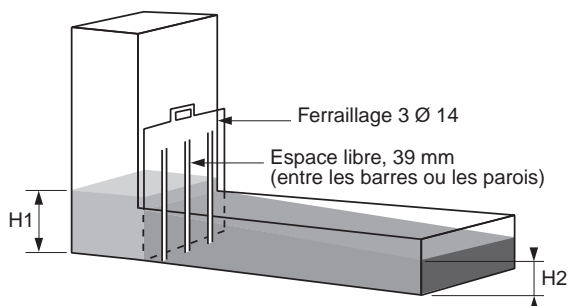


Essai au cône d'Abrams

►► L'essai de la boîte en L, écoulement en milieu confiné

La cohésion du béton, sa mobilité en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armée peuvent se mesurer avec l'essai de la boîte en forme de L. Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures. La méthode consiste à remplir de BAP la partie verticale d'une boîte, puis en levant une trappe, à laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers un ferrailage (le nombre et le diamètre des armatures peuvent être adaptés pour traduire le ferrailage réellement présent dans la structure, ferrailage complexe ou simple). Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans les parties verticales (H1) et horizontales (H2).

Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage $H2/H1$ qui traduit la capacité à circuler en milieu confiné. Une valeur de ce rapport supérieure à 0,8 traduit un bon écoulement du BAP.

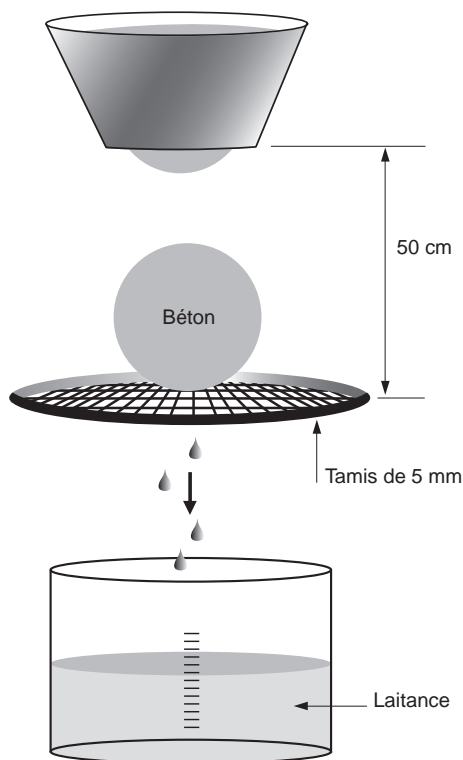


Essai de boîte en L

» L'essai de stabilité au tamis

Cet essai permet d'étudier la résistance à la ségrégation et au ressuage du BAP, qui doit être stable sous l'effet de la gravité. Il consiste à déverser une quantité de béton (2 litres) sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm.

Puis au bout de 2 minutes, on pèse le volume de laitance qui a traversé le tamis. Le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon initial exprime la stabilité du béton. Ce rapport doit être compris entre 10 et 20 %.



Essai au tamis

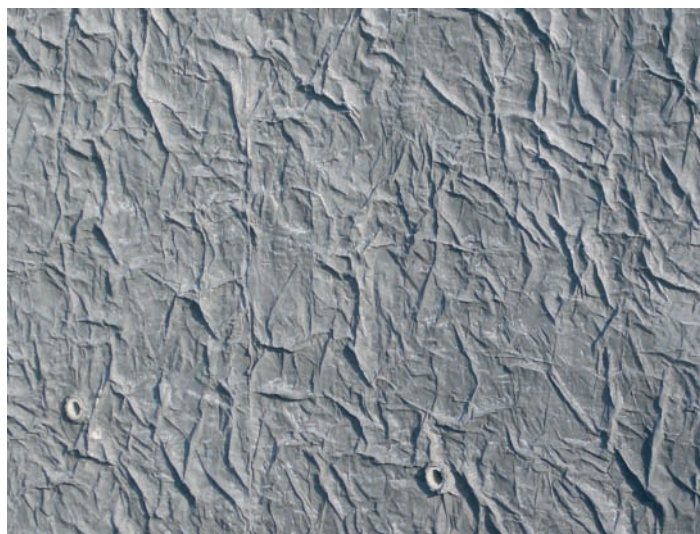
4.1.5 - Atouts des Bétons Autoplaçants pour la réalisation des parements

La fluidité et la cohésion élevée des BAP et l'absence de ségrégation garantissent la réalisation de parements de qualité, une finition soignée, une teinte homogène, l'absence de bullage et de ségrégation ainsi qu'une parfaite netteté des arêtes et des chanfreins, si les modes de mise en œuvre sont adaptés.

L'absence de vibration permet d'assurer de manière naturelle l'homogénéité du BAP dans la masse et donc l'uniformité des textures et des teintes.

La maîtrise des performances des BAP, la facilité et la fiabilité de leur mise en œuvre, garantissent la reproductibilité de l'aspect ainsi que la continuité et l'uniformité des parements au cours du chantier.

L'offre étendue des BAP, des performances mécaniques courantes à très élevées, permet d'obtenir une multitude d'aspects de surfaces, de teintes et de textures.



Les BAP sont au service de l'esthétisme, ils offrent aux architectes de nouvelles libertés de construction et possibilités d'expression :

- ▶ les formes et géométries complexes deviennent possibles à réaliser,
- ▶ les exigences d'esthétisme, d'uniformité des parements et d'homogénéité des teintes peuvent être satisfaites.



