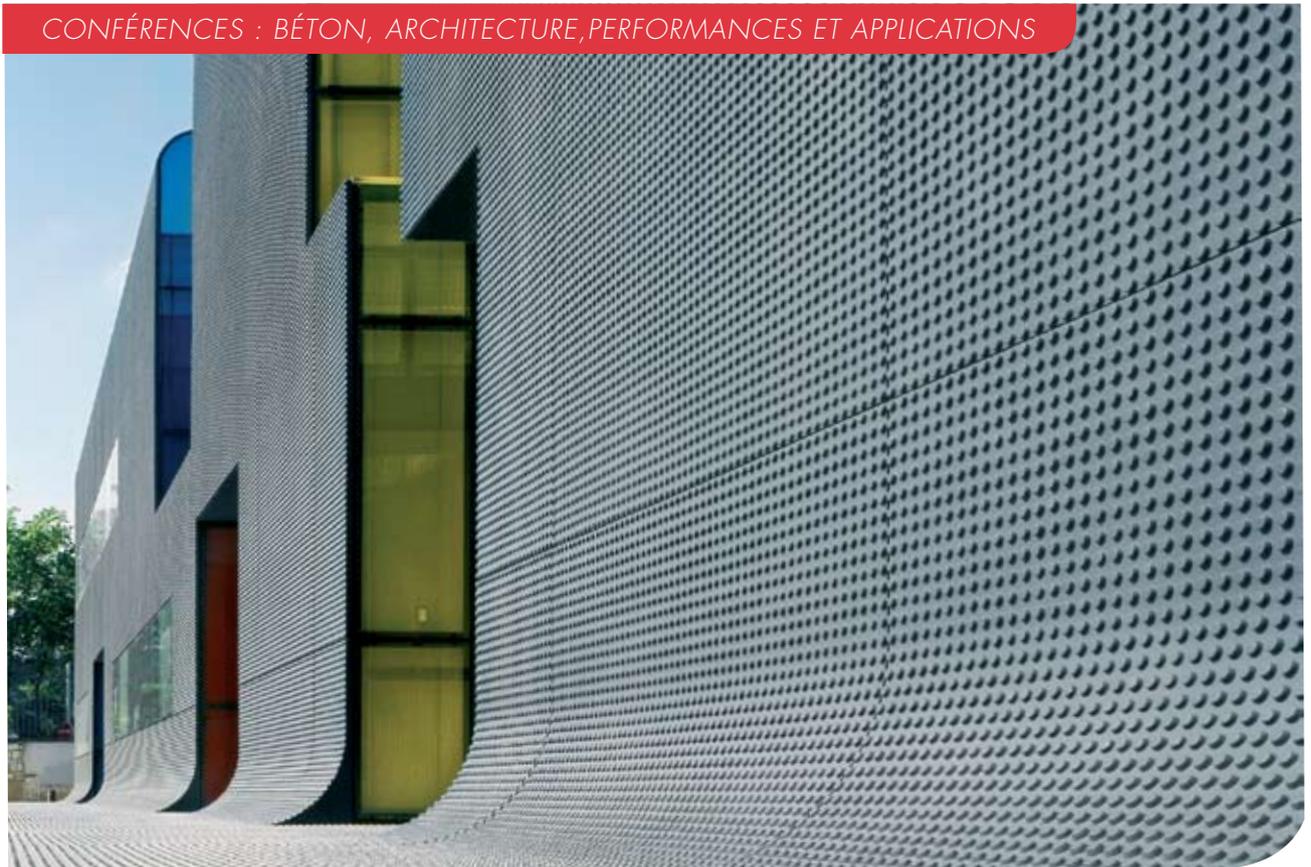


CAHIER DES MODULES DE CONFÉRENCE POUR LES ÉCOLES D'ARCHITECTURE

CONFÉRENCES : BÉTON, ARCHITECTURE, PERFORMANCES ET APPLICATIONS

Centre de bus, Thiais, Architectes E. Combarrel & D. Marrec, Photo B. Fougeirol



NOUVELLES PERFORMANCES DES BÉTONS



DES BÉTONS COURANTS
VERS LES BÉTONS
AUX NOUVELLES PERFORMANCES

Avant-propos

● Le béton, matière d'architecture...

L'universalité de l'usage des bétons est avérée. L'actuel élargissement de la palette de leurs propriétés, de leurs qualités intrinsèques et d'usages est l'occasion d'une réflexion sur les singularités de leur nature, leur comportement, à l'état frais comme à l'état durci, leur durabilité et leur développement à venir.

Pouvoir bénéficier de ces qualités suppose toujours un emploi adapté, ce qui implique :

- spécification adéquate (prise en compte correcte des paramètres résultant du projet) ;
- conception cohérente de l'ouvrage à ses différentes échelles (ensemble, parties, éléments, détails, interfaces, etc.) ;
- formulation (composition) résultante du ou des bétons ;
- mise en œuvre dans les « règles de l'art ».

L'optimisation des performances résulte d'une conjugaison de progrès importants de certaines sciences de base (compacité des empilements de grains, forces de répulsion dans les suspensions, effets d'échelle, endommagement et rupture) et de la transposition de la recherche appliquée au domaine de la construction.

Nous sommes les témoins de l'apparition à la fois d'une très grande pluralité des bétons et de l'augmentation du nombre des diverses performances d'un béton donné.

Les propriétés des bétons actuels sont révolutionnaires au plan de la rhéologie et des nouvelles méthodes de travail associées, de la réduction de la pénibilité et de l'amélioration de la sécurité, de l'économie, de l'esthétique et du développement durable.

Sommaire

Les bétons – constituants, mécanismes, propriétés à l'état frais et durci, comportements mécanique et dimensionnel

Rappels	6
Constituants des bétons : les ciments	7
Constituants des ciments	8
Les cinq types de ciments courants	9
Les classes de résistance des ciments	9
Désignation et marquage	10
Domaines privilégiés d'emploi des différents ciments	11
Constituants des bétons : l'eau	11
Constituants des bétons : les granulats	11
Constituants des bétons : les adjuvants	13
La prise et le durcissement des mortiers et des bétons	15
Les conséquences de l'hydratation du ciment	16
L'évolution de la porosité	16
L'échauffement	16
Le retrait endogène	17
Caractéristiques mécaniques de base des bétons	17
La résistance à la compression	17
La résistance à la traction	17
Variations dimensionnelles des bétons	18
Retrait	18
Variations d'origine thermique	19
Déformations instantanées sous charge, module d'élasticité	19
Déformations sous charge de longue durée, fluage	19

Les bétons à Hautes Performances (BHP)	22
Des matériaux aux multiples performances	22
Que sont les BHP?	22
Diminution de la porosité de la matrice cimentaire	23
Optimisation de l'empilement granulaire	24
Les performances : des conséquences de la formulation	24
Fluidité à l'état frais	25
Résistance mécanique élevée au jeune âge	25
Résistance importante en compression	25
Module d'élasticité plus élevé, fluage plus faible	25
Durabilité accrue	25
Dimensionnements sommaires comparatifs	26

Les bétons autoplaçants (BAP)	27
Propriétés au moment de la mise en œuvre	27
Méthodes de bétonnage	28
Qualités pratiques	28

Les bétons fibrés	29
Propriétés et performances spécifiques	29
Que sont les bétons fibrés?	29
Différents types de fibres	30
Mise en œuvre	30
Propriétés essentielles conférées aux bétons selon les fibres	31
Utilisations privilégiées selon la nature des fibres	31

Les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP)	32
Performances et propriétés spécifiques	32
Que sont les BFUP?	32
Fibres	32
Structure minérale	33
Fabrication et mise en œuvre	33
Dimensionnements sommaires comparatifs	33

Divers bétons et coulis présentant d'autres propriétés adaptées à des applications spécifiques	35
Bétons autonettoyant et dépolluant	35
Béton de bois	35
Coulis et bétons pour fondations spéciales	36
Pieux forés à la boue, barrettes, parois moulées	36
Écrans d'étanchéité	36
« Jet grouting »	37
Injections	37

Développement durable, écoconstruction, prospective	38
--	-----------

Glossaire	39
------------------	-----------

Les bétons – constituants, mécanismes, propriétés à l'état frais et durci, comportements mécanique et dimensionnel

Rappels

Un béton est un matériau composite [1] résultant du mélange judicieusement dosé d'un squelette granulaire (granulats) et d'une matrice pâteuse durcissable composée de ciment, d'eau et, le plus souvent, d'adjuvants.

■ Historique : de la chaux au ciment

Deux liants ; deux processus de durcissement radicalement différents.

L'utilisation de mortiers (à la chaux ou utilisant un liant issu du gypse impur calciné comme chez les premiers Égyptiens) est attestée depuis la haute Antiquité.

■ La chaux

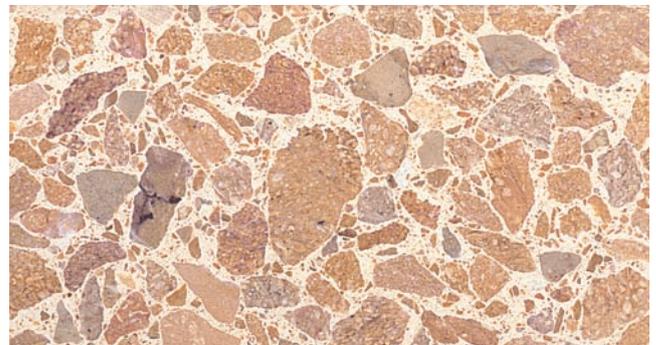
Composée essentiellement d'hydroxyde de calcium $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, elle est obtenue par cuisson d'une roche calcaire (CaCO_3) qui se décarbonate à environ $900\text{ }^\circ\text{C}$:



Cet oxyde de calcium CaO , appelé chaux vive, réagit vigoureusement à l'eau :



et donne la chaux éteinte, dénommée aussi chaux aérienne en raison de son mode de durcissement qui exige la présence d'air (plus précisément du



[1]

gaz carbonique CO_2 qu'il contient) ; la fixation lente de ce dernier se fait selon l'expression :



Toutefois, les constructeurs romains remarquent, dès avant le début de notre ère, que si le calcaire à partir duquel on élabore la chaux contient des « impuretés » sous forme de sables d'origine volcanique (ce qui est le cas notamment à Pouzzoles, port sur le golfe de Naples, au pied du Vésuve), le mortier obtenu possède une résistance et une durabilité plus élevées ; la propriété est si bien identifiée (mais, à l'époque, pas du tout expliquée) que ce matériau est utilisé dans la construction d'ouvrages majeurs : le Colisée et le Panthéon à Rome, le Pont du Gard près de Nîmes, etc.

Cette connaissance se perd pendant au moins quinze siècles. En 1756, l'anglais Smeaton découvre qu'une chaux élaborée à partir d'un calcaire particulier, contenant une grande proportion (plus de 20 %) d'argile, permet de confectionner des mortiers aux propriétés comparables à celles des matériaux romains, notamment de pouvoir durcir sous l'eau, en absence d'air.

Tout laisse à penser que ce liant était sans doute assez proche de ce que l'on appelle aujourd'hui une chaux hydraulique naturelle. Le produit obtenu présentait une ressemblance visuelle avec la pierre de Portland (presqu'île de la côte sud de l'Angleterre, comté du Dorset) ; c'est l'origine de la désignation encore actuelle du ciment Portland. Toutefois, le phénomène restait à cette date inexpliqué.

■ **Le ciment**

Au cours du demi-siècle suivant la découverte de Smeaton, la chimie s'est développée, surtout clarifiée et rationalisée, sur le fondement notamment de l'œuvre de Lavoisier ; elle s'enseigne dans des écoles d'ingénieurs nouvellement créées à l'époque.

Ce contexte rend possible l'élaboration par Louis Vicat de la théorie qu'il baptise de l'hydraulicité et qu'il rend publique en 1817. Il y donne des indications précises sur les proportions relatives de calcaire et de silice (SiO_2) nécessaires pour constituer le mélange qui, après cuisson à la température convenable et après broyage, donnera un véritable liant hydraulique fabriqué industriellement : le ciment artificiel. Car c'est la présence de silice dans les sables de Pouzzoles et dans le calcaire utilisé par Smeaton qui conféraient à ces « chaux » de l'époque leurs propriétés singulières.

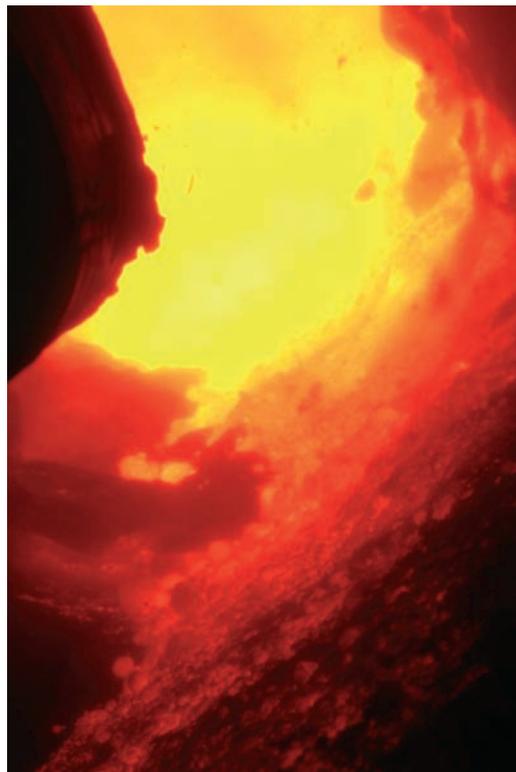
Constituants des bétons : les ciments

Les ciments dits courants sont décrits, définis, classés et spécifiés dans la norme NF EN 197-1. Tous contiennent du clinker, en proportion très variable, de 100 % éventuel pour un CEM I, à 5 % possible pour un CEM III/C, selon leur type (la norme en distingue vingt-sept).

Le clinker résulte de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion respectives moyennes de 80 % et 20 %. Extraits de carrières le plus souvent distinctes, ces matériaux sont intimement mélangés par broyage fin pour constituer ce qu'on appelle le « cru », dont l'aspect est celui d'une farine blanche. Il est ensuite procédé au préchauffage puis à la cuisson du cru, dans un four rotatif cylindrique, légèrement incliné sur l'horizontale, de longueur 100 m environ. [2] [3] [4]



[2]



[3]

[4]



Ce traitement thermique d'une durée de l'ordre d'une heure imposé au mélange entraîne la décarbonatation du calcaire (aux alentours de 900 °C) puis un phénomène dit de clinkérisation (vers 1450 °C). Il est suivi d'un refroidissement

énergique permettant de recueillir le clinker sous forme de nodules de dimensions centimétriques. [5]



[5]

Les constituants du clinker résultent de la réaction de la chaux (CaO), libérée du calcaire par sa décarbonatation, sur les composants les plus usuels de l'argile [silice (SiO₂): 60 %; alumine (Al₂O₃): 18 %; oxyde de fer (Fe₂O₃): 7 %] pour former essentiellement des cristaux de silicates et d'aluminates de calcium.

Les corps principalement formés sont [6]:

- le silicate tricalcique [3CaO, SiO₂ (ou, selon la notation « cimentière » abrégée, C₃S)];
- le silicate bicalcique [2CaO, SiO₂; C₂S];
- l'aluminate tricalcique [3CaO, Al₂O₃; C₃A];
- l'aluminoferrite tétracalcique [4CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃; C₄AF], soit:
 - C₃S,
 - C₂S,
 - C₃A,
 - C₄AF.

Le ciment Portland est le produit pulvérulent résultant du broyage fin du clinker associé à du gypse pour réguler ultérieurement la prise.

La classification des ciments courants est établie selon deux critères distincts:

- le type (classement selon la nature et le pourcentage relatif des constituants);
- la classe de résistance.

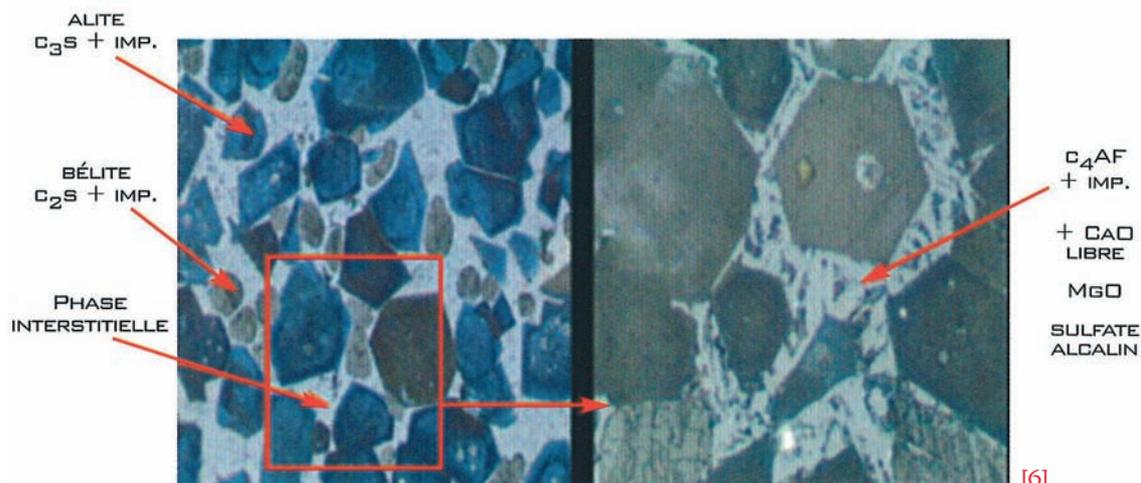
■ Constituants des ciments

Tous présentent une propriété hydraulique ou pouzzolanique; la norme NF EN 197-1 définit neuf constituants des ciments:

- clinker Portland (K);
- laitier granulé de haut-fourneau (S): coproduit de la métallurgie;
- pouzzolanes naturelles (Z);
- pouzzolanes naturelles calcinées (Q);
- cendres volantes siliceuses (V): provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des chaudières (installations industrielles, centrales électriques thermiques) alimentées au charbon pulvérisé;
- cendres volantes calciques (W);
- schistes calcinés (T);
- calcaires (L) et (LL);
- fumées de silice (D): particules très fines [0,01 à 1 micron (µm); 1 µm = 1/1 000 mm], constituées essentiellement de silice (SiO₂) amorphe, coproduit de l'électrometallurgie du silicium.

En outre:

- tous contiennent toujours du sulfate de calcium (CaSO₄), le plus souvent sous forme de gypse broyé, pour son rôle de régulateur de prise;
- la plupart peuvent contenir:
 - des constituants secondaires, minéraux broyés autres que ceux spécifiés ci-dessus (< 5% du poids de ciment);
 - des additifs (< 1% du poids de ciment).



[6]

NOTATION : C = CaO, S = SiO₂, A = Al₂O₃, F = Fe₂O₃,

■ Les cinq types de ciments courants

Le ciment Portland : CEM I

Il contient au moins 95 % de clinker et au plus 5 % de constituants secondaires.

Le ciment Portland composé : CEM II/A ou B

Il contient au moins 65 % de clinker et au plus 35 % d'autres constituants : laitier de haut fourneau, fumée de silice (limitée à 10 %), pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires. Il est à noter que les ciments Portland et Portland composé englobent les ciments gris et les ciments blancs.

Le ciment de haut fourneau : CEM III/A ou B...

Il contient entre 36 et 80 % de laitier et 20 à 64 % de clinker.

...et CEM III/C (anciennement ciment de laitier au clinker)

Il contient au moins 81 % de laitier et 5 à 19 % de clinker.

Le ciment composé : CEM V/A ou B (anciennement ciment au laitier et aux cendres)

Il contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50 % de cendres volantes et de 18 à 50 % de laitier.

Les ciments courants peuvent comporter au plus 5 % de constituants secondaires.

■ Les classes de résistance des ciments

Définition des classes de résistance

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance, 32,5 - 42,5 - 52,5, définies par la valeur minimale de la résistance normale du ciment à 28 jours en MPa.

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours conformément à la norme NF EN 196-1 et exprimée en MPa (1 MPa = 1 N/mm² = 10 bars). Pour les ciments de classes 32,5 et 42,5, il est fixé une valeur maximale de la résistance normale à 28 jours, comme indiqué dans le tableau [7].

Pour chaque classe de résistance courante, deux classes de résistance à court terme sont définies, une classe avec résistance à court terme ordinaire (indiquée par la lettre N) et une classe avec résistance à court terme élevée (indiquée par la lettre R).

[7] Résistance à la compression (en MPa)

Désignation de la classe de résistance	Résistance à court terme		Résistance courante	
	à 2 jours	à 7 jours	à 28 jours	
32,5 N	–	≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 R	≥ 10	–		
42,5 N	≥ 10	–	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 R	≥ 20	–		
52,5 N	≥ 20	–	≥ 52,5	–
52,5 R	≥ 30	–		

Valeurs limites applicables suivant les classes de résistance

La conformité d'un lot de ciment est appréciée pour ce qui concerne la résistance à la compression en fonction des valeurs du tableau suivant qui sont des limites absolues applicables à chaque résultat d'essai. [8]

[8] Valeurs limites applicables à chacun des résultats (en MPa)

Échéances	Classe de résistance					
	32,5 N	32,5 R	42,5 N	42,5 R	52,5 N	52,5 R
2 jours	–	8,0	8,0	18,0	18,0	28,0
7 jours	14,0	–	–	–	–	–
28 jours	30,0	30,0	40,0	40,0	50,0	50,0

Les autres caractéristiques

La norme NF EN 197-1 retient également des critères de conformité autres que les résistances : temps de début de prise, stabilité, teneurs en sulfates ou en chlorures.

Nota

1 Pa (pascal) = pression, ou contrainte, exercée par une force de 1 N (newton) s'exerçant perpendiculairement à elle sur une surface de 1 m².

1 MPa = 1 000 000 Pa = 100 000 daN/m² = 10 daN/cm².

Nota

52,5 MPa est la contrainte exercée par une masse pesante d'environ :
 525 kg s'appliquant sur 1 cm²
 5,25 t s'appliquant sur 10 cm², soit une section carrée de côté 3,16 cm
 52,5 t s'appliquant sur 100 cm², soit une section carrée de côté 10 cm
 525 t s'appliquant sur 1 000 cm², soit une section carrée de côté 31,6 cm
 5 250 t s'appliquant sur 1 m².

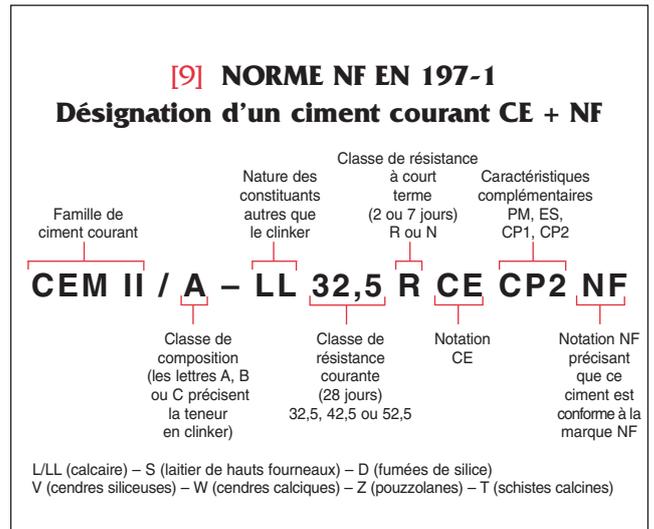
Nota

La notion de résistance d'un ciment est à distinguer absolument de celle de résistance caractéristique d'un béton.
 Le très grand éventail possible de la composition des bétons (dosage en ciment, dosage et nature des granulats) qu'il est possible d'élaborer avec un même ciment de classe de résistance donnée, peut parfaitement conduire à des bétons de classes de résistance très différentes; à partir d'un ciment de classe de résistance 42,5 N on peut obtenir, selon la formulation, un béton léger de classe de résistance LC 25/28 ou un C 70/85, qui est un BHP.

■ **Désignation et marquage**

La désignation complète d'un ciment courant est décrite dans la norme NF EN 197-1 ; voir l'exemple [9] [CEM II / A – LL 32,5 R CE CP2 NF].

[10] **Exemple de marquage sur un sac pour un ciment Portland contenant au moins 95 % de clinker, de classe 42,5 ayant une résistance à court terme élevée et reconnu apte pour les travaux à la mer (PM), les travaux en eaux à haute teneur en sulfates (ES) et ayant une teneur en sulfures limitée (CP) :** **CEMI 42,5 R PM-ES-CP**



Les ciments courants doivent être marqués CE. Ce marquage atteste de leur conformité à la norme harmonisée EN 197-1 et permet à ces ciments de circuler librement au sein de l'espace économique européen.

La marque NF volontaire, complémentaire du marquage CE (qu'il convient de spécifier), atteste que le ciment qui la porte est conforme au niveau de qualité requis par le marché français en fonction des conditions climatiques et environnementales ainsi que des techniques de mise en œuvre. Elle implique que le niveau de contrôle des ciments est bien celui qui a fait la notoriété et le succès de la marque NF-Liants hydrauliques. [10]



■ Domaines privilégiés d'emploi des différents ciments

Domaines d'emploi	Types, nature, classes privilégiés de ciment
Béton armé	CEM I 52,5 N; CEM I 42,5 N; CEM II 32,5 N; CEM II 42,5 N; CEM II 52,5 N
Béton armé ou précontraint à résistance élevée	CEM I 52,5 N; CEM II 52,5 N
Béton projeté	CEM I 52,5 R; CEM II 52,5 R
Bétonnage par temps chaud	CEM III/C 32,5 L - LH
Bétonnage par temps froid Préfabrication	CEM I ou CEM II, classe R
Maçonnerie	CEM II 32,5
Travaux souterrains, fondations, injections, ouvrages massifs, travaux en milieu agricole	CEM II / A ou B - S; CEM III / A, B ou C; CEM V / A ou B
Scelllements, colmatages	CNP
Milieux agressifs, ouvrages réfractaires	CA

Nota

Le choix du type de ciment est aussi fonction des actions environnementales auxquelles va être soumis le béton de l'ouvrage (voir la norme EN 206-1).

Constituants des bétons : l'eau

L'eau employée pour le gâchage des bétons doit être propre :

- physiquement (pas de déchets solides, minéraux ou organiques);
- chimiquement (valeur limitée de la quantité de sels dissous, ce qui exclut en général l'usage de l'eau de mer).

La norme NF EN 1008 définit les critères précis d'aptitude à l'emploi.

Constituants des bétons : les granulats

Les granulats consistent en un ensemble de grains minéraux de dimensions comprises entre 0 et 63 mm, dans la pratique entre 0 et 22,4 mm pour la confection des bétons courants [11]. Ils sont divisés, par « dimensions » croissantes, en cinq familles : fillers, sables, graves, gravillons, ballasts.



[11]

La forme géométrique de chaque grain étant a priori unique, aucun n'étant de plus, en général, l'homothétique d'aucun autre, la notion de dimension d'un grain ne saurait se résumer en une valeur.

Un processus de tamisages successifs (ou criblage dans les installations industrielles), au travers de tamis à mailles carrées de différentes dimensions, permet de qualifier dimensionnellement un granulat, de la façon très schématisée suivante. On appelle granulat d/D un ensemble de grains tels que :

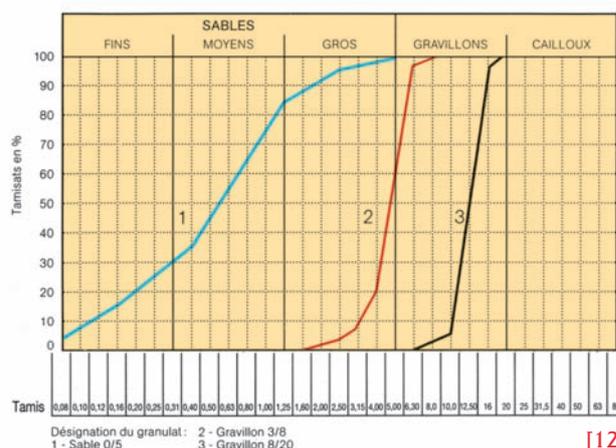
- les grains passent par le tamis de maille D;
- les grains ne passent pas par le tamis de maille d;
- d et D sont exprimés en mm.

Si $d < 0,5$ mm, le granulat est désigné par 0/D. d/D ou 0/D sont appelées classes granulaires.

La granularité (qui représente la distribution dimensionnelle des grains) est représentée par une courbe granulométrique. [12]

Les granulats les plus utilisés pour la confection des bétons sont :

- les fillers [0/D; $D < 2$ mm avec ≥ 70 % de passant à 0,063 mm et ≥ 85 % de passant à 1,25 mm]
- les sables [0/D; $D \leq 4$ mm]
- les gravillons [d/D; $d \geq 2$ mm; $D \leq 63$ mm].



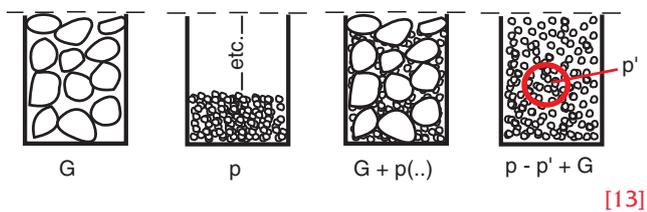
[12]

■ Notion d'optimum granulaire

Envisageons le cas, simplificateur, d'un granulat composé de grains de même nature physique mais appartenant à deux classes granulaires distinctes :

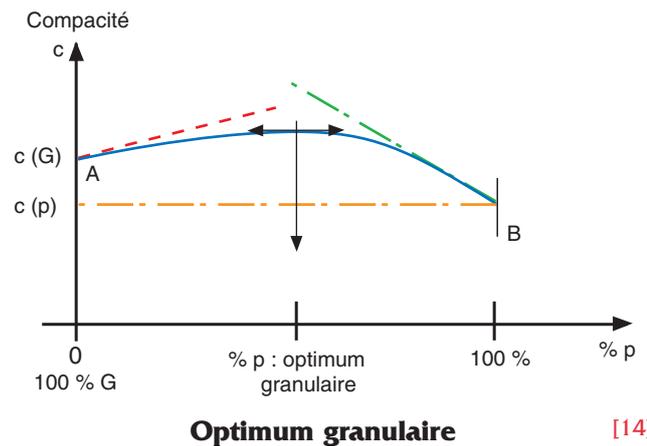
d_1/D_1 , que nous appellerons « gros », soit G
 d_2/D_2 , appelés « petits », soit p.

Remplissons successivement le récipient de granulats G seuls, puis de granulats p seuls. [13]



La compacité est le rapport entre la somme des volumes propres de chaque grain solide et le volume total de l'espace occupé par leur ensemble.

La compacité c d'un mélange (G + p) est supérieure à $c(G)$ et à $c(p)$. Il existe toujours une certaine proportion relative de p et de G telle que la compacité du mélange soit maximum : c'est l'optimum granulaire. [14]



Sur des principes comparables, on peut étendre la démarche aux sables, au sous-ensemble sables / gravillons, à l'ensemble des composants (ciment / fillers / sables / gravillons) ; il est ainsi possible d'obtenir aisément des mélanges granulaires optimisés et donc des bétons à compacité maximale, c'est-à-dire de moindre porosité, synonyme de plus grande résistance et surtout de meilleure durabilité.



■ Différents types de granulats

On utilise plusieurs sortes de granulats.

- **Naturels**, roulés [15] ou concassés [16].
- **Artificiels** (sous-produits industriels ou élaborés spécifiquement pour des usages particuliers).
- **Recyclés** (à partir de bétons de démolition).
- **Légers** (masse volumique $< 2 \text{ t/m}^3$; usuellement : argile expansée, schiste ou laitier expansés de masse volumique de l'ordre de $0,4$ à $0,8 \text{ t/m}^3$ permettant d'élaborer des bétons isolants thermiques et/ou de structure de masse volumique de $0,8$ à 2 t/m^3).
- **Courants** (permettant de fabriquer des bétons de masse volumique de 2 à $2,5 \text{ t/m}^3$).
- **Lourds** (usuellement corindon, barytine, magnétite, permettant la fabrication de bétons de masse volumique inférieure à $2,6 \text{ t/m}^3$, utilisés notamment comme isolants aux rayons radioactifs).