L'optimisation des performances des BAP pour la réalisation des parements nécessite :

- ▶ que l'ouvrage soit conçu avec une approche globale lors de la conception, l'organisation du chantier et lors de sa réalisation,
- ▶ que l'entrepreneur, le fournisseur de coffrage et le fournisseur de béton organisent ensemble dans un esprit de partenariat, avant le démarrage du chantier, les procédures et les phasages du bétonnage.

Nota

La faible porosité de surface améliore la résistance aux salissures des parements.

4.1.6 - Autres atouts des Bétons Autoplaçants

L'aptitude des BAP à ne pas nécessiter de vibration pour leur mise en place, engendre toute une chaîne d'avantages en termes de délai d'exécution, de réduction du matériel de chantier, de facilité de mise en œuvre, de remplissage optimal des coffrages, d'amélioration des conditions de travail, de sécurité des ouvriers et des conditions environnementales.

Les temps d'ouvrabilité importants et maîtrisés permettent de réaliser des ouvrages difficiles ou impossibles d'accès pour des systèmes classiques de vibration.

La mise en œuvre sans vibration permet :

- ▶ la suppression des matériels de vibration (aiguilles vibrantes, vibreurs, etc.) et donc la réduction des nuisances sonores et vibratoires sur les chantiers et de la gêne du voisinage ;
- ▶ la suppression des tâches de vibration et donc une réduction de la pénibilité du travail pour les ouvriers sur les chantiers ;
- ▶ l'amélioration de la sécurité des ouvriers, en supprimant des postes de travail à risque (en partie haute des coffrages au moment du bétonnage en particulier).

Les BAP sont particulièrement adaptés pour la réalisation d'ouvrages en zones sensibles soumises à des exigences acoustiques. Ils permettent d'améliorer les conditions d'environnement sur les chantiers.



Les BAP présentent une avancée importante en matière de technologie de construction. Leurs propriétés spécifiques permettent d'optimiser l'organisation des chantiers, conduisant à une amélioration de la productivité et à une réduction des coûts de construction.

Les BAP présentent une avancée importante en matière de technologie de construction. Leurs propriétés spécifiques permettent d'optimiser l'organisation des chantiers, conduisant à une amélioration de la productivité et à une réduction des coûts de construction.

Pour que ces atouts aient vraiment un impact significatif sur l'économie globale d'un chantier, il convient de prendre en compte la "solution BAP" dès la conception du projet.

Les BAP offrent les avantages suivants :

- ▶▶ réduction des temps de bétonnage (augmentation des cadences de coulage, en particulier, grâce à la mise en œuvre possible du béton à la pompe) ;
- ▶▶ facilité de mise en œuvre et gain sur les postes de travail, obtenus par le pompage du béton et la suppression de la vibration ;
- ▶▶ réduction des délais de réalisation du chantier ;
- ▶▶ économie sur les coûts de la main-d'œuvre nécessaire à la vibration ;
- ▶▶ réduction des besoins en matériel ;
- ▶▶ amélioration de la productivité et des cadences ;
- ▶▶ optimisation de la charge d'utilisation de la grue de chantier ;
- ▶▶ réduction des coûts d'entretien des coffrages et des moules ; ces derniers ne sont pas sollicités par les effets de la vibration ;
- ▶▶ réduction de l'encombrement sur chantier ;
- ▶▶ optimisation de l'organisation des chantiers ;
- ▶▶ réduction des nuisances sonores pour l'environnement du chantier et sur le chantier.



Les propriétés rhéologiques des BAP à l'état frais permettent la réalisation de pièces fortement ferrillées et de formes complexes.



La fluidité, la capacité d'écoulement et l'homogénéité des BAP garantissent un enrobage parfait des armatures, une bonne répartition du béton dans des structures fortement ferrillées et un remplissage optimal de tous les recoins des coffrages et des moules quelles que soient leurs formes et leurs dimensions et la densité du ferrailage.

La porosité fermée du matériau et donc sa faible perméabilité à l'eau et à l'air, sont gages de durabilité.

4.1.7 - Projet National Bétons Autoplaçants (PN B@P)

Les travaux du Projet National Bétons Autoplaçants ont porté sur la caractérisation des BAP à l'état frais lors de leur mise en œuvre et à l'état durci.

Les résultats obtenus par des essais en laboratoire et des expérimentations en vraie grandeur ont confirmé que les BAP se distinguent des bétons traditionnels principalement par leurs propriétés à l'état frais. Ils sont comparables à l'état durci aux bétons ordinaires vibrés de même résistance mécanique.

Ces recherches ont permis :

- ▶▶ de valider les tests et essais pertinents de caractérisation des propriétés des BAP à l'état frais (reproductibilité, répétabilité et représentativité des essais) et d'analyser la "sensibilité" des formulations ;
- ▶▶ de définir les recommandations pratiques de fabrication, de mise en œuvre et d'emploi des BAP ;
- ▶▶ d'identifier l'incidence des propriétés des BAP sur le dimensionnement des ouvrages et sur les évolutions des méthodes de construction, afin de valoriser les progrès technologiques et architecturaux offerts ;
- ▶▶ de mesurer la contribution des BAP à l'amélioration des conditions de travail et à la protection de l'environnement.

Le PN B@P a étudié les aspects physico-chimiques de ce nouveau béton dans le cadre d'un programme de recherche fondamentale. Des essais spécifiques ont permis d'améliorer la compréhension des phénomènes de rhéologie et de caractériser les performances du béton frais et du béton durci.