On se reportera utilement au fascicule *G10 Fiches techniques – tome 1* publié par Cimbéton dans lequel sont rassemblées les références aux normes

pertinentes (NF EN 12620 et XP P 18-545 notamment), aux spécifications et caractéristiques chimiques, esthétiques, géométriques, mécaniques, physiques, physico-chimiques des granulats. [17] [18]

[17] Caractéristiques essentielles sur les granulats	
Forme, dimension des grains et masse volumique réelle	Classes granulaires Granularité Forme des gravillons Masse volumique réelle et coefficient d'absorption d'eau
Propreté	Teneur en éléments coquilliers des gravillons Fines
Résistance à la fragmentation ou à l'écrasement	Résistance à la fragmentation des gravillons
Résistance au polissage, à l'abrasion et à l'usure	Résistance à l'usure des gravillons Résistance au polissage Résistance à l'abrasion
Composition teneur	Chlorures Sulfates solubles dans l'acide Soufre total Constituants réduisant le temps de prise et la résistance du béton
Stabilité volumique	Stabilité volumique Retrait au séchage
Absorption d'eau	Masse volumique réelle et coefficient d'absorption d'eau
Durabilité face au gel-dégel	Sensibilité des gravillons au gel / dégel
Durabilité face à la réaction alcali-silice	Réaction alcali-silice

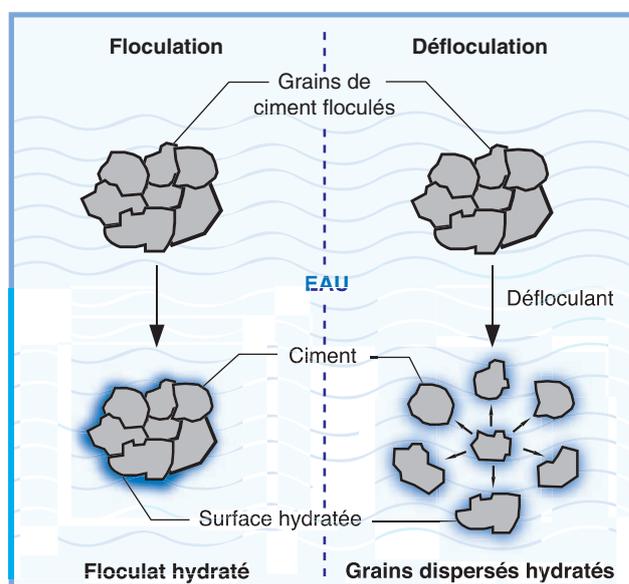
[18] Influence des caractéristiques du granulat sur les performances des bétons	
Caractère du granulat	Influence sur les bétons
Nature minéralogique	La plupart des granulats conviennent pour le béton. Influence défavorable des argiles, des calcaires marneux (gonflement et altération à terme).
Présence de matières organiques	Influence défavorable sur la prise et le durcissement, chute de résistances.
Teneur élevée en sulfates, sulfures, chlorures	Réaction avec le ciment, fissuration, corrosion des armatures.
Propreté des granulats	Critère important. Les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des défauts d'adhérence granulats/pâte.
Forme des grains, angularité	Généralement peu importante : certains sables concassés peuvent parfois être défavorables à la mise en œuvre du béton et à sa compacité finale.
Granularité	Importante pour la bonne composition du béton.

Constituants des bétons : les adjuvants

L'usage des adjuvants s'est généralisé dans l'élaboration des bétons depuis plusieurs décennies. Il s'agit de produits, se présentant le plus souvent sous forme liquide à température ordinaire, incorporés à faible dose (moins de 5 % de la masse du ciment), en général lors du malaxage et destinés à améliorer les propriétés d'un béton, d'un mortier ou d'un coulis, à l'état frais ou durci. Chaque adjuvant est ainsi désigné par sa fonction principale.

Il présente en outre une ou plusieurs fonctions concomitantes appelées fonctions secondaires, et entraîne parfois des effets non directement recherchés. Les grandes familles de fonctions remplies peuvent être rangées en trois catégories regroupant dix-sept types d'adjuvants :

- **modification de l'ouvrabilité du béton frais**, conséquence notamment de la défloculation des grains de ciment [19]; voir développement ultérieur dans la partie concernant les BHP;
- **modification de la cinétique de la prise et/ou du durcissement**;
- **modification d'autres propriétés particulières.**



Principe de défloculation [19]

Les adjuvants d'usage les plus fréquents sont les suivants.

Plastifiant

Conduit à une augmentation de l'ouvrabilité sans diminuer les résistances mécaniques à terme.

Réducteur d'eau – plastifiant

Conduit, à même ouvrabilité, à une augmentation des résistances mécaniques par une réduction de la teneur en eau (voir loi de Féret dans la partie concernant les BHP); élaboré à partir de lignosulfonates (composé benzénique, coproduit de l'industrie du bois), ou de dérivés de naphthalène.

Superplastifiant

Provoque un accroissement très important de l'ouvrabilité tout en autorisant une réduction supplémentaire de la teneur en eau; de nouvelles molécules (polyacrylates, polycarboxylates) utilisées depuis moins de dix ans dans la génération actuelle des superplastifiants leur permettent d'accompagner le développement des BHP, BAP et BFUP.

Accélérateur de prise

Diminue les temps de début et de fin de prise; dérivé de la soude, de la potasse ou de l'ammoniac.

Accélérateur de durcissement

Accélère le développement des résistances initiales.

Retardateur de prise

Augmente les temps de début et de fin de prise; à base de lignosulfonates, hydrates de carbone, oxydes de zinc ou de plomb.

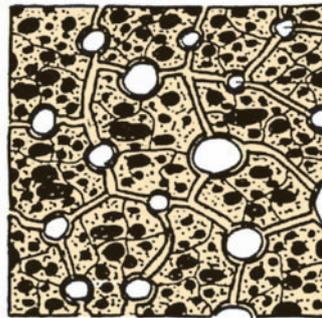
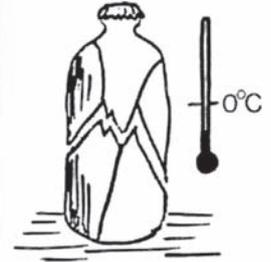
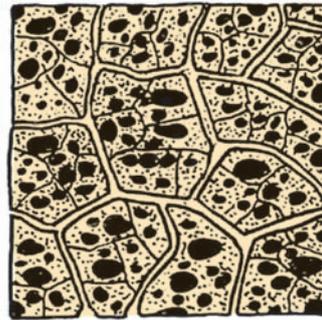
Le principe d'action commun à ces trois derniers adjuvants, agissant sur la cinétique de la réaction d'hydratation, est la modification de la vitesse de dissolution dans l'eau des composants du ciment.

Entraîneur d'air

Provoque la formation dans le béton de microbulles d'air restant uniformément réparties dans la masse; élaboré à partir de substances tensioactives. La présence de microbulles crée un réseau connecté par recoupement des capillaires, améliorant la résistance au gel du béton durci. [20]

Hydrofuge de masse

Conduit à une diminution de l'absorption capillaire, améliorant l'étanchéité à l'eau du béton; élaboré à partir d'acides gras (graisses animales), de leurs stéarates (sels de l'acide stéarique) ou d'agents fluidifiants.



[20]

Rétenteur d'eau

Régule l'évaporation précoce de l'eau (avant hydratation), favorisant la stabilité du mélange fluide et réduisant le ressuage; agents colloïdaux ou dérivés de la cellulose.

Produits de cure

Relevant de la norme NF P 18-370 et **leur usage est recommandé**. Ils facilitent, comme leur nom l'indique, la cure des bétons des ouvrages horizontaux (dallages, dalles, hourdis) et verticaux. Ils s'appliquent en général par pulvérisation sur le béton frais. [21] Ils sont à base de résines, cires ou paraffines en émulsion ou dissoutes.



[21]

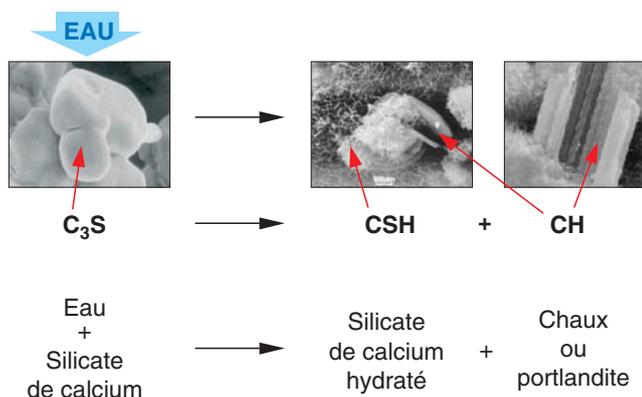
La prise et le durcissement des mortiers et des bétons

Le ciment mis en présence d'eau forme, à terme, des hydrates de différentes natures qui précipitent sous forme cristalline.

La théorie de Le Chatelier exposée dans sa thèse (1887) reste précieuse pour nous représenter le principe des processus en jeu : «... la cristallisation qui accompagne le durcissement des mortiers résulte de la différence de solubilité des corps qui font prise et de ceux qui se forment pendant la prise, les premiers se trouvant à l'état d'équilibre instable en présence d'eau et ne pouvant y subsister que momentanément ». C'est la théorie de la dissolution-précipitation, qui permet d'expliquer de nombreuses propriétés des bétons à l'état frais ou durci.

Les mécanismes en jeu sont multiples, complexes, pas encore complètement élucidés à ce jour pour certains d'entre eux ; ils associent adsorption, dissolution, hydrolyse, solvatation, suivies de cristallisation progressive. Plusieurs dizaines de sortes d'hydrates se forment dont la nature dépend de celle des constituants du ciment, notamment les principaux d'entre eux déjà cités : C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF ;

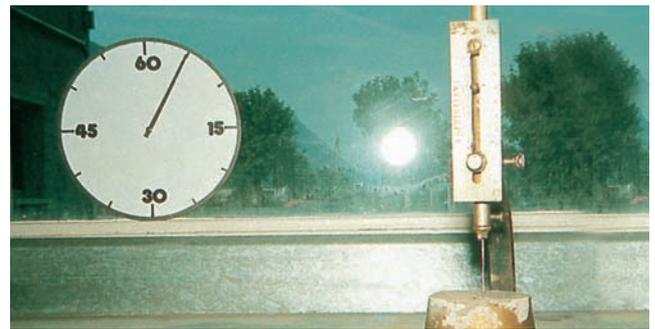
- C_3S et C_2S donnent naissance tous deux à un silicate de calcium hydraté noté C S H et à de la chaux [hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$] ; toutefois, C_3S réagit quasi immédiatement en présence d'eau et sur une durée d'environ un mois, tandis que C_2S continue à s'hydrater progressivement, pendant plusieurs mois ;
- C_3A s'hydrate également très rapidement ;
- C_4AF s'hydrate lentement à l'image de C_2S . [22]



L'hydratation des silicates [22]

La prise

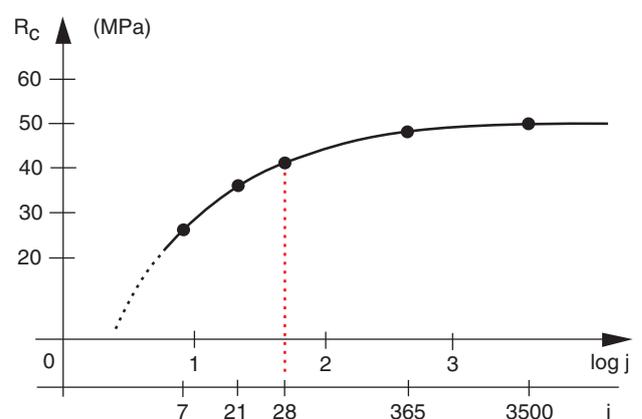
On nomme ainsi le phénomène de raidissement de la pâte de ciment qui passe assez soudainement de l'état fluide, qui est le sien depuis le gâchage, à l'état raffermi d'un solide, même si la résistance mécanique est encore très faible. Les phénomènes chimiques, physiques et physico-chimiques de la prise se déroulent durant les premières heures après le gâchage. Le début de prise survient en général entre quelques minutes et quelques heures après le gâchage ; il s'apprécie à l'aide de l'essai d'enfoncement par l'aiguille Vicat. [23]



[23]

Le durcissement

Il se manifeste dès la fin de la prise et s'accompagne d'un accroissement important mais progressif au cours du temps des résistances mécaniques ; d'où la nécessité scientifique et normative de mesurer ou contrôler cette résistance (R_c , résistance à la compression) à un âge spécifié ; la référence principale des normes et règles techniques est 28 jours, soit quatre semaines. [24]



Accroissement de la résistance en fonction de l'âge [24]

Nota

La cinétique de prise et de durcissement est fonction de la température ambiante.

Les conséquences de l'hydratation du ciment

Les connaissances actuelles sur les mécanismes sous-jacents éclairent parfaitement ces propriétés.

À partir de la suspension initiale des grains de ciment dans l'eau, le processus de dissolution- cristallisation conduit, par durcissement progressif, à la formation d'une sorte de pierre artificielle associant de manière cohérente la pâte et les granulats.

■ L'évolution de la porosité

La matrice cimentaire hydratée est un **corps poreux**. Les vides qui constituent cette porosité sont de nature et d'échelle dimensionnelle très différentes :

- les micropores des hydrates eux-mêmes, notamment du C S H (silicate de calcium hydraté) qui est le principal composant de la pâte cimentaire, de dimensions 3 à 10 nm [1 nm (nanomètre) = 1/1 000 de μm];
- les capillaires, qui correspondent aux espaces intergranulaires de la pâte de ciment fraîche (avant hydratation), de dimensions 0,1 à 10 μm ;
- les bulles d'air occlus le cas échéant au cours du malaxage, de dimensions 10 μm à 0,5 mm;
- les éventuels défauts (hétérogénéité, fissure) de dimensions 1 à 2 mm.

Le développement des hydrates en formation va entraîner un remplissage progressif des capillaires : au cours du processus, on a donc diminution de la porosité capillaire (d'où augmentation de la résistance mécanique) et augmentation de la microporosité (dans les hydrates formés).

Nota

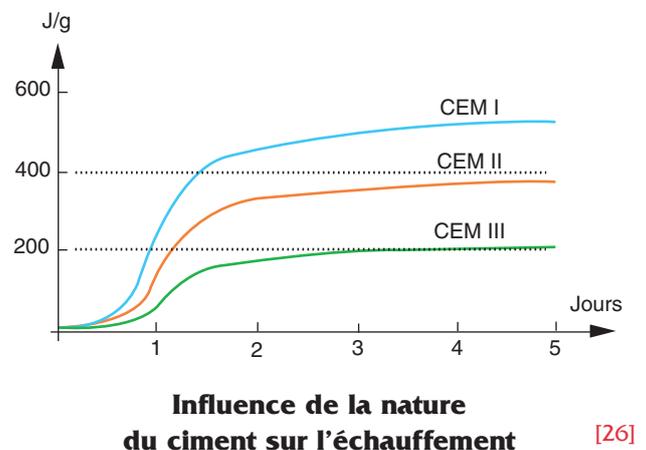
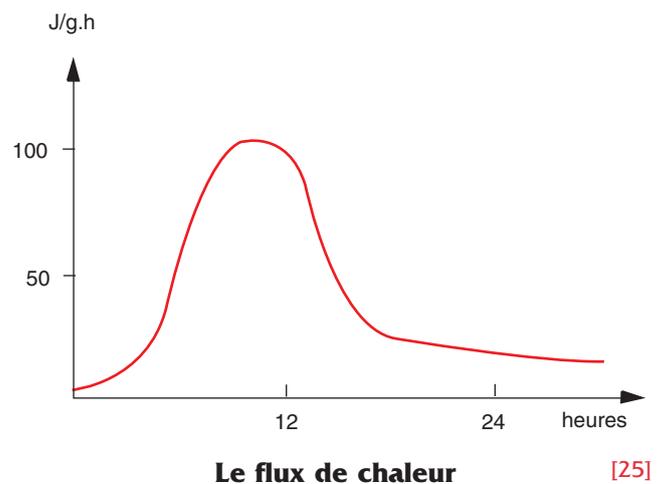
On remarquera que le rapport dimensionnel très important entre la microporosité résiduelle des hydrates (5 nm en moyenne) et les éventuels défauts (ordre de grandeur 1,5 mm) est le même qu'entre la dimension d'un objet mesurant 10 cm et celui mesurant 30 km).

Nota

L'optimisation de la formulation vise à réduire la porosité du béton, indépendamment de la porosité propre des granulats qui est en général très faible. En effet, plus la porosité du béton est faible, plus grandes seront la résistance et la durabilité du béton face aux agressions extérieures.

■ L'échauffement

La réaction d'hydratation, comme de nombreuses réactions chimiques, est exothermique : elle provoque une élévation de la température du béton. L'énergie est produite pendant toute la durée de l'hydratation, l'essentiel en une semaine à partir du gâchage, avec un pic de flux de chaleur dégagée à 12 heures en moyenne. [25] [26]



L'énergie est d'autant plus importante que le ciment est riche en clinker.

Nota

Il existe des ciments à faible chaleur d'hydratation (LH) destinés à des applications particulières, telles que le bétonnage par temps chaud ou le bétonnage de pièces massives.

Plusieurs conséquences résultent de ce caractère exothermique :

- la cinétique de la réaction d'hydratation se trouve accélérée si la température à laquelle elle se produit est élevée ; cette propriété est fréquemment utilisée en préfabrication (technique du traitement thermique) ;
- la température de la masse de béton au cours de la prise puis du durcissement s'élève dans un premier temps ; cette élévation peut aller de quelques dizaines de degrés centigrades à plus de 60°C, en fonction du type de ciment et de son dosage, de la massivité de l'ouvrage (qui influe sur la vitesse de dissipation de la chaleur), du type de coffrage, des conditions climatiques extérieures ;
- la solidification s'effectue à une température très généralement supérieure à la température ambiante ; cela signifie que la phase de retour de l'élément durci à cette température ambiante entraîne :
 - une contraction dimensionnelle (raccourcissement, inverse de la dilatation thermique) si celle-ci est libre de se développer ;
 - une mise en traction progressive de l'élément si le raccourcissement est mécaniquement empêché (de l'ordre de 1 MPa/10 °C) ;
 - un comportement intermédiaire (contraction et mise en traction) si le raccourcissement est gêné (c'est-à-dire entre libre et empêché).

■ Le retrait endogène

La réaction d'hydratation, tout en respectant bien entendu la loi de Lavoisier (conservation de la masse), est toutefois telle que le volume total des hydrates formés, de leurs micropores et de l'eau résiduelle occupant une partie des capillaires est sensiblement inférieur au volume initial (eau + ciment) ; il s'ensuit une contraction volumétrique spontanée au cours du durcissement, indépendamment de tout effet de variation dimensionnelle d'origine thermique ou mécanique ; on l'appelle la contraction Le Chatelier.

Caractéristiques mécaniques de base des bétons

Le béton est très souvent utilisé pour la réalisation de bâtiments ou de structures de génie civil. Les dimensionnements et leurs justifications prennent en compte ses caractéristiques mécaniques.

■ La résistance à la compression

La norme NF EN 206-1 (norme béton) distingue :

- seize classes, de C 8/10 à C 100/115 pour les bétons de masse volumique normale, [8 ou 100 désignant la résistance caractéristique à l'essai de compression sur éprouvette cylindrique normalisée [27], exprimée en MPa, d'un béton âgé de 28 jours ; 10 ou 115 désignant la valeur de la même grandeur mesurée sur éprouvette cubique, exprimée en MPa] ;
- quatorze classes de bétons légers, de LC 8/9 à LC 80/88.

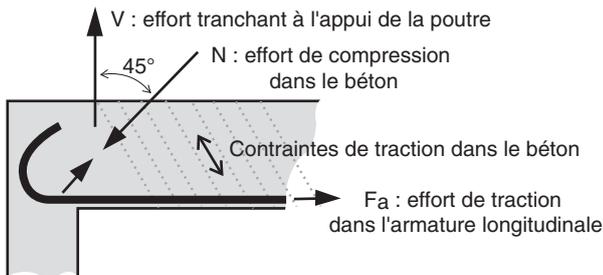


[27]

■ La résistance à la traction

Nommée R_{tj} (valeur à l'âge de "j" jours) et exprimée en MPa, cette valeur est relativement faible (notamment par rapport à la résistance à la compression). Elle n'est jamais prise en compte dans la justification de pièces ou de sections sous sollicitation de traction pure ou de flexion/traction. Elle intervient en revanche dans les justifications sous

sollicitations tangentés (provoquées par l'effort tranchant ou le moment de torsion) et dans les règles d'ancrage, de scellement et de recouvrement des armatures passives pour béton armé. La figure [28] illustre l'exemple de la zone d'appui d'une poutre en béton armé.



Poutre en BA: ancrage sur appui de rive de l'armature longitudinale [28]

Variations dimensionnelles des bétons

Deux catégories peuvent être distinguées :

1. les variations (en quelque sorte intrinsèques) en l'absence de toute sollicitation mécanique ;
2. les déformations générées par les actions sur les structures.

■ Retrait

Il est souvent désigné sous le nom de retrait hydraulique, en raison du rôle essentiel joué par l'eau dans le phénomène. Il résulte du cumul des effets :

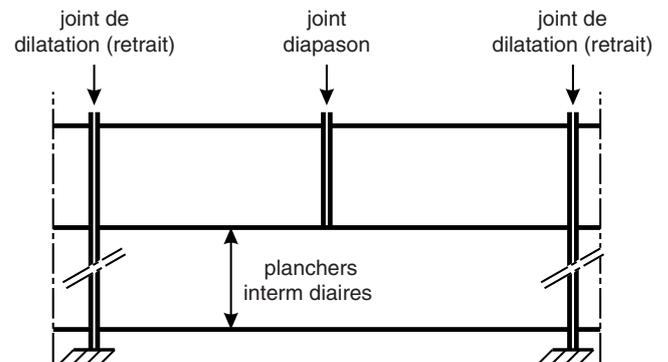
- du retour à température ambiante faisant suite à l'échauffement provoqué par la réaction d'hydratation ;
- du retrait endogène résultant de la contraction Le Chatelier ;
- du retrait de dessiccation, résultant du caractère poreux du matériau qui se constitue, associé à la mise en équilibre hygroscopique entre l'eau non combinée (vapeur saturée) et l'eau vapeur contenue dans l'air ambiant.

L'ensemble, qui s'étend dans le temps (plusieurs semaines à plusieurs mois) selon les cinétiques des phénomènes (thermique, endogène, dessiccation) qui le pilotent, provoque sous notre climat une variation dimensionnelle linéique relative, si elle est mécaniquement libre de se produire, de l'ordre de 2/10000 (régions tempérées humides) à 4/10000 (régions continentales sèches).

Exemple

L'ordre de grandeur du retrait libre d'un plancher en béton armé ou précontraint, en région continentale sèche, de longueur 30 m est donc égal à : $30 \times 100 \times 4/10000 = 12/10 = 1,2 \text{ cm}$.

Si les dispositions constructives destinées à laisser le retrait se développer le plus librement possible sont mal adaptées ou insuffisantes [liaisons entre éléments de rigidités très différentes, absence de joint d'ensemble (joint de retrait) ou de joints partiels (joints « diapason » [29])...], il se produit au sein du béton une mise en traction progressive pouvant conduire à des contraintes de traction très importantes, de l'ordre de 5 MPa.



Intégration des joints de dilatation (retrait) dans l'ossature d'une construction [29]

Compte tenu des phénomènes qui sont à son origine, le retrait augmente, toutes choses égales par ailleurs, avec :

- l'augmentation du dosage en ciment ;
- l'accroissement de la finesse de mouture du ciment – sa surface spécifique (somme de la surface des grains, immédiatement réactive avec l'eau, pour une même masse de ciment) augmentant sa vitesse de dissolution dans l'eau ;

- l'utilisation d'un ciment de classe de résistance plus élevée;
- l'augmentation du rapport E/C;
- la diminution du pourcentage d'hygrométrie de l'air ambiant lors de la prise et du durcissement (d'où la nécessité absolue de la cure);
- la diminution de la massivité de l'élément.

■ Variations d'origine thermique

Le béton, comme la plupart des matériaux, se dilate sous une élévation de température et se contracte sous un abaissement.

Le coefficient de dilatation thermique est égal à $k = 1/100\,000/^{\circ}\text{C}$.

Exemple

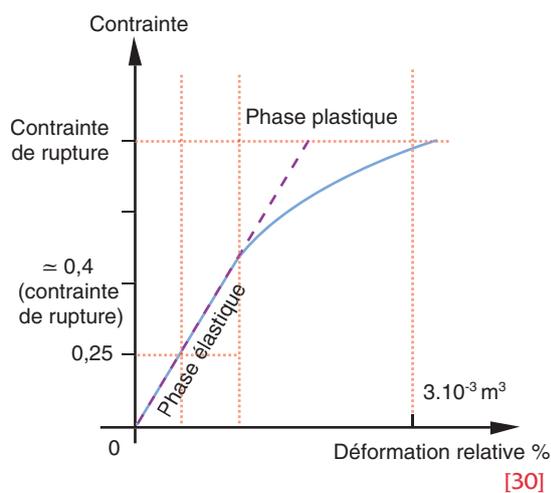
L'ordre de grandeur de la dilatation thermique d'un plancher en béton armé ou précontraint de longueur 30 m sous l'effet d'une élévation de température de 30 °C est donc égal à :

$$30 \times 100 \times 30 / 100\,000 = 0,9 \text{ cm.}$$

C'est, en valeur absolue, du même ordre de grandeur que celui du retrait du même plancher.

■ Déformations instantanées sous charge, module d'élasticité

Sous sollicitation de compression simple, le béton suit une loi de comportement contrainte/déformation représentée sur le graphe [30].



- **Une phase élastique** dans laquelle la loi de Hooke (proportionnalité contrainte/déformation) traduit correctement le phénomène :

$$C = E_i \cdot \Delta L/L$$

où :

- C (compression/section) est la contrainte ;
- E_i est le module d'élasticité instantané du matériau ;
- ΔL est le raccourcissement de l'élément de longueur initiale L ;
- L est la longueur initiale de l'élément avant apparition de la contrainte.

La valeur de E_i est corrélée à la résistance caractéristique à la compression du matériau par l'expression :

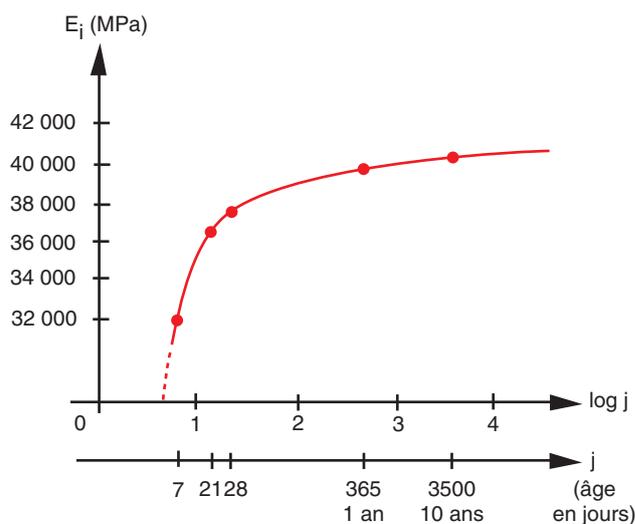
$$E_{ij} = 11\,000 \cdot \sqrt[3]{R_{cj}}$$

où E_{ij} et R_{cj} sont exprimés en MPa.

- **Une phase de comportement plastique** lorsque, la contrainte augmentant, la déformation relative s'accroît progressivement jusqu'à la rupture.

Nota

La valeur de E_i , comme la résistance R_c , est fonction de l'âge du béton. [31]



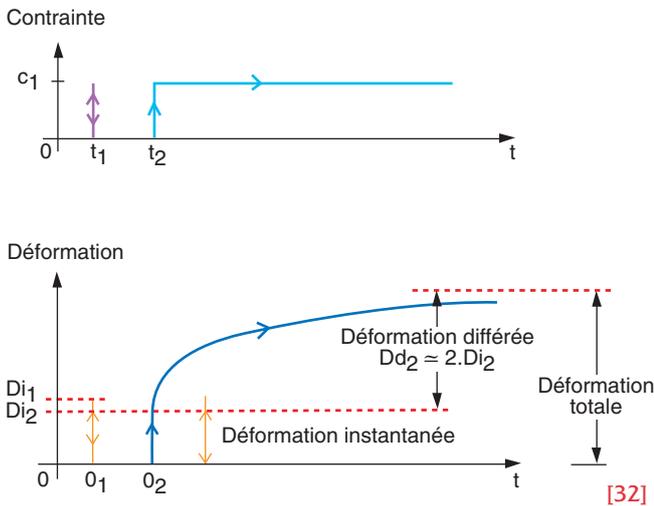
Évolution de la valeur du module d'élasticité en fonction de l'âge du béton [31]

■ Déformations sous charge de longue durée, fluage

On a vu précédemment le rôle important joué par le paramètre temps : les propriétés mécaniques d'un béton dépendent de son âge. Le temps intervient sous une autre forme dans le comportement des bétons : celle de la durée pendant laquelle les sollicitations sont appliquées. Restant dans le domaine de la sollicitation en compression simple,

la réponse (déformation) du matériau est représentée sur les graphes [32]:

- histoire du chargement (contrainte/temps);
- déformation/échelle de temps corrélé.



Sont figurées:

- l'application au temps t1 d'une contrainte « instantanée » (c'est-à-dire de courte durée) c1 entraînant une déformation instantanée Di1, fonction du module d'élasticité instantanée Ei t1;
- l'application au temps t2 > t1 de la même contrainte c1 pendant une longue durée entraînant une déformation instantanée Di2 (Di2 < Di1, car Ei t2 > Ei t1) suivie d'une déformation différée Dd2.

Ce phénomène est désigné sous le terme de **fluage**. C'est une déformation qui se poursuit dans le temps sous chargement permanent de longue durée; elle résulte pour l'essentiel du comportement viscoélastique de la matrice cimentaire.

Pour les bétons courants, on a à long terme une valeur moyenne Dd (déformation différée) = 2.Di environ.

La déformation totale DT = Di + Dd est égale à environ 3.Di (déformation instantanée).

On en déduit la notion, fictive mais commode, de module d'élasticité différé (qu'il vaudrait mieux désigner par module de déformation différée):

$$E_d = E_i/3$$

En fait, un certain nombre de paramètres influent sur la valeur du fluage. Le fluage diminue, toutes

choses égales par ailleurs, avec:

- la diminution du dosage en eau;
- la diminution du déséquilibre hygrométrique entre béton et son milieu au moment du chargement;
- l'augmentation du facteur de maturité (température x temps) lors d'un traitement thermique;
- l'augmentation de la finesse de mouture du ciment;
- l'augmentation du dosage en granulats;
- la diminution de la porosité.

Exemple numérique sommaire

Cas d'un élément vertical d'une hauteur H = 100 m soumis à une contrainte de compression moyenne de 15 MPa. Cet élément est réalisé en béton de classe C 40/50. Le module d'élasticité instantané en béton est:

$$E_i = 11\,000 \sqrt[3]{40} = 37\,600 \text{ MPa}$$

Si cet élément est soumis à une contrainte moyenne de 15 MPa, la déformation instantanée Di est calculée (loi de Hooke) à l'aide de la formule:

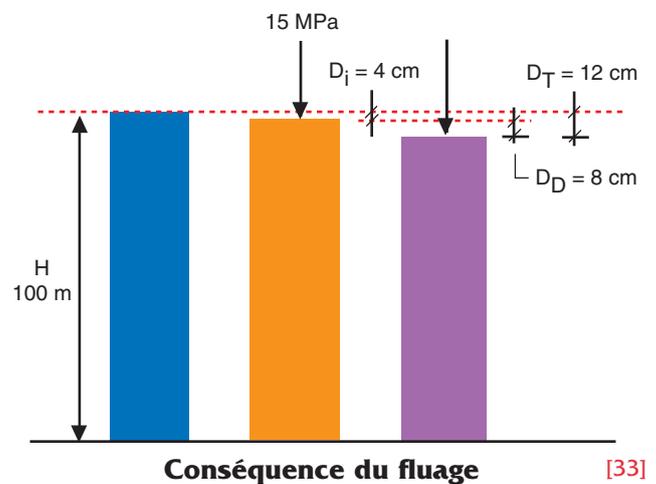
$$\text{Contrainte} = \frac{E_i \cdot D_i}{H}$$

$$\text{Soit, } D_i = \frac{\text{Contrainte} \times H}{E_i}$$

$$\text{Soit } D_i = \frac{15 \times 100}{37\,600} = 0,04 \text{ m, soit } 4 \text{ cm.}$$

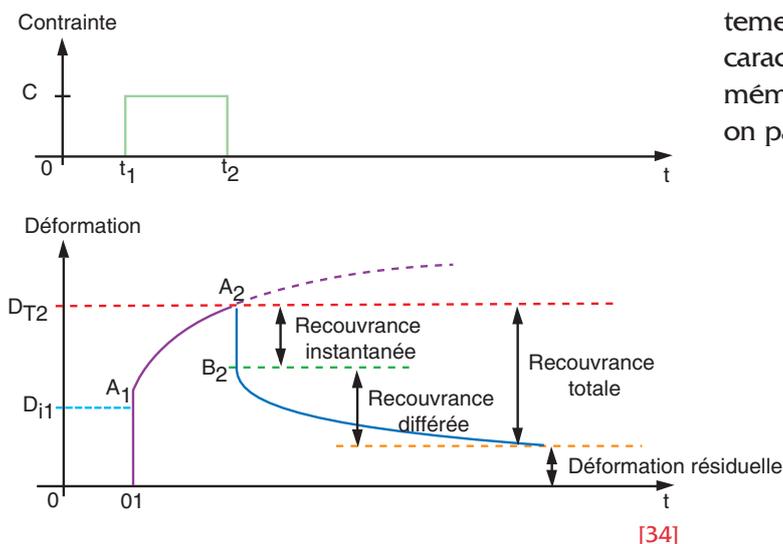
La déformation différée est égale à deux fois la déformation instantanée.

La déformation totale est égale à Di + Dd, soit 4 cm + 8 cm, soit 12 cm environ. [33]



Sur les graphes [34] est figurée la réponse d'un béton sur lequel, en cours de fluage, on cesse d'appliquer la charge :

- on observe un retour dimensionnel élastique instantané ($A_2B_2 < O_1A_1$ car $E_i t_2 > E_i t_1$)
- puis, la déformation D_{t_2} qu'avait acquise le béton au temps t_2 continue de diminuer dans le temps : c'est le phénomène de recouvrance (encore appelé retour de fluage).