Des méthodes de qualification de la formulation et d'analyse de la sensibilité des BAP aux écarts de composition et principalement aux variations de la teneur en eau, ont aussi été définies.



4.1.8 - Conclusion

Les BAP affirment leurs performances au fil des réalisations, ils s'imposent progressivement et remplaceront dans les prochaines années pour un grand nombre d'applications les bétons mis en œuvre par vibration.

Les BAP sont la réponse à l'évolution :

- ▶▶ des exigences techniques et esthétiques des maîtres d'ouvrage, des maîtres d'œuvre et des architectes,
- ▶▶ des contraintes économiques des entreprises (amélioration de la productivité des chantiers),
- ▶▶ des exigences environnementales liées à la réduction des impacts des chantiers.

Ils contribuent pleinement à l'amélioration des conditions de travail et à la sécurité sur les chantiers.

4.2 - Bétons à Hautes Performances

4.2.1 - Définition

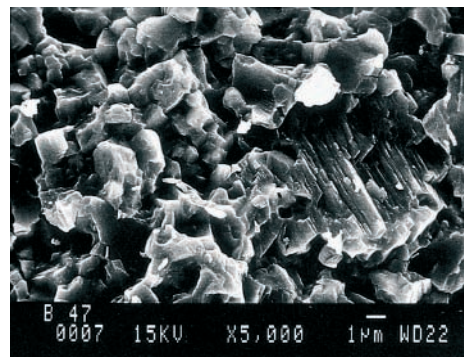
Les Bétons à Hautes Performances (BHP) ont d'abord été utilisés pour leur haute résistance. Cette caractéristique facilement mesurable a fait des progrès spectaculaires à partir des années 80. Elle est passée de 30 à 35 MPa, à plus de 100 MPa pour les Bétons à Très Hautes Performances, voire plus de 200 MPa pour les Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances (BFUP).

Les BHP se caractérisent par :

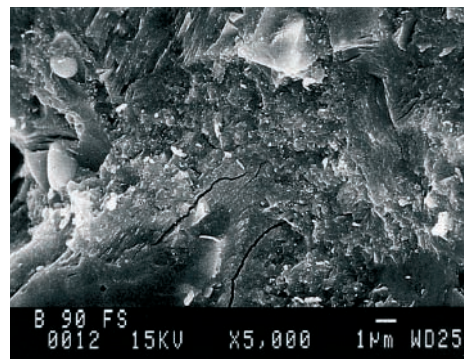
- ▶ une résistance caractéristique à la compression à 28 jours supérieure à 50 MPa sur cylindre,
- ▶ un rapport $E_{eff}/L_{iant\ équiv}$ inférieur à 0,4.

Mais les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés de leur microstructure très dense, d'une forte réduction de leur porosité et d'un réseau capillaire non connecté. Ces bétons sont, en fait, des matériaux à très haute compacité.

Les BHP sont également, du fait de leur porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs et, de façon générale, présentent une durabilité accrue. Ils permettent d'optimiser les structures, de réaliser des ouvrages soumis à des contraintes élevées ou subissant un environnement sévère (climat rigoureux, agressions marines, effets du gel...).



Béton courant



BHP



Nota

La norme NF EN 206-1 BÉTONS "spécifications, performances, production et conformité" définit le BÉTON À HAUTE RÉSISTANCE : "béton appartenant à une classe de résistance à la compression supérieure à C 50/60, s'agissant de béton de masse volumique normale ou de béton lourd, et supérieure à LC 50/55, s'agissant de béton léger".

4.2.2 - Principes de formulation des BHP

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vide. On cherchera donc, pour formuler un BHP, à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire.

La limitation de la porosité implique essentiellement deux conditions :

- ▶▶ une très faible teneur en eau ;
- ▶▶ une granulométrie comportant des éléments fins en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats.

Deux démarches sont généralement associées pour optimiser la formulation d'un BHP :

▶▶ Défloculation des grains de ciment

L'emploi des superplastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange à consistance égale.

Les rapports $E_{\text{eff}}/L_{\text{iant équiv}}$ sont de l'ordre de 0,35 au lieu de 0,45 à 0,50 pour un béton usuel (soit une réduction de la teneur en eau de plus de 30 %).

Les superplastifiants s'opposent à la floculation des grains de ciment, ce qui augmente leur réactivité, facteur en particulier de performances à court terme.

» Optimisation du squelette granulaire

Les performances des BHP peuvent encore être optimisées par l'extension du spectre granulaire grâce, en particulier à l'ajout de particules ultrafines. Les ultrafines les plus utilisées sont les fumées de silice. Elle ont une action sur la granulométrie du mélange, en comblant les micros vides inter-granulaires, mais présentent également une réactivité avec la chaux libre, liée à leur caractère pouzzolanique.

On adaptera également chaque classe granulaire afin d'obtenir un mélange à très haute compacité (les éléments fins remplissant les espaces entre les plus gros granulats).

La première démarche peut-être utilisée seule et permet déjà des gains de propriété importants (en terme de résistance mécanique, on peut ainsi atteindre des bétons de classe de résistance C 60/75). La seconde voie implique obligatoirement le recours simultané à l'emploi de superplastifiants. Elle permet d'obtenir de nouveaux gains de performances.

Quelques exemples de formulation pour 1 m³ de BHP :

PONT DE JOIGNY	
B60 sans fumée de silice	
CEM I 52,5	450 kg
Granulat 6/20	1027 kg
Sable 0/4	648 kg
Sablon	105 kg
Eau	160 l
Superplastifiant	11,25 kg
Retardateur	4,50 kg

VIADUC DU CROZET	
B60 avec fumée de silice	
CEM I 52,5 PM ES	385 kg
Gravillon 5/12	363 kg
Gravillon 12/20	694 kg
Sable 0/5	785 kg
Fumée de silice	31 kg
Eau	140 l
Superplastifiant	4,6 kg

PONT DE JONCHE	
B80 avec fumée de silice	
CEM I 52,5	420 kg
Fumée de silice	35 kg
Gravillon 6/10	250 kg
Gravillon 10/14	730 kg
Sable 0/4	660 kg
Sablon 0/1	140 kg
Eau	152 l
Superplastifiant	7,3 kg

PONT RAIL TGV MEDITERRANEE	
B60 sans fumée de silice	
CEM I CEM I 52,5 R CP 2	425 kg
Gravillon 12,5/20	655 kg
Gravillon 4/12,5	500 kg
Sable 0/4	760 kg
Eau	140 l
Superplastifiant	6 kg

4.2.3 - Constituants des BHP

Les constituants du BHP font l'objet des principales spécifications suivantes :

- ciments : types CEM I, CEM II ou CEM III, classes de résistance conseillées 42,5 ou 52,5 conformes à la norme NF EN 197-1 ;
- granulats : conformes à la norme NF EN 12620 : granulats pour bétons ;
- additions : cendres volantes silico-alumineuses, laitiers de haut-fourneau, additions calcaires, additions siliceuses, ultrafines (fumées de silice) conformes à leurs normes respectives ;
- adjuvants : plastifiants réducteur d'eau et superplastifiants haut réducteur d'eau conformes à la norme NF EN 934-2.

Nota

- Compte tenu des faibles dosages en eau des BHP, il convient de privilégier des granulats peu poreux afin de limiter l'absorption d'eau par les granulats, pour favoriser le maintien rhéologique du béton.
- La réactivité de certains ciments peut entraîner à dosage élevé un dégagement de chaleur relativement important au cours du processus d'hydratation. Dans le cas de pièces massives, il convient de mettre en œuvre des précautions constructives spécifiques pour réguler la température du béton et limiter les élévations de température à cœur.
- Les additions permettent d'optimiser le spectre granulaire et donc la compacité du béton tout en facilitant les possibilités d'écoulement. Certaines ont un pouvoir pouzzolanique ou hydraulique et permettent d'augmenter la résistance du matériau aux agressions chimiques. Les additions les plus performantes en matière de résistances mécaniques sont les fumées de silice (co-produit de l'industrie électrométallurgique du silicium, principalement constitué de dioxyde de silicium SiO_2 , de forme parfaitement sphérique, de diamètre moyen très faible $0,1 \mu\text{m}$), leurs dosages sont de l'ordre de 8 à 10 % du poids du ciment. Elles se combinent avec la chaux, libérée lors de l'hydratation du ciment pour former de nouveaux hydrates.
- Les superplastifiants ont la propriété de défloculer les particules fines et les grains de ciment et d'améliorer leur répartition dans la matrice cimentaire. Ils permettent aussi de supprimer le seuil de cisaillement dans la pâte de ciment à l'état frais. Ainsi, les BHP bien qu'ayant un aspect visqueux et collant s'écoulent facilement. Ils sont en général dosés entre 1 et 3 % de la masse de ciment. Il convient, lors de l'étude de formulation, de vérifier la comptabilité entre le ciment et les adjuvants afin de conserver une ouvrabilité satisfaisante pendant toute la durée de mise en place du béton.
- Le choix du type de ciment est fonction, en particulier, des propriétés liées aux dispositions constructives : exothermie, retrait, résistance au jeune âge et du type d'actions environnementales auquel le béton est soumis (sels de déverglaçage, solutions acides, solutions salines...).

4.2.4 - Contrôle des BHP

Les BHP sont soumis aux mêmes types d'essais que les bétons traditionnels dans le cadre de leur conformité à la norme NF EN 206-1, par exemple :

- ▶▶ **Consistance mesurée au cône d'Abrams**
- ▶▶ **Résistance à la compression**

Divers essais complémentaires permettent de mesurer les propriétés des BHP aussi bien au stade de mise au point de la formulation, que lors des convenances, ou des contrôles sur chantier.

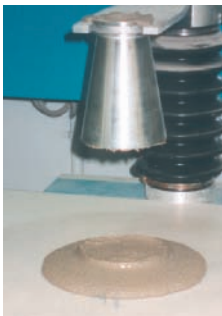
- ▶▶ **Étalement à la table à secousse**
- ▶▶ **Rhéomètre**

Cet essai permet de mesurer, lors de la formulation, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des BHP.

- ▶▶ **Méthode des coulis de l'AFREM**

Cette méthode permet, en particulier, de comparer l'efficacité des adjuvants.

- ▶▶ **Méthode du Mortier de Béton Equivalent (MBE)**



Elle permet, par exemple, d'étudier l'influence de la qualité du sable sur la rhéologie ou d'estimer les dégagements de chaleur.

Par ailleurs, des essais spécifiques ont été développés pour mesurer des paramètres associés à la durabilité des BHP tels que :

- ▶▶ la pénétration des chlorures ;
- ▶▶ la mesure de l'absorption d'eau par capillarité ;
- ▶▶ la microstructure des bétons ;
- ▶▶ la perméabilité au gaz du béton durci ;
- ▶▶ la porosité accessible à l'eau ;
- ▶▶ la mesure de l'épaisseur de béton carbonaté.