Remarque

On aura bien noté la singularité de ce phénomène : dans notre exemple, à un âge $> t_2$ où le béton n'est plus soumis à aucune action (contrainte nulle sous charge externe), il se déforme lentement (dans le sens de la diminution de la déformation, en partie différée, qu'il avait acquise).

Finalement, on voit que l'histoire du chargement conditionne l'état de déformation (valeur, sens, vitesse) d'un élément à un âge donné ; le comportement d'ensemble du matériau sous charges se caractérise, entre autres, par la conservation d'une mémoire de l'histoire des chargements antérieurs : on parle de comportement héréditaire.

Les bétons à Hautes Performances (BHP)

Des matériaux aux multiples performances

Ces performances sont présentes à tous les stades du cycle de vie du béton.

À l'état frais :

- sa fluidité facilitant la mise en œuvre, aussi bien sur chantier qu'en usine de préfabrication ;
- sa bonne stabilité, garantissant l'absence de ségrégation ;
- sa faible viscosité autorisant le pompage sur de longues distances ;
- sa résistance élevée au jeune âge favorisant l'optimisation des cycles de décoffrage, de désétalement, de mise en œuvre de la précontrainte éventuelle, de manutention et de transport d'éléments préfabriqués ;

À l'état durci :

- sa résistance importante en compression permettant, à conception identique, de diminuer l'encombrement des éléments de structure ou, à sections identiques, d'en accroître les capacités portantes (charges, portées) ; [35]
- son module d'élasticité plus élevé réduisant la déformabilité des structures (augmentation de la raideur), en particulier les flèches, et améliorant la stabilité aérodynamique des ouvrages ;
- son fluage à la fois plus faible et plus bref, simplifiant l'élaboration des interfaces avec le second

- œuvre et permettant la diminution des valeurs de tension initiale de la précontrainte éventuelle ;
- sa faible porosité, d'où sa résistance accrue aux actions dues à l'environnement (pluie, eau de mer, eaux sulfatées, chlorures, gel, etc.) et donc sa durabilité.

Que sont les BHP ?

Un béton résulte d'un mélange de granulats, de ciment, d'eau et d'adjuvants.

Le rôle joué par l'eau est double :

- chimiquement et fondamentalement, assurer l'hydratation du ciment, et donc le durcissement de la pâte cimentaire intergranulaire ;
- physiquement et pratiquement, contribuer de façon déterminante à l'ouvrabilité du béton frais en lui conférant une rhéologie convenable, une fluidité suffisante permettant sa mise en œuvre par « coulage ».

Un béton courant, dosé en ciment à 350 kg/m³, nécessitera ainsi un dosage en eau d'environ 190 litres d'eau par m³ (soit un E/C = 0,54) pour être correctement ouvrable alors que, idéalement, l'hydratation de l'ensemble du ciment n'en nécessiterait qu'à peine 90 ; cet état de fait incite dans un premier temps, dans le seul but d'accroître la résistance mécanique, à réduire la part de quantité d'eau qui ne sert qu'à obtenir l'ouvrabilité.

[35] Quelques données quantitatives comparées

Résistance en compression (en MPa)	C 30/37	C 45/55	C 60/75	C 60/75 (fumées de silice)	C 80/95 (fumées de silice)
1 jour	14	19	30	36	43
7 jours	34	45	66	68	74

Déjà en 1892, Feret proposait la relation :

$$f_{bc} = (k \cdot R_c) / [1 + (V_e + V_a) / V_c]$$

avec :

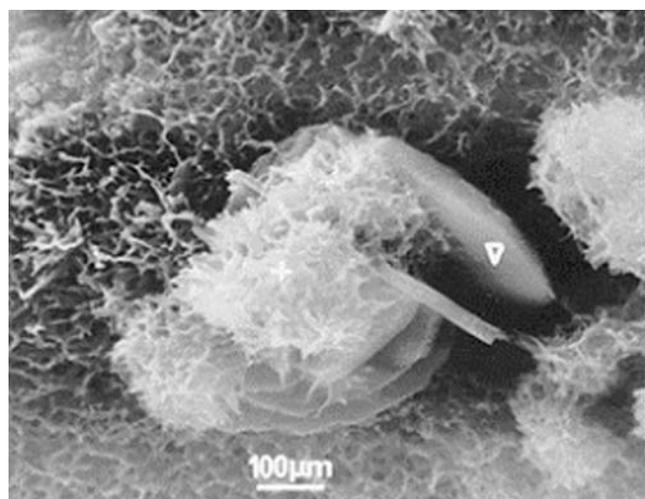
- V_a = volume d'air
- V_e = volume d'eau « efficace »
- V_c = volume de ciment
- R_c = classe de résistance du ciment
- k = coefficient granulaire (fonction de la granularité et de la nature des granulats)
- f_{bc} = résistance prévisible à la compression du béton.

Cette relation souligne bien que la résistance du béton croît, bien entendu, avec l'augmentation du dosage en ciment mais aussi avec la diminution du dosage en eau.

Ces $190 - 90 = 100 \text{ l/m}^3$ d'eau résiduelle, c'est-à-dire 10 % du volume du béton, donnent naissance à un réseau capillaire connecté de vides au sein du béton constitué : c'est, pour l'essentiel, l'origine de la porosité, dénommée porosité capillaire, de la matrice cimentaire.

D'ailleurs, l'observation de la microstructure d'une matrice de ciment durcie révèle qu'elle est poreuse (voir photo au microscope électronique à balayage d'un gel de silicate de calcium hydraté [36]).

Or si, de façon plus générale, on examine la valeur de la résistance mécanique relative de matériaux aussi différents que l'acier, l'aluminium, le plâtre, le zirconium, en fonction de leur porosité, on constate qu'elle augmente avec la diminution de leur porosité, selon une loi de type hyperbolique. La voie vers des résistances mécaniques plus élevées passe donc bien par une diminution de la porosité de la matrice cimentaire.



[36]

En second lieu, considérant à ce stade le béton comme un matériau composite à deux phases (la matrice cimentaire et les granulats), la recherche de résistances plus élevées conduit logiquement à **optimiser l'empilement granulaire** pour réduire la porosité.

Comment parvient-on concrètement à atteindre ce double objectif ?

■ **Diminution de la porosité de la matrice cimentaire**

La résistance des bétons croît en raison inverse du rapport E/C (eau efficace /ciment). Pour un rapport E/C inférieur à 0,4, correspondant au domaine des BHP, la résistance prévisible dépasse alors 50 MPa. Cependant, le mélange devient dans la pratique plus difficile à réaliser car il n'y a plus assez d'eau pour assurer la fluidité ; une quantité importante d'air est alors piégée lors du malaxage, ce qui crée de nouveau de la porosité et fait chuter la résistance : il faut fluidifier ce mélange pour ne pas entraîner d'air. La solution consiste à défloculer le ciment (voir page 13).

À la surface des grains de ciment sont localisées des charges électriques ; les ions de charges différentes font que les grains s'attirent et forment des petits paquets appelés « floccs ». Au sein d'un flocc, les grains sont solidaires les uns des autres, se déplacent ensemble, en piégeant une certaine quantité d'eau, et occupent un volume apparent plus important : deux causes limitant la possibilité pratique de réduction de la teneur en eau et de la porosité.

Quand il y a eu défloculation, les grains de ciment se déplacent individuellement les uns par rapport aux autres et vont pouvoir s'organiser pour créer un bon empilement, libérant ainsi les poches d'eau du système flocculé. Il s'ensuit une diminution de la viscosité et une réduction du dosage en eau requis pour obtenir une bonne ouvrabilité.

Les produits qui permettent de défloculer sont des adjuvants connus sous le nom de superplastifiants.

En fluidifiant et réduisant la quantité d'eau, il est alors possible d'aboutir à une pâte de ciment fluide offrant une grande résistance mécanique.

■ Optimisation de l'empilement granulaire

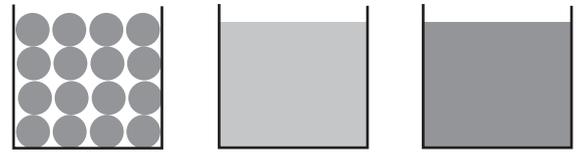
L'optimisation de l'empilement granulaire permet une amélioration de l'ordre de 20 % de la résistance par le seul ajustement de la courbe granulométrique. Pour chaque classe granulaire, il existe des mélanges optimum de grains qui permettent d'obtenir la porosité minimum du système. La recherche de l'optimum peut s'effectuer théoriquement, par des modèles plus ou moins sophistiqués, ou expérimentalement. En se plaçant à la proportion optimale de gravillons et de sable (G/S), et en conservant un même rapport E/C, on parvient à réduire le volume de la matrice de ciment tout en conservant la fluidité désirée ; outre un gain de résistance, il en résulte une diminution consécutive du retrait (moins d'eau et de ciment) et du fluage (moins d'eau).

Ce concept de compacité des mélanges granulaires, utilisé depuis longtemps pour toutes les catégories de granulats, s'applique également aux ultrafines.

Comme le sable entre les gravillons, les ultrafines peuvent jouer le rôle de petits éléments entre les grains de ciment, conduisant ainsi à nouveau, selon le même processus déjà évoqué précédemment, à une possible diminution de l'eau dans le mélange tout en préservant les propriétés de mise en œuvre. La plus utilisée des ultrafines est la fumée de silice, coproduit de l'électrometallurgie du silicium. Elle se présente sous forme de petites sphères principalement constituées de dioxyde de silicium (SiO_2), 10 à 1 000 fois plus petites que les grains de ciment. Il existe également des proportions de ciment et de fumée de silice optimales (FS/C) conduisant à une fluidité maximale.

Finalement, l'optimisation granulaire s'effectue pour le BHP sur quatre niveaux de tailles de particules qui s'empilent de manière optimale avant apport de l'eau : les gravillons à l'échelle centimétrique, les sables à l'échelle millimétrique, les ciments et les fines d'addition (cendres volantes, laitiers de haut fourneau, filler, etc.) à l'échelle micronique et les fumées de silice à l'échelle sub-micronique. [37]

Tous les empilements de matériaux de diamètres identiques ont des compacités voisines de l'ordre de $C_0 = 0,60$:



Les mélanges ont des compacités bien plus basses :
 $0,60 + 0,40 \times 0,60 = 0,84$
 $0,84 + 0,16 \times 0,60 = 0,936$

D'où $C = 1 - (1 - C_0)^N$

où N est le nombre de classe granulaire

La compacité finale après N opérations de remplissage

[37]

De plus, outre leur contribution à la fluidité et à l'optimisation de la compacité du système, les fumées de silice sont chimiquement actives (combinaison avec la chaux) : la microstructure de la pâte hydratée est ainsi renforcée.

Les performances : des conséquences de la formulation

Dans le domaine des structures, tout ingénieur de conception a un jour rêvé du matériau « idéal » : rapport R_c/ρ (résistance mécanique/masse volumique) le plus élevé possible, ce qui entraîne la réduction de l'influence relative du poids propre et accroît par conséquent le rendement du système pour supporter les charges d'exploitation.

S'agissant des bétons, la voie passant par la recherche de la diminution de la masse volumique (bétons légers), bien que prometteuse, est restée à ce jour rarement utilisée.

Les recherches ont eu pour objectif l'augmentation de la résistance mécanique R_c , à masse volumique constante, afin d'augmenter le rapport R_c/ρ .

L'accroissement de l'ensemble des performances qui en découle résulte de l'évolution de la composition des bétons. [38]

■ **Fluidité à l'état frais**

Obtenue avec pourtant un moindre dosage en eau, c'est la conséquence de la défloculation des grains de ciment et, lorsqu'on y a recours, de la présence d'ultrafines jouant aussi un rôle de lubrifiant entre éléments de plus grande taille.

■ **Résistance mécanique élevée au jeune âge**

La finesse de mouture du ciment, définie par sa surface spécifique (surface Blaine), caractéristique contrôlée lors de la production du ciment, influe sur sa vitesse d'hydratation et sur son évolution à long terme. Les classes de résistance des ciments (42,5 ou 52,5) utilisées pour la formulation d'un BHP résultent en général d'une mouture fine du clinker.

Par ailleurs l'addition d'ultrafines telles que des fumées de silice ou de certaines fines influe également sur les vitesses d'hydratation.

Enfin, la défloculation augmente bien entendu, à dosage en ciment donné, la proportion de surface de grains de ciment mise d'emblée au contact de l'eau, facteur supplémentaire d'accélération du processus d'hydratation, donc de durcissement.

■ **Résistance importante en compression**

Elle résulte essentiellement, comme il est développé précédemment :

- de la diminution de la porosité de la matrice cimentaire en raison de la diminution de la teneur en eau rendue possible par la défloculation ;
- de l'optimisation de l'empilement granulaire.

■ **Module d'élasticité plus élevé, fluage plus faible**

Ce sont les conséquences de la plus grande compacité des BHP, à toutes les échelles des constituants, et de la réduction de la teneur en eau.



Pacific Tower, La Défense, Kurokawa, architecte. [38]

■ **Durabilité accrue**

Cette qualité résulte de la plus faible porosité capillaire des BHP au niveau de la pâte de ciment (de l'ordre de trois fois moins que dans les bétons courants) :

- le réseau et la taille maximale des pores diminuent par rapport à ce qu'on observe dans les bétons traditionnels ;
- les hydrates formés lors des hydratations du ciment occupent l'espace de façon à déconnecter le réseau capillaire.

Les BHP présentent par conséquent une perméabilité plus faible, ce qui est déterminant pour s'opposer à la pénétration des agents extérieurs agressifs.

En effet, la notion de durabilité est intrinsèquement attachée à celle d'une attaque face à une agression laquelle, en règle générale, met en œuvre des mécanismes chimiques internes qui ne

s'expriment qu'après la phase de pénétration au sein du béton ; celle-ci s'effectuant par le biais d'un réseau de circulation (le réseau capillaire).

Ces phénomènes sont fortement entravés par la nature de la microstructure dense et peu connectée des BHP.

Dimensionnements sommaires comparatifs

1. Cas d'un poteau de structure de section carrée

• Par exemple, un poteau de hauteur libre 2,50 m, de section 25 x 25 (625 cm²), armé de 2 % d'aciers longitudinaux (en surface), supporte les valeurs indiquées dans le tableau [39].

• Ou bien, un poteau d'une hauteur libre de 2,50 m devant supporter 100 000 daN aurait pour section pleine carrée les valeurs indiquées dans le tableau [40].

2. Cas d'un élément fléchi de section rectangulaire (poutre simple, poutre continue, traverse de portique, etc.)

Si l'on compare les sections relatives de deux éléments fléchis de section rectangulaire, l'un réalisé en béton de classe de résistance C 35/37 et l'autre en béton de classe de résistance C 80/95, il est possible de réduire :

- l'encombrement d'environ un tiers ;
- volume de granulats d'environ un tiers ;
- de la masse de ciment d'environ 15 %.

<i>[39] Poteau de section connue</i>			
Classe de béton	C 30/37	C 80/95	C 100/115
Charge maximale (en daN)	82000	186000	227000
Contrainte effective du béton (en MPa)	10,6 24 MPa	29,3	

<i>[40] Poteau de charge supportée connue</i>				
Classe de béton	C 30/37	C 60/75	C 80/95	C 100/115
Section carrée (en cm/cm)	27 x 27	22 x 22	20 x 20	18 x 18
Surface (en cm ²)	729	484	400	324

Les bétons autoplaçants (BAP)

On désigne par béton autoplaçant un béton très fluide, homogène et stable, mis en œuvre sans vibration, son serrage (ou compaction) s'obtenant par le seul effet gravitaire.

Les BAP se distinguent donc des bétons courants essentiellement par leurs propriétés à l'état frais; leur utilisation est aujourd'hui réglementairement prescriptible pour les classes de résistance.

Ils offrent des performances au moins équivalentes à celles d'un béton compacté par vibration.

Propriétés au moment de la mise en œuvre

S'écoulant sous son propre poids, et avec un débit suffisant, un BAP présente un seuil de cisaillement (caractérisant le début d'écoulement) et une viscosité plastique (caractérisant la vitesse d'écoulement) faibles.

Devant de la même façon pouvoir contourner aisément un obstacle en zones confinées (telles que dièdres rentrants, série d'armatures...), le BAP doit cependant posséder une résistance au cisaillement suffisante, bien que faible, pour éviter tout risque de ségrégation.

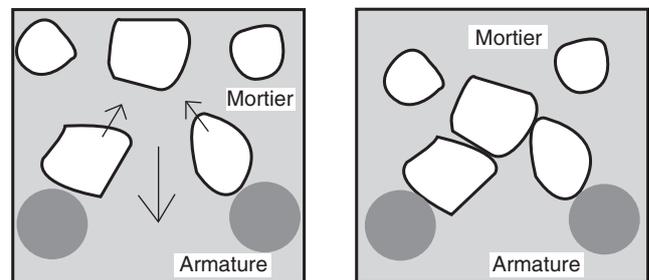
Un BAP doit posséder également une bonne résistance à la ségrégation statique, au tassement et au ressuage entre le moment où il est en place et la période de prise.