4.2.5 - Dimensionnement des structures en BHP

Les BHP présentent des résistances en compression importantes aux jeunes âges, compte tenu de la rapidité de la cinétique de montée en résistance, un BHP de 60 MPa à 28 jours peut ainsi offrir des résistances mécaniques de 15 MPa à 24 heures et 40 MPa à 7 jours.

Les BHP offrent à long terme, des performances mécaniques accrues en compression, traction, flexion et cisaillement qui permettent :

- ▶▶ de simplifier et d'optimiser le dimensionnement et la conception des structures ;
- ▶▶ d'économiser les matières premières à fonctionnalité identique ;
- ▶▶ de réaliser des structures soumises à des sollicitations importantes et à des contraintes élevées ou des ouvrages subissant des environnements agressifs sévères ;
- ▶▶ de diminuer le poids des structures (à portées équivalentes) ou d'augmenter les portées (à poids propre équivalent) tout en limitant les déformations ;
- ▶▶ de concevoir des structures plus élancées.



Les nouvelles normes européennes de dimensionnement des structures en béton (Eurocode 2 : NF EN 1992) permettent la prise en compte des résistances mécaniques des bétons jusqu'à la classe C 90/105.

4.2.6 - Atouts des BHP

Les BHP offrent de nombreux atouts.

▶▶ Des propriétés exceptionnelles à l'état frais

La formulation (à l'aide de superplastifiants) des BHP leur confère une grande fluidité, une ouvrabilité accrue (valeur d'affaissement au cône supérieure à 150 mm pendant plusieurs heures), une aptitude au pompage améliorée, un

maintien de la plasticité dans le temps, et une bonne stabilité à l'état frais, ce qui :

- garantit un bon remplissage des moules et des coffrages et un enrobage parfait des armatures ;
- facilite la mise en œuvre, en particulier dans les zones très ferrillées ;
- améliore le rendement de mise en place du béton (il en résulte une réduction du délai d'exécution de l'ouvrage et un gain sur le coût de la main d'œuvre) ;
- permet des bétonnages complexes dans des conditions d'accès difficiles.

Les BHP présentent aussi :

- une bonne stabilité à l'état frais, ce qui garantit l'absence de ségrégation ;
- une faible viscosité, qui autorise le pompage sur de longues distances.

► **Des performances élevées aux jeunes âges**

Les caractéristiques physico-chimiques et la cinétique spécifique de durcissement des BHP leur confèrent des résistances mécaniques importantes aux jeunes âges ce qui autorise :

- des décintrements et des décoffrages rapides et une accélération et optimisation des cycles de coffrage/décoffrage ;
- des délais avant mise en tension des armatures de précontrainte raccourcis ;
- une accélération et une optimisation des cadences de fabrication.

Il en résulte une simplification et une approche différente de l'organisation des chantiers, une augmentation de la productivité et des gains significatifs sur les délais de construction des ouvrages.

► **Des résistances mécaniques importantes à long terme**

Les BHP offrent des performances mécaniques élevées à long terme.

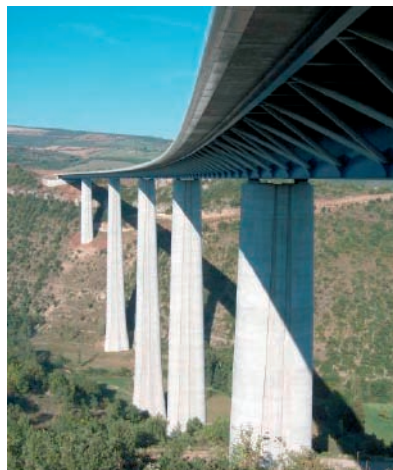
Ces performances, qui découlent en particulier de sa faible porosité peu connectée, se traduisent par :

- une meilleure adhérence acier/béton ;
- un fluage inférieur à celui des bétons ordinaires ;
- une augmentation du module d'élasticité ;
- une diminution des sections de béton ;
- une résistance importante aux agents agressifs ;

- un faible risque de corrosion des armatures ;
- une forte résistance aux cycles de gel/dégel ;
- une faible perméabilité.

Ces gains de performance se traduisent par un coût d'entretien réduit pendant la durée d'utilisation de l'ouvrage.

La durabilité est améliorée du fait de la très faible porosité. On constate, en particulier, une amélioration de la résistance aux agressions chimiques, qui se traduit par un comportement favorable en milieu marin ou en présence d'eaux agressives. La progression de la carbonatation en profondeur est réduite, ce qui assure une meilleure protection des armatures. Les BHP présentent généralement une résistance au cycle de gel/dégel améliorée. L'ensemble des résistances mécaniques (compression, traction) est augmenté, alors que les déformations sous charges instantanées et surtout sous charges permanentes sont diminuées.



4.2.7 - Projet National BHP 2000

Le Projet National BHP 2000 a associé une cinquantaine de partenaires, chercheurs, universitaires, industriels, fournisseurs de matériaux, experts des laboratoires, des bureaux d'études ou des entreprises, maîtres d'œuvre et maîtres d'ouvrage.

Les recherches de développement menées dans le cadre de ce Projet National ont abouti à des avancées scientifiques importantes et ont permis de connaître parfaitement le comportement des BHP. Des essais accélérés réalisés en laboratoire et des expériences à long terme dans divers types d'environnements chimiquement agressifs ont permis de valider la durabilité des ouvrages en béton armé et en béton précontraint.

Les principaux thèmes de recherche ont permis d'analyser, en particulier, son comportement en retrait et en fluage au jeune âge, son comportement au feu, son association avec des armatures à hautes performances.

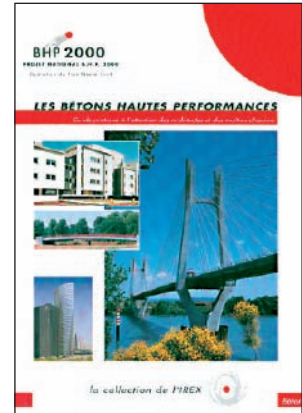
Les recherches ont fait l'objet d'études expérimentales, d'études de vieillissement sur sites naturels particulièrement exposés à des agressions sévères et de suivis expérimentaux sur des ouvrages réels.

Elles ont abouti à l'élaboration de règles de calcul : lois d'adhérence, résistances aux divers états limites, incidence sur les dispositions constructives et à la rédaction de nombreux ouvrages dont des guides pratiques d'utilisation et de dimensionnement.

4.2.8 - Conclusions

La formulation et la fabrication de bétons dont la résistance en compression à 28 jours atteint plus de 50 MPa voire 80 MPa est aujourd'hui de pratique courante en France et n'est plus du domaine expérimental. De nombreux ouvrages ont été exécutés en BHP ces dernières années.

Cette "banalisation" des BHP est rendue possible par la disponibilité du produit au sein du réseau des centrales de BPE de manière homogène en France. Ces BHP sont en général formulés avec des granulats locaux. Les centrales à béton sont équipées des automatismes, des process de fabrication, des procédés de dosages et des procédures de contrôle rigoureuses assurant la



reproductibilité des caractéristiques et la maîtrise de la fabrication des BHP. Le réseau BPE a fait la preuve depuis plusieurs années à l'occasion de nombreux chantiers de sa pleine maîtrise industrielle des BHP et de sa capacité à livrer tous types de chantier.

Nota

Le malaxage d'un BHP doit généralement être prolongé par rapport à celui d'un béton courant.

Le BHP requiert un niveau de qualité de fabrication important compte tenu de la sensibilité de son comportement aux variations de proportion des constituants, en particulier du dosage en eau.

De nombreux atouts justifient l'utilisation, la compétitivité économique et la banalisation de l'emploi des BHP pour les ouvrages courants.

» En phase de conception

- Simplification des sections.
- Simplification des ferrailages.
- Optimisation possible de la géométrie de l'ouvrage.
- Allègement des structures.

» En phase de construction

- Économie de matière (granulats en particulier).
- Gain de poids, donc simplification des fondations et des méthodes de construction.
- Réduction des délais d'exécution.
- Optimisation des cycles de construction et de la productivité.
- Minimisation de l'incidence des intempéries sur les phasages de construction.



▶▶ **En phase de service**

- Durabilité augmentée.
- Frais d'entretien réduit.
- Allongement de la durée d'exploitation de l'ouvrage.
- Maintenance réduite.

Il en résulte des ouvrages plus durables, nécessitant moins d'entretien à des coûts globaux comparables.



Chapitre

5

Techniques de mise en œuvre

5.1 - Pompage du béton

5.2 - Mise en œuvre des Bétons Autoplaçants

5.3 - Mise en œuvre des Bétons à Hautes Performances

5.1 - Pompage du béton

Lors de la conception et de la réalisation d'un projet, de nombreux paramètres doivent être maîtrisés pour obtenir un rendu final conforme aux attentes des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'œuvre et à la volonté esthétique des architectes. Parmi ces paramètres, la mise en œuvre du béton occupe une place prépondérante. Le pompage du béton est l'une des solutions qui permet d'optimiser la qualité de la mise en œuvre.

5.1.1 - Procédé de pompage

La technique de pompage du béton consiste à refouler, par l'intermédiaire d'une pompe, le béton dans une tuyauterie.

Le béton est préalablement "agité" dans la trémie de réception de la pompe, dès sa sortie du camion malaxeur.

Le cheminement du béton dans la tuyauterie se fait grâce à un cycle aspiration/poussée, à l'aide de deux pistons reliés à deux vérins hydrauliques évoluant à l'intérieur de deux cylindres appelés "chemises" (le premier vérin remonte dans sa chemise : aspiration du béton, simultanément, le second vérin descend : poussée du béton).

Le nombre de cycles par minute "aspiration/poussée" permet de définir la cadence de pompage en mètres cubes par heure.

Nota

Le débit courant des pompes varie entre 20 et 150 m³ par heure.

5.1.2 - Matériels de pompage

Deux types de pompes existent aujourd'hui sur le marché : les pompes automotrices à tuyaux ou à flèche de répartition et les pompes stationnaires. Ces dernières sont plus spécialement utilisées en poste fixe sur des chantiers de longue durée. Dans ce cas, le béton est transporté dans des tuyauteries posées au sol qui alimentent un mât de bétonnage ou simplement, assurent le remplissage d'un coffrage.



Deux systèmes de pompage complètent la gamme de l'offre en matériel :

- ▶▶ **la pompe à pistons** qui permet d'obtenir des débits de pompage importants avec des bétons de consistance S 2 ;
- ▶▶ **la pompe à rotor** qui est plus adaptée aux pompages délicats, tel que le pompage des bétons spéciaux (béton léger, béton autoplaçant, etc...).

5.1.3 - Atouts du pompage du béton

Le bétonnage par pompage offre à l'utilisateur de nombreux atouts :

▶▶ **Qualité du parement**

Compte tenu du procédé de pompage, les caractéristiques initiales du matériau béton sont préservées lors de son transport dans la tuyauterie de la pompe à béton.