Pour concilier ces propriétés quelque peu antinomiques, les principes de composition sont les suivants:

- volume de pâte (ciment + additions + eau) élevé, dont le rôle est de disperser les granulats afin de limiter les frottements entre eux qui peuvent perturber l'écoulement et l'aptitude au remplissage;
- quantité importante de fines (dimensions $< 80 \mu\text{m}$, limite inférieure de celles des sables) afin d'assurer

une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage;

- volume faible de gravillons, afin de s'affranchir des risques de blocage du béton en zone confinée en cours d'écoulement [41]; ce volume doit cependant être suffisant pour contribuer à l'augmentation de la compacité du squelette granulaire; ceci conduit à adopter en général un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1;



Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle

[41]

Nota

Toutefois, on comprendra que dans des situations à confinement élevé, il y aura lieu d'opter pour un $G/S < 1$ et/ou d'adopter un D_{max} plus faible (par exemple 10 mm), alors qu'au contraire dans des situations où le confinement est faible (par exemple dallages ou dalles peu ferrillés), il sera possible d'envisager un $G/S > 1$ et/ou un D_{max} plus important (par exemple 20 mm), permettant dans ce cas de limiter la quantité de liant nécessaire.

- utilisation de superplastifiants permettant d'obtenir la fluidité souhaitée;
- utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (réteneur d'eau) destiné, comme les fines, à empêcher le ressuage et à limiter les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse.

Méthodes de bétonnage

Pour la mise en œuvre des BAP, on peut procéder :

- par le bas des coffrages, de façon spécifique aux BAP, par apport du béton à la pompe ; les avantages sont les suivants :
 - pas de chute du béton ;
 - suppression des ouvriers en tête de coffrage, d'où accroissement de leur sécurité ;
 - possibilité de réalisation de bétonnages de qualité sur grande hauteur ;
- par pompage en tête de coffrage, avec un tube plongeur supprimant toute chute du béton frais, qui ne fait plus que s'écouler [42].



[42]

Qualités pratiques

Elles sont d'ores et déjà soulignées par les multiples utilisateurs des BAP dont les témoignages sont rassemblés dans une monographie diffusée par CIMbéton (B 52 – 04/2004).

Parmi les critères ayant pu motiver les divers intervenants, on relève :

- la facilité de mise en œuvre,
- la réduction du temps de mise en œuvre et/ou des délais ;
- la qualité des parements obtenue ;
- la prévention des risques et des nuisances (bruit, pénibilité, vibration...) ;
- la nécessité de remplir les coffrages complexes ou de grande hauteur ;

D'autres critères, dont on devrait voir croître à l'avenir l'importance, sont aussi cités :

- l'économie de matériel, liée essentiellement à la suppression de la vibration et à la longévité accrue des éléments de coffrage ;
- la difficulté d'accès au chantier, pouvant rationnellement conduire à l'utilisation de béton pompé.

D'autres enfin, plus spécifiques, sont moins souvent mentionnés mais portent sur de réelles qualités, comme la suppression du surfacage mécanique lors de la confection de dalles, dallages ou chapes.

On voit de façon synthétique que si le BAP représente la solution technique face à certaines difficultés de mise en œuvre, les grandes qualités constructives qui lui sont d'ores et déjà reconnues sont :

- la facilité de mise en œuvre et la réduction des délais qui en résulte ;
- l'homogénéité et l'esthétique des parements ;
- la prévention des risques et des nuisances, atout sans doute le plus porteur d'avenir car améliorant significativement les conditions de travail et de sécurité sur les chantiers et dans les usines tout en limitant les impacts environnementaux.

Nota

La cure des BAP est absolument nécessaire.

Les bétons fibrés

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres de nature, de dimensions et de géométrie variées.

Propriétés et performances spécifiques

Les bétons fibrés offrent des propriétés et des performances supérieures dans les domaines suivants :

- cohésion du béton frais ;
- conséquences du retrait (fissuration) ;
- ductilité en traction (déformabilité avant rupture) ;
- résistance à l'abrasion, à l'usure en général ;
- résistance aux chocs ;
- résistance à la fatigue ;
- résistance à la traction par flexion ;
- résistance mécanique au jeune âge ;
- bon comportement au feu.

Que sont les bétons fibrés ?

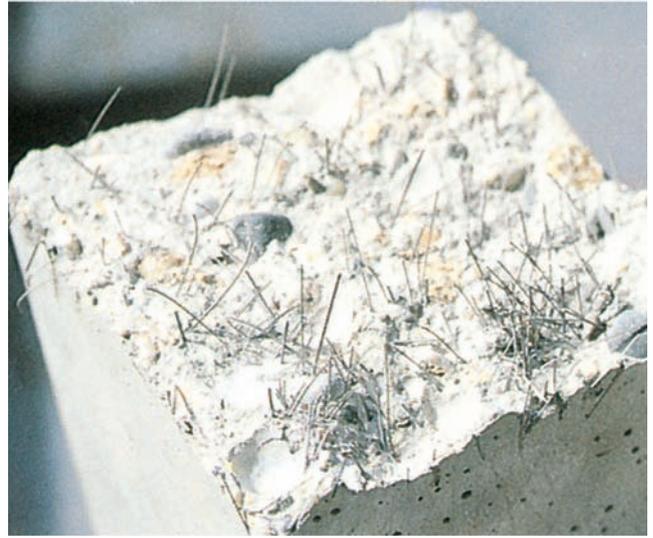
Dans un béton fibré, les fibres sont incorporées au moment du malaxage [43].

Une fibre est un composant filiforme (rapport longueur/diamètre très élevé : 25 à 1 500), de faible longueur (5 à 60 mm), d'origine minérale, métallique ou organique.

Exemples :

- fibre acier, diamètre 1 mm, longueur 25 mm ;
- fibre polypropylène, diamètre 20 microns (0,02 mm), longueur 30 mm, etc.

Les fibres sont courtes et dispersées dans toute la masse du béton, contrairement aux armatures passives classiques du béton armé (essentiellement barres et treillis soudés) disposées de façon privilégiée dans les zones où règnent des contraintes de traction et orientées en général selon la direction des contraintes principales de traction.



[43]

Cependant, le mécanisme qui régit le mode d'association béton-armature dans le cas du béton armé ou béton-fibre dans le cas du béton fibré est le même : l'adhérence.

On appelle « adhérence » l'action des forces de liaison qui s'opposent au glissement des armatures ou des fibres au sein de la matrice cimentaire ; l'adhérence est un phénomène de frottement (et non de collage), lequel dépend, quantitativement comme qualitativement, de la surface de contact béton/armature ou fibres et de la géométrie des armatures ou des fibres et des granulats.

L'adhérence permet :

- d'assurer le scellement (ou ancrage) des armatures ou des fibres ;
- d'assurer « l'entraînement » des armatures (c'est-à-dire qu'elle s'oppose à l'effort de glissement longitudinal provoqué par l'effort tangent) ;
- de maîtriser la distribution de la fissuration.

La répartition des fibres de petite section dans l'ensemble de la masse du béton leur permet de s'opposer de façon quasi-isotrope, au sein même de la matrice cimentaire, à la propagation des microfissures diffuses, retardant ainsi, ou même empêchant, dans certaines conditions, l'apparition de fissures d'échelle macroscopique.

Différents types de fibres

On distingue usuellement trois familles de fibres [44]:

- les fibres métalliques (acier, fonte amorphe, inox);
- les fibres organiques (acrylique, aramide, kevlar, polyamide, polypropylène);
- les fibres minérales (basalte, carbone, mica, verre).

Chaque type présente des caractéristiques propres:

- de dimensions;
- de formes (lisse, crantée, ondulée, biondulée, à crochets, etc.);
- de résistance mécanique à la traction (50 à 300 MPa);
- de module d'élasticité (5 000 à 200 000 MPa).



[44]

OPTIMISATION DU DIAMÈTRE DES FIBRES

L'efficacité optimisée d'une barre ou d'une fibre constituée d'un matériau de caractéristiques mécaniques données (contrainte limite d'utilisation: C_u) est obtenue pour une section la plus faible possible.

Supposons une barre ou une fibre de section circulaire, de diamètre D . La force maximum de traction qu'elle peut équilibrer est:

$$F_u = C_u \times \pi \times D^2 / 4.$$

C_u : contrainte limite d'utilisation.

Pour une contrainte limite d'adhérence béton/barre ou béton/fibre donnée (appelée adh), la longueur nécessaire de scellement (ou ancrage) L , permettant de transmettre à la barre ou à la fibre la force F_u est telle que:

$$L \times \pi \times D \times adh = F_u.$$

Soit:

$$\begin{aligned} \bullet C_u = F_u / \pi \times D^2 / 4 & \quad > \quad L / C_u = \frac{D}{4 \times adh} \\ \bullet L = F_u / \pi \times D \times adh & \end{aligned}$$

Afin d'obtenir un L / C_u le plus faible possible, il faut que le diamètre D des barres ou des fibres soit le plus faible possible et/ou que la contrainte limite d'adhérence soit la plus élevée possible.

Les différents types de bétons fibrés déclinent les conséquences de cette réalité physique.

Mise en œuvre

Les bétons fibrés sont mis en œuvre selon les techniques habituelles:

- coulage en place à l'aide d'une benne munie d'un manchon;
- pompage;
- projection.

L'incorporation des fibres se fait en général lors du malaxage; elle peut également être réalisée lors de la projection dans le cas du béton ou du mortier projeté. Les bétons fibrés sont utilisés aussi bien en usine de préfabrication que sur chantier.

Propriétés essentielles conférées aux bétons selon les fibres

■ Bétons de fibres métalliques

(dosages courants en fibres :

0,5 à 2 % en volume, soit 40 à 160 kg/m³) :

- bonne résistance à la traction et donc à la traction par flexion ;
- amélioration consécutive du comportement mécanique d'un béton de structure ;
 - soit, dans le cas du béton armé, par l'accroissement de la résistance à la traction par cisaillement du béton,
 - soit, dans certains cas, en permettant la suppression complète de l'armature conventionnelle ;
- limitation de la fissuration de retrait ;
- amélioration de la ductilité, diminuant la fragilité ;
- meilleure résistance consécutive aux chocs.

■ Bétons de fibres polypropylène

(dosages courants en fibres :

0,05 à 0,2 % en volume, soit 0,5 à 2 kg/m³) :

- meilleur comportement au feu des bétons, en particulier ceux à compacité très élevée (BHP, BFUP) ;
- meilleure maîtrise du retrait plastique du béton frais ;
- plus grande maniabilité et meilleure cohésion du béton ;
- meilleure résistance aux chocs (arêtes vives...).

■ Bétons de fibres en fibres de verre

(dosages courants : 1 à 2 % en volume, soit 25 à 50 kg/m³)

Ces bétons sont couramment dénommés CCV (Composite Ciment Verre), ils présentent une grande résistance à la traction (durable sous réserve de protection des fibres vis-à-vis des alcalis libérés lors de l'hydratation du ciment).

Utilisations privilégiées selon la nature des fibres

■ Bétons de fibres métalliques

Valorisation des propriétés de renfort pour bétons structurels (en complément d'armatures conven-

tionnelles ou en absence de telles armatures) :

- sols industriels (dallages ou hourdis) ;
- composants structurels préfabriqués ;
- bétons projetés ;
- pieux de fondation ;
- voussoirs de tunnels.

■ Bétons de fibres polypropylène [45]

Valorisation des propriétés de limitation de la fissuration de premier retrait et d'amélioration du comportement au feu :

- dallages et aménagements urbains ;
- coques minces ;
- pièces à démoulage rapide : précision des arêtes, des motifs en parement ;
- bétons ou mortiers projetés de réparation ;
- bétons soumis à des risques potentiels d'élévation de température accidentelle (feu).



Immeuble Le Julia (Fontenay-sous-Bois), Oscar Niemeyer, architecte, [45] vêtue Palazzo® en panneaux de béton de fibres polypropylène.

■ Bétons de fibres de verre

Valorisation de la résistance mécanique :

- éléments très minces (10 à 15 mm) pouvant atteindre de grandes dimensions (plusieurs mètres) : panneaux de façade, bardages, coffrets, habillages... ;
- caniveaux ;
- enduits monocouches.

Les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP)

On a assisté au début des années quatre-vingt-dix à un nouveau saut technologique avec la mise au point des BFUP.

Performances et propriétés spécifiques

- Très grande ouvrabilité, à l'état frais, leur conférant le plus souvent un caractère autoplaçant ;
- résistances mécaniques très élevées à court terme (60 à 70 MPa à 24 heures) et au jeune âge ;
- résistances mécaniques finales à la compression très élevées ($R_{c28} = 130$ à 250 MPa) ;
- résistances mécaniques à la traction très significatives ($R_{t28} = 5$ à 12 MPa ; 20 à 50 MPa pour la traction par flexion) ;
- compacité très importante, entraînant une très faible perméabilité ;
- durabilité exceptionnelle ;
- résistances très importantes aux agressions ;
- retrait faible ;
- ductilité importante ;
- ténacité (résistance à la microfissuration) élevée ;
- grande résistance à l'abrasion et aux chocs ;
- possibilité de réalisation d'une texture de parement très fine ;
- fluage très faible (0,8 fois la déformation instantanée ; 0,2 fois en cas de traitement thermique ; à comparer à 2 fois pour un béton courant).

Que sont les BFUP ?

Ce sont des bétons à fort dosage relatif en ciment et en adjuvants, à granulats de faible dimension, à fort dosage en fibres, pour lesquels, en extrapolant la démarche exposée à propos des BHP, on recher-

che une réduction très importante de la porosité, plus précisément du réseau des pores connectés.

- Les voies d'obtention sont de nature comparable :
- teneur en eau extrêmement faible ($E/C < 0,2$, contre 0,3 à 0,4 pour les BHP et 0,5 pour les bétons courants), ce qui est technologiquement possible grâce à l'emploi optimisé de superplastifiants de nouvelle génération défloculant les fines et les ultrafines ;
 - optimisation de l'empilement granulaire (4 classes granulaires), la dimension et le dosage des granulats les plus gros étant en outre considérablement réduits (dimension maximale variant de 1 à 4 mm ; contre 4 à 25 mm pour les bétons courants ou certains BHP).

■ Fibres

Ce sont des fibres spécifiques ; elles confèrent sa ductilité à ce matériau composite. Métalliques, elles conduisent à des BFUP d'usage plutôt structural. Organiques ou minérales, elles donnent des BFUP visant des qualités esthétiques. Leur longueur (en général 10 à 20 mm pour les fibres métalliques) doit être supérieure à au moins deux fois la dimension du plus gros granulat. Leur section (en général 0,1 à 0,3 mm de diamètre) est la plus faible possible (efficacité optimisée vis-à-vis de l'adhérence ; voir dans la partie précédente « Bétons Fibrés »).

Le dosage courant en fibres métalliques est de 2 à 3 % en volume ; il peut atteindre 10 % dans certains composites cimentaires fibrés.

Les fibres de plus faible longueur, donc en plus grand nombre à dosage volumique égal, jouent un rôle privilégié dans la couture des microfissures diffuses : elles augmentent la résistance et la ductilité du matériau en traction pure. Les fibres de plus grande longueur ont davantage vocation à coudre

les fissures d'échelle macroscopique; elles augmentent la résistance et la ductilité de la structure en flexion, en torsion et au cisaillement.

■ **Structure minérale**

Les BFUP sont des matériaux à structure « micro-métrique » : les dimensions des composants s'étagent du millimètre au nanomètre; cette microstructure leur confère une très faible porosité « non connectée ».