Le béton, à partir de la sortie de la flèche jusqu'au point de bétonnage, est guidé par un tuyau flexible, il coule en continu jusqu'à son emplacement définitif et conserve ainsi toute son homogénéité.

Dans le cas de bétonnage dans un coffrage, le tuyau flexible est descendu au point bas du coffrage. Il est remonté simultanément avec le béton au fur et à mesure du remplissage du coffrage, ce qui permet d'éviter toute chute du béton.

Le pompage permet de mettre en œuvre, dans les coffrages, des bétons de consistance et de caractéristiques à l'état frais plus homogènes.

La mise en œuvre du béton à la pompe permet aussi d'éviter les reprises de bétonnage et d'assurer l'homogénéité des parements.

►► Rapidité de mise en œuvre

Le pompage permet d'accélérer la mise en œuvre du béton.

Lors du bétonnage dans un coffrage, le gain de temps de coulage est essentiellement dû à l'apport important et rapide de béton.

Le tuyau de la flèche reste en place à l'intérieur du coffrage jusqu'à la fin du remplissage, contrairement au bétonnage à la grue qui nécessite des rotations de remplissage/vidange de la benne à béton dont la capacité est limitée à la performance de la grue.

Le bétonnage à la pompe permet de libérer la grue de chantier qui peut ainsi être affectée à d'autres tâches.



►► Accessibilité

L'accès aux différents points de coulage d'un ouvrage est facilité par l'éventail de longueurs de flèches (20 mètres à près de 50 mètres de portée) proposées par les entreprises adhérentes au Syndicat National du Pompage du Béton (SNPB).

Dans le cas d'un tablier de pont, le pompage permet d'amener le béton avec précision au bon endroit. Il est possible d'installer une ou plusieurs pompes en fonction des caractéristiques géométriques de l'ouvrage, du plan de bétonnage et de la cadence de pompage retenue par l'entreprise et imposée par le système d'étalement afin d'assurer une bonne répartition des charges sur l'ouvrage en cours de bétonnage.

Le pompage permet également de mettre en place du béton dans des zones ou des coffrages difficilement accessibles.

5.1.4 - Utilisation des pompes à béton

Le choix du matériel de pompage à utiliser est fonction :

- de la partie d'ouvrage à bétonner (semelles, piles, culées, chevêtres, tablier...),
- des contraintes d'accessibilité du point de bétonnage (pour définir la longueur de flèche),
- et de la cadence de bétonnage souhaitée.

La longueur de flèche doit être adaptée aux caractéristiques géométriques de l'ouvrage et à l'emplacement de la ou des pompes.

Le choix du débit de la pompe est fonction de la capacité de production de la centrale BPE et du nombre de camions malaxeurs affectés à l'approvisionnement du chantier. Cette logistique doit être adaptée à la cadence théorique de bétonnage prévue par l'entreprise qui dépend du personnel et du matériel destinés à la mise en œuvre du béton sur l'ouvrage.

» Configuration du chantier

Dans le cas d'utilisation d'une seule pompe, le bétonnage débutera, en principe, à partir d'une culée, du point bas de l'ouvrage vers son point haut.

En cas d'utilisation de plusieurs pompes et selon le type d'ouvrage, elles peuvent être disposées au niveau et de chaque côté des culées. Le bétonnage se fait du centre de l'ouvrage vers les culées ou, plus rarement, des culées vers le centre. Elles peuvent aussi être installées à un niveau inférieur à celui du tablier à couler.



» Essais de convenance

Dans la majorité des chantiers d'ouvrages d'art, un essai de convenance est nécessaire pour valider la pompabilité de la formule de béton dans le contexte du chantier.

Ces essais permettent d'optimiser à la fois la composition du béton (ouvrabilité, consistance), la capacité et le débit de la pompe, la configuration des installations ainsi que le mode opératoire du pompage.

Nota

Pour éviter la formation d'un bouchon au démarrage de l'opération de pompage, il convient de pomper préalablement de la "barbotine" (mélange de ciment et d'eau ou produit équivalent) dont la quantité à utiliser est à adapter en fonction de la longueur de la flèche de la pompe. Cette barbotine ne doit pas être déversée sur le tablier ou dans le coffrage.

5.1.5 - Positionnement de la pompe, respect des consignes de sécurité

Le positionnement de la pompe doit prendre en compte son environnement au sol, le gabarit aérien disponible, ainsi que les contraintes de coulage.

» Risques électriques

En cas de présence d'une ligne électrique au-dessus de la zone d'implantation de la pompe, il convient d'identifier la tension de la ligne et de contacter les responsables d'EDF pour demander la coupure ou l'isolation temporaire de l'alimentation de cette ligne. En cas d'impossibilité de coupure, l'opérateur de la pompe devra respecter les distances d'approche conseillées de la ligne :

- minimum 3 mètres de distance pour 20000 volts,
- minimum 5 mètres pour 400000 volts.

Nota

En cas de pluie ou de brouillard, ces distances doivent être augmentées de 2 mètres au minimum.

Il est recommandé d'utiliser des pompes équipées de moyens de détection de champs électriques qui permettent d'alerter en permanence le conducteur de la pompe de la proximité d'une ligne électrique. Ces dispositifs ne constituent néanmoins qu'une aide à la conduite et non une sécurité absolue.

» Sécurité au sol dans l'environnement immédiat de la pompe

L'accès à l'aire de bétonnage (emplacement de la pompe et aire de manœuvre des toupies) doit être dégagé de tout obstacle pouvant :

- gêner l'approche des camions malaxeurs ;
- gêner les manœuvres de la flèche de la pompe ;
- provoquer un accident corporel au personnel évoluant dans cette zone (par exemple, le personnel de laboratoire chargé d'effectuer les prélèvements pour la confection des éprouvettes de contrôle du béton ou le personnel chargé de guider la toupie).

Si la surface de l'aire de bétonnage le permet, il est intéressant de positionner deux toupies à l'arrière de la pompe pour améliorer la cadence de coulage en optimisant le temps de manœuvre des toupies.

5.2 - Mise en œuvre des Bétons Autoplaçants

D'une manière générale les contraintes de mise en œuvre des BAP sont nettement plus faibles que celles des bétons mis en œuvre par vibration, grâce à sa facilité de coulage sur de longues distances et de grandes hauteurs.

Les propriétés d'écoulement des BAP donnent lieu à la mise en place de nouvelles procédures de remplissage des coffrages. Les caractéristiques du BAP autorisent des cheminements horizontaux importants.

Le pompage permet une mise en œuvre plus rapide du béton. L'extrême fluidité des BAP nécessite de soigner particulièrement l'étanchéité des coffrages. Il est important de vérifier que la poussée lors du coulage du béton ne dépasse pas les limites de résistance des coffrages et de les dimensionner pour résister à la pression quasi hydrostatique.

Dans certains cas (voile de très grande hauteur avec de très nombreuses ouvertures), le coffrage doit être spécifiquement étudié.

Une cure efficace doit être mise en œuvre le plus tôt possible après la fin du bétonnage, particulièrement pour les surfaces horizontales afin d'éviter toute évaporation précoce d'eau.

Les BAP ne nécessitent pas d'opération de surfaçage pour les applications horizontales.

Ils peuvent être mis en œuvre, soit de façon traditionnelle à la benne à manchette, soit par pompage (en tête ou en pied de coffrage).

▶ **Mise en œuvre à la benne à manchette traditionnelle**

Le béton est mis en œuvre par le haut du coffrage au moyen d'une goulotte. La hauteur de chute dans les coffrages doit être limitée afin d'éviter toute ségrégation en amenant le bas de la manchette en limite de la zone de bétonnage.

Il est nécessaire d'adapter les diamètres de la manche sous la benne par rapport au béton traditionnel (\varnothing 60 à 80 mm au lieu de \varnothing 150 à 200 mm) pour qu'elle puisse être introduite entre les armatures.

Pour maîtriser l'esthétique des parements, il convient de limiter au maximum la hauteur de chute.

▶ **Mise en œuvre par pompage en pied de coffrage : pompage "source"**

Cette méthode est adaptée en particulier pour les éléments verticaux de grande hauteur. Elle supprime toute intervention en partie haute des coffrages. Le béton est injecté en pied de coffrage.

▶ **Mise en œuvre par pompage en tête de coffrage avec tube plongeur**

Le tube plongeur doit être suffisamment introduit dans le coffrage pour limiter au maximum la hauteur de chute. Cette méthode est adaptée au bétonnage d'éléments verticaux.

Comme pour tous les bétons, il convient lors des phases de bétonnage de prendre en compte les conditions climatiques et de mettre en œuvre des dispositions particulières en dehors de la plage de température (+5°C à 30 °C).

5.3 - Mise en œuvre des Bétons à Hautes Performances

La mise en place des BHP est effectuée, soit à la benne, soit à la pompe, avec des moyens de vibration standards, tels qu'aiguilles vibrantes, tables vibrantes ou vibreurs externes.

Les BHP, compte tenu de leur rhéologie spécifique, nécessitent la prise en compte de dispositions particulières pour leur mise en œuvre, qui doit être particulièrement soignée. Il convient en particulier de :

- bétonner, à l'aide d'un tube plongeur descendant jusqu'au fond du coffrage et que l'on remonte au fur et à mesure du remplissage ;
- concevoir la structure et l'étanchéité des coffrages pour reprendre la poussée (quasi hydrostatique) du béton (compte tenu de sa fluidité) ;
- prévoir l'utilisation d'une pompe plus puissante, les BHP présentant en général une viscosité plastique importante ;
- en raison de leur faible rapport E/C, les BHP ne présentent quasiment pas de ressuage. Ils sont donc sensibles à une dessiccation précoce qui risque de favoriser une microfissuration de surface ;
- les BHP doivent être vibrés lors de leur mise en œuvre (sauf dans le cas de formulations spécifiques les rendant autoplaçants) ;
- en cas de bétonnage par temps chaud, des précautions particulières doivent être adoptées compte tenu de la sensibilité de ce matériau à des élévations de température (risque de modification de la fluidité, ou de fissuration d'origine thermique) ;
- les BHP sont moins sensibles du fait d'une montée en résistance rapide à des baisses de températures. Malgré tout, des moyens efficaces pour prévenir les effets du froid doivent être mis en œuvre dès que la température est inférieure à 5°C ;
- soigner tout particulièrement la cure (brumisation à l'eau ou aspersion de produit de cure) et l'effectuer immédiatement après la mise en œuvre et la fin du talochage. Pour les surfaces coffrées, une solution consiste à laisser le coffrage le plus longtemps possible.



7, place de la Défense • 92974 Paris-la-Défense Cedex
Tél. 01 55 23 01 00 • Fax 01 55 23 01 10

e-mail : centrinfo@cimbeton.net • internet : www.infociments.fr