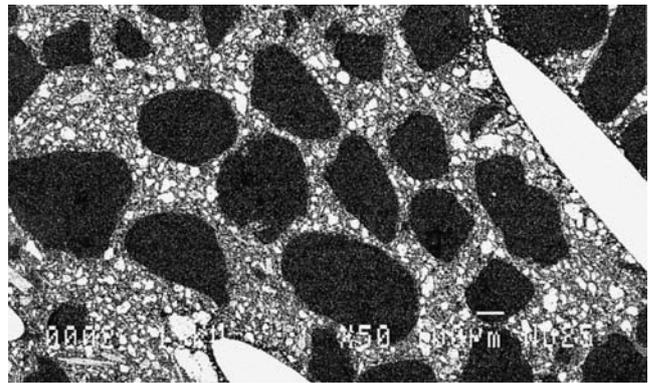
De plus, le dosage relatif eau/ciment (rapport E/C < 0,2) est tel que subsistent au sein du BFUP à l'état durci, après consommation complète de l'eau d'hydratation, des particules de clinker non hydraté; leur rôle est double :

- elles constituent des microgranulats de grande qualité (module d'élasticité élevé);
- elles représentent au cœur du BFUP une réserve de ciment anhydre, lui procurant un potentiel de cicatrisation en cas de fissuration; l'eau pénétrant par les éventuelles microfissures permet la formation d'hydrates au sein de ces microfissures par réaction d'hydratation avec les grains de clinker résiduel: d'où accroissement de la durabilité par maintien de la très faible porosité et du pH alcalin de la matrice cimentaire. [46]

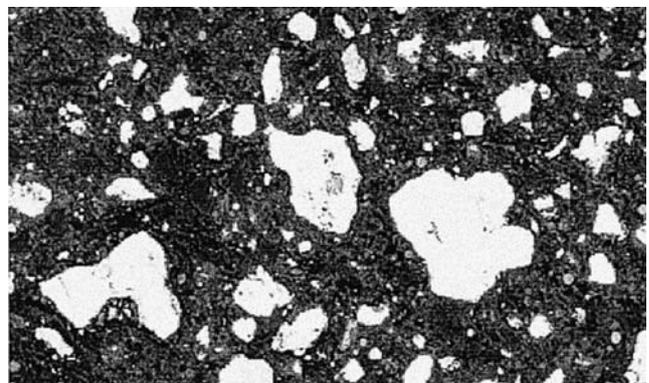
■ **Fabrication et mise en œuvre**

Les BFUP sont actuellement commercialisés sous forme de mélanges (à sec) prêts à l'emploi (« pré-mix ») en sacs ou en « big bags » de 500 kg ou 1 tonne; c'est la garantie d'obtenir la régularité nécessaire de la formulation et de faibles tolérances sur les constituants: très hautes performances vont en effet nécessairement de pair avec hautes sensibilités (aux effets des fluctuations de dosages).

La qualité du résultat final suppose en outre évidemment le respect scrupuleux du dosage en eau requis et des procédures de malaxage adaptées. Ces conditions préalables indispensables étant



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



[46]

remplies, toutes les techniques courantes de mise en œuvre des bétons peuvent être utilisées pour les BFUP. En outre, l'absence de ressuage résultant de la très faible teneur en eau rend obligatoire une **cure renforcée**.

■ **Dimensionnements sommaires comparatifs**

Reprenons, en le complétant, l'exemple évoqué dans la partie « Les bétons à hautes performances – BHP ».

- Un poteau de hauteur libre 2,50 m, de section 25 x 25 (625 cm²), armé de 2 % d'aciers longitudinaux, supporte réglementairement les valeurs indiquées dans le tableau [47].

[47] Poteau de section 25 x 25

Classe de béton	C 30/37	C 80/95	C 100/115	BFUP (C 250)
Charge capable	82000 daN	186000 daN	227000 daN	613000 daN
Contrainte effective du béton	10,6 MPa	24 MPa	29,3 MPa	98 MPa

[48] Consommation comparative de matériaux pour un poteau supportant 100 000 daN

Classe de béton	C 30/37	C 60/75	C 80/95	C 100/115	BFUP (C 250)
Section carrée (en cm/cm)	27 x 27	22 x 22	20 x 20	18 x 18	13 x 13
surface (en cm ²)	729	484	400	324	169
Contrainte effective du béton (en MPa)	11	16,8	20,4	25,2	59,1
Volume de béton (en m ³)	0,182	0,121	0,1	0,081	0,042
Taux de réduction par rapport (C30/37)	1	1,5	1,82	2,24	4,33
% de granulats par rapport (C30/37)	100	66	55	44	23
Dosage en ciment (en kg/m ³)	290	400	450	500	900
Masse de ciment utilisée	53	48	45	41	38
% de gain en ciment par rapport (C30/37)	0	9	15	23	28

• Ou bien, un poteau d'une hauteur libre de 2,50 m devant supporter 100 000 daN aurait pour section pleine carrée les valeurs indiquées dans le tableau [48].

La consommation comparative de matériaux nécessaires au transfert d'une charge de compression de 100 000 daN sur une hauteur libre de 2,50 m peut ainsi être résumée dans ce tableau.

Cette famille de bétons permet :

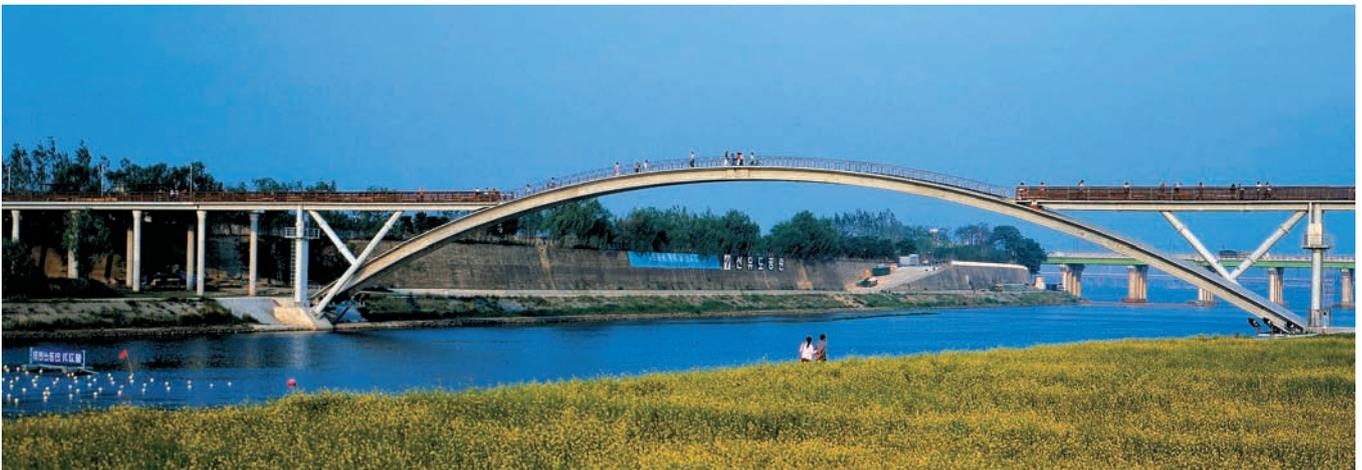
- la réduction de la durée du chantier et de la pénibilité (pas de vibration, pas d'armatures passives) ;
- la réduction des quantités de matériau, d'où impact positif sur la maîtrise de l'utilisation des matières premières.

Les qualités constructives exceptionnelles des BFUP (résistance, durabilité, compacité extrême, liberté des formes et des textures) ouvrent la voie vers de nouvelles possibilités d'applications architecturales : plus grande sincérité constructive, finesses structurales plus audacieuses... [49] et [50]



Passerelle de la Paix à Séoul, Rudy Ricciotti, architecte. [50]

Pont de la Chabotte sur l'A51. [49]



Divers bétons et coulis présentant d'autres propriétés adaptées à des applications spécifiques

Les évolutions de ces dernières années révèlent deux grandes tendances :

- l'addition, la coexistence possible pour un même béton de diverses propriétés cumulatives, de plus en plus nombreuses : par exemple, un béton peut être à la fois léger, autoplaçant et à hautes performances (c'est le cas d'un LC 80/88, qui est un BHP et peut être BAP) ;
 - la singularisation possible d'un béton caractérisée par une propriété complémentaire spécifique.
- Tels sont les exemples, non exhaustifs, évoqués dans cette partie.

Bétons autonettoyant et dépolluant

Il s'agit de deux bétons, l'un permettant de réaliser des parements sur lesquels les salissures d'origine biologiques (algues, lichens, etc.) ne peuvent s'installer durablement, et l'autre permettant de construire des bâtiments, des routes et des éléments en bétons agissant sur la réduction des gaz atmosphériques polluants (oxyde d'azote, composés organiques volatils émis par les voitures, les chauffages domestiques, etc.).

Ces deux types de béton sont élaborés à l'aide de deux ciments différents à effet photocatalytique. En général, l'agent photocatalytique est du dioxyde de titane (TiO_2), dont le rôle est d'accélérer, sous l'effet de l'énergie lumineuse véhiculée par les radiations ultraviolettes (rayons UV du soleil), les réactions d'oxydoréductions à la surface de la matrice cimentaire. Le premier ciment empêche le développement des salissures d'origines biologiques pour le béton autonettoyant. Le deuxième contribue à l'amélioration de la qualité de l'air en transformant les oxydes d'azote en composés azotés stables dans le cas du béton dépolluant.

Toutes les textures classiques de parements (brut, gommé, poli, sablé) pour lesquels la matrice cimentaire constitue l'essentiel de la peau permet-



Hôtel de Police de Bordeaux en béton autonettoyant, [51]
Claude Marty, architecte.

tent de bénéficier de ce principe. L'effet photocatalytique confère donc au béton une propriété soit autonettoyage soit dépolluante, qui plus est permanente puisque, comme tout catalyseur, l'agent photocatalytique n'est pas consommé lors du processus des réactions. [51]

Béton de bois

Constitué essentiellement de fibres de bois traitées (d'essences spécifiques) enrobées dans une matrice cimentaire, éventuellement teinté dans la masse à l'aide de pigments minéraux, c'est un béton acoustiquement absorbant. Cette propriété provient de la forte porosité résultant de sa constitution ; l'importance des surfaces de contact



[52]

interne air/matériau créées par les pores transforme et dissipe l'énergie acoustique: les bruits sont amortis.

L'utilisation actuellement la plus fréquente se rencontre dans la réalisation d'écrans acoustiques [52]. Ce matériau est doté d'une durabilité comparable à celle des bétons courants.

Coulis et bétons pour fondations spéciales

La réalisation de nombreuses constructions nécessite le recours à des « fondations spéciales »; elles sont utilisables pour les fondations profondes, de soutènement, souterraines ou encore de consolidation de sol.

Les techniques de fondations spéciales nécessitent dans la très grande majorité des cas l'utilisation de bétons ou de coulis, le plus souvent de caractéristiques spécifiques.

■ *Pieux forés à la boue, barrettes, parois moulées*

Les parois du forage sont maintenues, pendant la perforation, par une boue bentonitique (eau + ben-

tonite). Puis le bétonnage est réalisé en continu à partir du fond de la fouille:

- à l'aide d'un tube plongeur remonté progressivement au fur et à mesure du remplissage par le béton;
- à la pompe.

La boue est simultanément extraite par pompage.

La qualité particulière requise pour ce béton est la permanence de son ouvrabilité pendant toute la durée du bétonnage.

■ *Écrans d'étanchéité* [53]

Le plus souvent de forme plane ou cylindrique, les écrans sont des ouvrages verticaux noyés dans le sol, sur une profondeur pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres, destinés à réduire, empêcher complètement ou détourner des écoulements souterrains, ou établir une coupure imperméable.

La technique de mise en œuvre s'apparente à celle généralement utilisée pour la réalisation de parois moulées, le matériau de remplissage consistant en un coulis autoturcissable (ciment + bentonite + eau) dont les qualités particulières essentielles requises sont:

- la très faible perméabilité;
- la déformabilité importante (très faible module d'élasticité), le rendant capable de suivre sans fissuration et sans mise en charge excessive les déformations lui étant imposées par le sol encaissant;



[53]

- la grande pérennité en présence d'eaux agressives;
- l'absence d'érodabilité.

On y parvient en utilisant des coulis de composition particulière :

- faible dosage en ciment (100 à 200 kg/m³), en général à forte teneur en laitier de haut fourneau;
- 25 à 100 kg/m³ de bentonite.

■ « Jet grouting » [54]

Procédé de consolidation des sols en général meubles (limons, argiles sableuses) lorsqu'ils sont difficilement injectables par des procédés plus classiques. Il consiste en une injection sous haute pression (plusieurs dizaines de MPa) d'un coulis de ciment, au travers de buses de petit diamètre situées en pied d'un train de tiges creuses mis en place dans un forage de petit diamètre (150 mm environ) réalisant *in situ* un mélange sol-ciment qui équivaut à un véritable « **béton de sol** » constituant une colonne dont le diamètre peut atteindre quelques décimètres à environ 2 m.

■ Injections

Elles sont destinées à améliorer, selon le but recherché, les caractéristiques mécaniques, la cohésion, l'imperméabilité d'un terrain en comblant ses vides



[54]

à l'aide d'un coulis de ciment de caractéristiques rhéologiques adaptées.

Peuvent être réalisés :

- des compensations de tassements résultant de la décompression d'un terrain provoquée par des terrassements ;
- des consolidations, préalables à un terrassement, ou d'un sol sous fondations préexistantes ;
- des étanchements ;
- des remplissages de cavités (par exemple anciennes carrières souterraines) ;
- des scellements (notamment de tirants d'ancrage).

Développement durable, écoconstruction, prospective

Le béton est fabriqué par simple mélange de ses constituants ; c'est un matériau minéral, physiquement inerte et chimiquement stable.

La répartition des sites de production (cimenteries, extraction ou production de sables et granulats, usines de préfabrication, centrales de béton prêt à l'emploi) est dense sur l'ensemble du territoire, d'où la limitation de l'incidence des transports.

L'utilisation en cimenterie de combustibles de substitution économise les énergies fossiles ; la part de combustibles alternatifs est passée de 10 % en 1980 à 35 % actuellement. Dans le respect des normes environnementales, l'accroissement de la « valorisation matière », par la confection de ciments composés (substitution partielle du clinker par des laitiers de haut fourneau, des cendres volantes, etc.), participe également de l'économie des ressources naturelles.

Le béton est recyclable. Il est entièrement valorisable en fin de vie des ouvrages qu'il constitue, sous forme de granulats obtenus par concassage, parfaitement inertes. Les bétons ainsi concassés ne se

décomposent pas, ne produisent aucune réaction chimique et n'émettent aucune substance dangereuse. Utilisé à bon escient dans la réalisation d'un édifice, dans le cadre d'une conception d'ensemble judicieuse, le béton est un élément s'inscrivant dans la démarche HQE® en raison, entre autres, de ses qualités intrinsèques en matière d'inertie thermique.

Les progrès scientifiques considérables de ces dernières années ne dispensent évidemment pas d'être toujours attentif à une conception réfléchie, d'ensemble comme de chaque composant, et une mise en œuvre soignée.

Ces bétons d'aujourd'hui sont déjà de plain-pied, en quelque sorte, dans les nanotechnologies (ultra-fines, superplastifiants et autres adjuvants...). Le potentiel, la marge de nouveaux progrès, est encore énorme, sous l'impulsion des chercheurs et des concepteurs.

Plus que jamais, le béton se confirme, ainsi que l'écrivait Pier Luigi Nervi, comme « le matériau le plus révolutionnaire de toute l'histoire de la construction ».



Glossaire

DES BÉTONS COURANTS
VERS LES BÉTONS
AUX NOUVELLES PERFORMANCES

Accélérateur de durcissement

Adjuvant qui, introduit dans l'eau de gâchage, réduit la durée de la phase de durcissement du béton.

Accélérateur de prise

Adjuvant qui, introduit dans l'eau de gâchage, diminue les temps de début et de fin de prise du ciment dans le béton, en favorisant l'hydratation du ciment.

Addition

Matériau minéral finement divisé utilisé afin d'améliorer ou de conférer certaines propriétés; une addition peut être inerte ou présenter un caractère pouzzolanique ou hydraulique latent.

Adjuvant

Produit incorporé au béton durant le processus de mélange, en petite quantité par rapport à la masse de ciment (moins de 5 %), afin de modifier certaines de ses propriétés, à l'état frais ou durci.

Adsorption chimique (ou chimisorption)

Fixation, en surface de constituants solides, de molécules d'eau avec transfert ou mise en commun d'électrons.

Adsorption physique

Fixation réversible, en surface de constituants solides, de molécules d'eau en une ou plusieurs couches. À distinguer d'absorption.

Ajout

Produit incorporé au béton lors du processus de mélange hormis addition, adjuvant, ciment, eau, granulats (par exemple: fibre, produit modifiant la thixotropie, agent de viscosité...).

Affaissement au cône d'Abrams

Valeur, exprimée en millimètres, obtenue par un essai normalisé, dit « essai d'affaissement » ou « essai au cône d'Abrams » (du nom de son inventeur), ou encore « slump test », effectué à l'aide d'un moule tronconique rempli de béton frais. On apprécie ainsi la consistance, donc l'ouvrabilité du béton.

Air entraîné

Bulles d'air microscopiques intentionnellement incorporées au béton lors du malaxage, habituellement par l'utilisation d'agents tensioactifs (entraîneurs d'air); les bulles sont pratiquement sphériques et leur diamètre est généralement compris entre 10 et 300 microns.

Air occlus

Vides d'air dans le béton qui ne sont pas intentionnellement créés.

Agent de démoulage

Produit anti-adhérent (huile minérale, résine, cire ou autre agent chimique) appliqué à la brosse ou pulvérisé avant le coulage sur les banches, les moules ou les peaux de coffrage, afin de faciliter le décoffrage et la réutilisation des coffrages.

Ancrage

Synonyme de scellement; par ailleurs, dispositif de façonnage (crochet ou retour d'équerre) de l'extrémité d'une armature pour béton armé constituant une solution alternative de scellement.

Anhydride

Corps pouvant donner naissance à un acide par combinaison avec de l'eau.

Exemples: $\text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ (acide carbonique)
 $\text{SO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3$ (acide sulfureux).

Anhydrite

Sulfate de calcium anhydre (CaSO_4).

Bentonite

Variété d'argile constituée de particules très fines assemblées par feuillets parallèles. En suspension dans l'eau, elle offre un ensemble de propriétés singulières: agglomération, colmatage, thixotropie et viscosité.

Béton

Matériau formé par mélange d'un liant hydraulique (ciment), de granulats, d'eau et éventuellement d'adjuvants, dont les propriétés se développent par hydratation du ciment.

Béton à composition prescrite (BCP)

Béton pour lequel la composition et les constituants à utiliser sont spécifiés au producteur qui est responsable de fournir un béton respectant cette composition prescrite.

Béton à composition prescrite dans une norme

Béton à composition prescrite dont la composition est définie dans une norme applicable là où le béton est utilisé.

Béton à haute résistance

Béton dont la classe de résistance à la compression est supérieure à C 50/60 (ou supérieure à LC 50/55 s'il s'agit de béton léger).

Béton à propriétés spécifiées (BPS)

Béton pour lequel les propriétés requises et les caractéristiques supplémentaires sont spécifiées au producteur qui est responsable de fournir un béton qui satisfait à ces propriétés requises et à ces caractéristiques supplémentaires.

Béton blanc

Béton de teinte claire dont le liant est du ciment blanc et qui comporte également des sables clairs auxquels sont éventuellement ajoutés des fines blanches.

Béton de masse volumique normale

Béton dont la masse volumique est comprise entre 2 000 et 2 600 kg/m³.

Béton durci

Béton à l'état solide, après prise et en cours de durcissement, ayant acquis une résistance notable.

Béton frais

Béton dans la phase qui suit le malaxage et précède la prise, c'est-à-dire dans un état plastique qui permet son transport et sa mise en place.

Béton léger

Béton la masse volumique est comprise entre 800 et 2 000 kg/m³. Il est produit entièrement ou partiellement à partir de granulats légers.

Béton lourd

Béton dont la masse volumique est supérieure à 2 600 kg/m³.

Béton Prêt à l'Emploi (BPE)

Béton frais préparé dans une centrale à béton, généralement extérieure au site de construction. Il est livré sur le chantier, dans des camions toupies, malaxé et prêt à être coulé.

Béton projeté

Béton propulsé, après malaxage, par voie mouillée ou par voie sèche, sur un support sous forme de jet, en couches successives. Il permet de réaliser des revêtements, des renforcements, des ouvrages de forme complexe (coques...).

Calcaire

Roche cohérente d'origine sédimentaire formée essentiellement de carbonate de calcium (CaCO₃).

Calciner

Au sens premier, transformer des pierres calcaires en chaux par l'action du feu qui les décarbonate.

Catalyse

Accroissement considérable de la vitesse d'une réaction chimique provoquée par un corps (catalyseur) du fait de sa seule présence et se retrouvant inchangé à la fin du processus.

Cendres volantes

Particules pulvérulentes, obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique des fumées de chaudières alimentées au charbon pulvérisé, que l'on peut utiliser comme constituant de certains ciments de types CEM II, III, IV ou V.

Ciment

Liant hydraulique en poudre. Mélangée avec de l'eau, la poudre fait prise et, en durcissant, solidarise les granulats pour constituer les bétons ou mortiers.

Chaux aérienne éteinte

Matière pulvérulente, obtenue à partir d'un calcaire pratiquement pur par cuisson suivie d'une extinction par l'eau, contenant essentiellement de l'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂; utilisée dans la confection des enduits et mortiers.

Chaux hydraulique

Liant hydraulique résultant de la cuisson de calcaires naturels plus ou moins argileux suivie d'une extinction, avec ou sans addition d'autres constituants: clinker, laitier, pouzzolane; utilisée en travaux de maçonnerie et d'enduit.

Chaux vive

Monoxyde de calcium (CaO) résultant de la décarbonatation du calcaire; son extinction à l'eau forme la chaux aérienne éteinte [Ca(OH)₂].

Clinker

Substance provenant de la cuisson d'un mélange dosé de calcaire (apportant CaO) et d'argile (apportant SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃); il entre dans la composition de tous les ciments courants.

Clinkérisation

Ensemble des phénomènes physico-chimiques, quelque peu complexes dans leurs détails exhaustifs, dont le déroulement simplifié est le suivant: la matière première conduisant au clinker comporte principalement trois composants (chaux, silice, alumine) isolées, chacune de ces substances possède, à la pression atmosphérique, une température de fusion qui lui est propre:

- la chaux fond à 2 570 °C;
- l'alumine à 2 050 °C;
- la silice présente vers 1 750 °C un état de fusion pâteuse.

Mises en présence, après avoir été finement broyées, en proportions appropriées, ces substances forment, dès 1450 °C environ, une phase pâteuse unique; ce phénomène est appelé clinkérisation.

Constituants du béton

Ciment, granulats (fillers, sables et gravillons) et eau, éventuellement additions, adjuvants et pigments.

Coulage

L'un des trois modes de mise en œuvre du béton [aux côtés du pompage et de la projection (voir béton projeté)].

Coulis

Mélange fluide de ciment, éventuellement de fines, d'adjuvants, et d'eau utilisé pour le remplissage des joints, l'injection des gaines de précontrainte, la réalisation d'injections en infrastructures ou la mise en œuvre d'autres procédés de fondations spéciales.

Criblage

Triage mécanique et classement par grosseur d'un ensemble granulaire.

Cure

Opération de protection du béton consistant à le maintenir dans l'état d'humidité nécessaire à son durcissement pour éviter sa dessiccation. La cure doit être mise en œuvre dès les premières heures et maintenue jusqu'à plusieurs jours après le coulage.

Décarbonatation

Enlèvement de l'anhydride carbonique (CO₂) d'une substance. En particulier, la décarbonatation du calcaire (CaCO₃), complète à 900 °C environ à la pression atmosphérique, conduit à la libération de CO₂ et à la formation de chaux vive (CaO).

Ductilité

Déformabilité sans rupture fragile (la contrainte de rupture est atteinte après déformation appréciable).

Eau efficace (teneur en eau efficace)

Quantité d'eau théoriquement disponible pour hydratation du ciment. Elle est égale à la différence entre la quantité d'eau totale contenue dans le béton frais et la quantité d'eau absorbable par les granulats.

Eau totale (teneur en eau totale)

Somme de l'eau d'apport, de l'eau contenue dans et à la surface des granulats, de l'eau des adjuvants et des

additions utilisés sous la forme de suspension, et de l'eau résultant de l'ajout éventuel de glace.

Endommagement

État de la matière solide résultant de l'évolution progressive des dégradations mécaniques locales conduisant, à la limite, à la rupture.

Entraîneur d'air

Adjuvant qui, introduit dans l'eau de gâchage, provoque dans le béton ou le mortier la formation de microbulles d'air. Réparties uniformément et connectées dans le mélange, elles améliorent la résistance au gel du béton durci.

Exothermique

Se dit d'une réaction chimique qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur, au contraire d'une réaction endothermique qui en absorbe.

Fatigue

Détérioration des propriétés mécaniques d'un matériau solide soumis à des sollicitations répétées (en très grand nombre) provoquant des contraintes supérieures à sa limite d'endurance tout en restant inférieures à sa limite élastique.

Feret (loi de)

Expression expérimentale reliant la résistance prévisible à la compression d'un béton (fbc) à la nature des granulats (k), la classe du ciment (Rc), la teneur en eau efficace (Ve), la porosité (volume d'air Va) et le dosage en ciment (Vc): $fbc = (k \cdot Rc) / [1 + (Ve + Va) / Vc]$.

Fines

Éléments fins de dimensions < 0,0063 mm.

Floculation

Précipitation de substances en solution sous forme colloïdale.

Formulation

Opération consistant à définir le dosage des divers constituants d'un béton, afin de satisfaire aux exigences de propriétés à l'état frais, de résistance mécanique, de durabilité et d'aspect souhaités.

Fumées de silice

Constituant éventuel des ciments, et/ou addition éventuelle des bétons, composés de particules ultrafines

(de l'ordre de 0,01 à 1 micron) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles se combinent avec la chaux (réaction pouzzolanique), qui s'est libérée pendant l'hydratation du ciment, pour former un silicate de calcium hydraté résistant.

Gâchée

Quantité de béton frais obtenue en une seule opération de malaxage.

Gommage

Sablage très fin.

Granularité

Distribution dimensionnelle des grains d'un mélange granulaire : elle se détermine par l'analyse granulométrique.

Granulat

Matériau granulaire apte à être utilisé dans du béton. Les granulats peuvent être naturels ou artificiels, le cas échéant recyclés à partir de matériaux précédemment utilisés en construction.

Granulat courant

Granulat de masse volumique comprise entre 2 000 et 3 000 kg/m³.

Granulat léger

Granulat de masse volumique inférieure à 2 000 kg/m³.

Granulat lourd

Granulat de masse volumique supérieure à 3 000 kg/m³.

Granulométrie

Mesure de la granularité d'un granulat, c'est-à-dire de l'échelonnement des dimensions des grains qu'il contient, par passage de celui-ci à travers une série de tamis dont les dimensions sont normalisées.

Gravillon

Granulat d/D ($d \geq 2$ mm ; $D \leq 63$ mm).

Gypse

Roche cristallisée d'origine sédimentaire formée de sulfate de calcium hydraté (CaSO₄, 2H₂O).

Hydratation des ciments

Phénomène chimique par lequel un ciment fixe l'eau de gâchage et enclenche les processus de prise puis de durcissement. Cette réaction s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon le type de ciment.

Hydraulique (matériau hydraulique)

Matériau qui a la propriété, en présence d'eau, de faire prise et de développer des résistances mécaniques, même sous l'eau (c'est-à-dire en absence d'air).

Hydrofuge de masse

Adjuvant qui, introduit dans l'eau de gâchage, réduit, après le durcissement du béton, l'absorption de l'eau par capillarité, et donc améliore l'étanchéité du béton.

Hydrofuge de surface

Adjuvant qui, appliqué à la brosse ou pulvérisé sur la peau du béton après durcissement, l'imperméabilise superficiellement.

Hydrolyse

Réaction de transformation chimique d'un solide par l'eau avec dissociation de l'eau.

Hydroxyde

Résultat de la combinaison chimique d'eau et d'un oxyde métallique.

Insert

Élément fixé à l'intérieur du coffrage ou du moule avant le coulage du béton, destiné à assurer une fonction ultérieure dans le composant ou l'ouvrage produit : douille de fixation, rail d'ancrage, pièce de maintenance, plaque de soudage, élément de levage, etc.

Laitier de haut fourneau

Coproduit de la fusion en haut fourneau du minerai de fer. Selon que l'on opère ensuite un refroidissement lent ou rapide à l'eau, on obtient du laitier cristallisé (que l'on utilise en granulats) ou du laitier granulé que l'on peut utiliser, après broyage, comme constituant du ciment ou addition du béton.

Liant

Matière ajoutée à une autre pour agglomérer les parties composantes de celle-ci.

Liant hydraulique

Liant qui en présence d'eau fait prise et durcit.

Malaxage

Phase de la fabrication des bétons, au cours de laquelle sont mélangés les divers constituants dans une bétonnière ou un malaxeur.

Module d'élasticité

L'une des caractéristiques physiques d'un matériau solide. Il caractérise sa déformabilité sous sollicitation normale (compression ou traction). Dans le domaine de comportement élastique, la loi de HOOKE définit le module d'élasticité E comme terme de proportionnalité entre contrainte normale et déformation relative concomitante ; $\sigma = E \cdot \Delta L / L$. La grandeur physique de E est celle d'une contrainte ; E s'exprime donc à l'aide d'une unité de pression.

Mortier

Mélange de ciment, sable et eau, éventuellement complété par des adjuvants, des additions et des pigments. Il se distingue du béton par l'absence de gravillons.

Ouvrabilité

Qualité rendant compte de l'aptitude d'un béton à être mis en œuvre. Pour les bétons courants, on l'apprécie par une valeur de consistance, qui est déterminée par l'affaissement au cône d'Abrams (mesurée en mm).

Oxyde

Composé résultant de la combinaison chimique d'un corps avec l'oxygène.

Pâte pure

Mélange de ciment et d'eau.

Pervibrateur

Outil, couramment appelé « aiguille vibrante », permettant la vibration interne sur chantier d'un béton frais venant d'être coulé; il s'agit d'un tube métallique (contenant un moteur et un élément vibrant), d'un diamètre de 25 à 100 mm, que l'on plonge manuellement dans le béton.

Pigment

Produit en poudre introduit dans le mélange des constituants des mortiers et des bétons pour les teinter dans la masse. Il s'agit essentiellement d'oxydes, minéraux ou métalliques, ou de poudres organiques de synthèse.

Plastifiant

Adjuvant qui, introduit dans l'eau de gâchage, améliore l'ouvrabilité d'un béton en diminuant les frottements entre les grains du mélange.

Porosité

Pourcentage de volume des vides d'une matière poreuse (volume des pores connectés remplis d'eau ou d'air par unité de volume du matériau).

Pouzzolanique (matériau pouzzolanique)

Matériau qui a la propriété, en présence d'eau, de fixer le calcium pour développer des résistances mécaniques, même sous l'eau.

Prise

Étape de l'hydratation des pâtes de ciment, mortiers et bétons, d'une durée comprise entre quelques minutes et quelques heures, durant laquelle le mélange des constituants se raidit et commence à acquérir sa résistance.

Recouvrement

Chevauchement, destiné à assurer la continuité mécanique en faisant appel à l'adhérence (transmission acier/béton/acier), sur une certaine longueur appelée longueur de recouvrement, de deux tronçons successifs d'armatures pour béton armé.

Réducteur d'eau

Adjuvant qui, introduit dans l'eau de gâchage, permet de réduire, à ouvrabilité constante, la teneur en eau, et par conséquent augmente les résistances mécaniques des bétons, mortiers et coulis.

Ressuage

Phénomène d'exsudation d'une faible partie de l'eau de gâchage (qui se localise en surface supérieure libre) avant la prise.

Retardateur de prise

Adjuvant qui, introduit dans l'eau de gâchage, augmente les temps de début et de fin de prise du ciment dans un béton, un mortier ou un coulis.

Rhéologie

Branche de la physique traitant de l'écoulement de la matière (élasticité, plasticité, écoulement).

Rupture fragile

Rupture dans laquelle la contrainte de rupture est atteinte sans avoir été précédée d'une déformation appréciable.

Sablage

Procédé de traitement esthétique du parement d'un ouvrage en béton par projection après durcissement du béton d'un jet de sable à l'air comprimé.

Sable

Granulat 0/D ($D \leq 4$ mm).

Scellement

Longueur minimale nécessaire à la transmission complète de l'acier vers le béton de l'effort de traction d'une armature pour béton armé.

Serrage

Étape de la mise en œuvre des bétons qui consiste, essentiellement par vibration ou pervibration, à chasser l'air et à optimiser l'arrangement des grains du mélange pour en améliorer la compacité.

Solvation

Agrégation de molécules d'un solvant avec des ions de la substance qui s'y dissout (soluté).

Superplastifiant

Adjuvant qui, introduit dans un béton, un mortier ou un coulis, améliore très nettement l'ouvrabilité du mélange, à rapport E/C constant.

Surface spécifique (surface BLAINE)

Somme de la surface développée des grains d'un mélange pulvérulent de masse unitaire donnée. Exprimée pour le ciment en cm^2/g ; valeurs courantes pour le ciment: 3 000 à 4 000 cm^2/g .

Thixotropie

Propriété de certains colloïdes de se comporter comme un gel au repos ou comme un liquide [phase dispersée (discontinue) de micelles au sein d'un liquide disperser] quand on l'agite.

Ultrafines

Éléments très fins de dimensions de l'ordre de 0,01 à 1 μm ; les ultrafines les plus utilisées actuellement sont les fumées de silice.

Vibration

Opération de serrage du béton frais après mise en place afin d'en améliorer la compacité. La vibration peut être interne ou externe au béton.

Viscosité

Caractéristique d'un matériau fluide tendant à s'opposer à son écoulement par gravité. Plus la viscosité d'un béton frais est faible, plus grande est son ouvrabilité.

Crédit photographique

BPE, CERIB, Cimbéton, Holcim, Lafarge/P. Ruault,
G. Maucuit-Lecomte, A. Vavel, tous droits réservés.

Illustration de la couverture

OBÉA Communication

Mise en page et réalisation

Amprincipe Paris
R.C.S. Paris B 389 103 805

Impression

Imprimerie Chirat

CIM *béton*

CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

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



ÉCOLE FRANÇAISE DU BÉTON

7, place de La Défense
92974 Paris-La-Défense CEDEX