

Bétons Innovants I

Cours 1^{ère} année
Master Académique

Matériaux en Génie Civil

Les nouveaux bétons

Les bétons ont connu, ces dix dernières années, une évolution technologique considérable. La compréhension des phénomènes physiques, chimiques et physico-chimiques qui sous-tendent le comportement du béton, les évolutions de la chimie minérale et organique en particulier ont permis des avancées spectaculaires en matière de formulation, de maîtrise de la rhéologie des bétons à l'état frais et de durabilité des bétons à l'état durci. Les nouveaux bétons offrent des résistances mécaniques exceptionnelles, répondent à tous les enjeux actuels en matière de mise en œuvre, de sécurité, de santé, de confort et d'esthétique, en alliant compétitivité économique, durabilité, et respect de l'environnement.

Sommaire

1. Propriétés et performances des matériaux ;
2. Les bétons autoplaçants (BAP) ;
3. Les bétons à hautes performances (BHP) ;
4. Les bétons fibrés (BF) ;
5. Béton de Poudres Réactives (BPR) ;
6. Béton à base de polymères (BP).

1. Propriétés et performances des matériaux

Les propriétés principales des matériaux peuvent être divisées en plusieurs groupes tels que:

- **Propriétés physiques:** (la dimension; la densité; la masse volumique de différentes conditions; la porosité; l'humidité ...etc.),
- **Propriétés mécaniques:** (la résistance en compression, en traction, en torsion ...etc.)
- **Propriétés chimiques:** (l'alcalinité, l'acide ...etc.)
- **Propriétés physico-chimiques:** (l'absorption, la perméabilité, le retrait et le gonflement ...etc.)
- **Propriétés thermiques:** (la dilatation, la résistance et comportement au feu, ...etc.)

Quelques caractéristiques et propriétés physiques courantes des matériaux de construction sont:

Propriétés liées à la masse et au volume:

- Masse spécifique ;
- Masse volumique ;
- Porosité ; densité.

Propriétés liées à l'eau:

- Humidité ;
- Perméabilité ;
- Degré d'absorption d'eau ;
- Variation de dimension en fonction de la teneur en eau.

Propriétés thermiques:

- Résistance et comportement au feu ;
- Chaleur spécifique ; Résistance thermique ; Conductivité thermique ;
- Coefficient d'expansion thermique.

Les caractéristiques et propriétés mécaniques principales d'un matériau sont: la résistance à la compression, la résistance à la traction, le module de formation, le module d'élasticité, etc.

Les matériaux de construction doivent:

1. posséder certaines propriétés techniques
2. pouvoir facilement être travaillés
3. être économiques.

La science des matériaux s'efforce de relier les propriétés macroscopiques des matériaux à leur structure microscopique.

La technologie des matériaux s'occupe des domaines d'application de la science des matériaux à l'art de construire (à savoir: choix des matériaux, détermination de leurs caractéristiques, connaissance de leurs propriétés, techniques de mise en œuvre, méthodes d'essais et développement de **nouveaux matériaux**).

Dans ce cours on va présenter quelques propriétés comme les propriétés physiques et les propriétés mécaniques

A. Les propriétés physiques

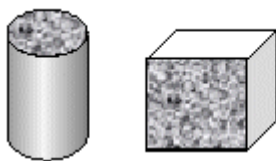
La masse volumique apparente

Définition: C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel, après passage à l'étuve à 105 ± 5 °C, notée γ_0 et exprimée en (gr/cm^3 ; kg/m^3 ; T/m^3).

Détermination:

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la masse volumique apparente des matériaux de construction selon leur dimension et leur dispersion:

a) **Pour les matériaux solides** : les roches naturelles, le béton, le bois ..., on peut faire des échantillons de forme géométrique (cubique, cylindrique, ..).



$$\gamma_{ap} = \frac{M_s}{V_{ap}}$$

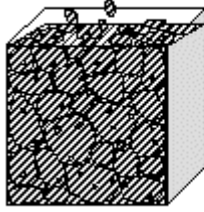
γ_{ap} – Masse volumique apparente (kg/m^3).

M_s – Masse d'un corps sèche.

V_{ap} – Volume apparent.

b) **Pour les matériaux incohérents** (ensemble de grains – sable ou gravier).

La détermination de la masse volumique apparente peut se faire en utilisant un récipient standard (de volume connu).



$$\gamma_{ap} = \frac{M_s}{V_{ap}}$$

γ_{ap} – Masse volumique apparente (kg/m^3).

M_s – Masse d'un corps sèche.

V_{ap} – Volume apparent.

La masse volumique d'un ensemble de grains est fortement influencée par la composition granulométrique, la forme des grains, le degré de tassement ainsi que la teneur en eau lorsque les grains sont petits. La masse volumique apparente des sables ou des graviers peuvent varier entre 1400 à 1650 kg/m^3 .

c) **Pour les matériaux de construction qui n'ont pas de forme géométrique** (forme de patate).

La détermination de la masse volumique apparente des matériaux avec cette forme peut se faire de façon indirecte. Dans ce cas, les échantillons étudiés doivent être enrobés de paraffine afin d'être protégés de la pénétration de l'eau, ensuite on va les peser dans l'eau.

Pour déterminer la masse volumique des matériaux de ce type on a:

M_s - Masse sèche d'échantillon (g)

M_{S+P} - Masse sèche d'échantillon après avoir enrober une paraffine (g).

$M_{(S+P)L}$ - Masse sèche d'échantillon après avoir enrobé de paraffine et pesé dans l'eau (g).

g_p – Masse de la paraffine ayant enrobé de l'échantillon et γ_p – masse volumique absolue de paraffine.

$$\gamma_o = \frac{M_s}{\frac{(M_{S+P} - M_{(S+P)L})}{1} - \frac{g_p}{\gamma_p}}$$

$M_{S+P} - M_{(S+P)L}$ – est la poussée d'Archimède.

$\frac{(M_{S+P} - M_{(S+P)L})}{1}$ – volume apparent d'échantillon absorbée par la paraffine.

$\frac{g_p}{\gamma_p}$ – volume de paraffine.

La masse volumique absolue

Définition: C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule, pores à l'intérieur des grains exclus), après passage à l'étuve à 105 °C, notée ρ et exprimée en (g/cm^3 , kg/m^3 ou T/m^3).

Détermination:

Si les matériaux étudiés sont poreux, on doit les concasser et les broyer jusqu'à ce que la dimension des grains de matériaux (l'échantillon) devienne inférieure à 0,2 mm. Ceci afin d'éliminer les pores et les vides existants dans les matériaux. Ensuite, on verse l'échantillon dans un récipient, qui contient de l'eau pour pouvoir déterminer la masse volumique absolue (Voir la figure 1)

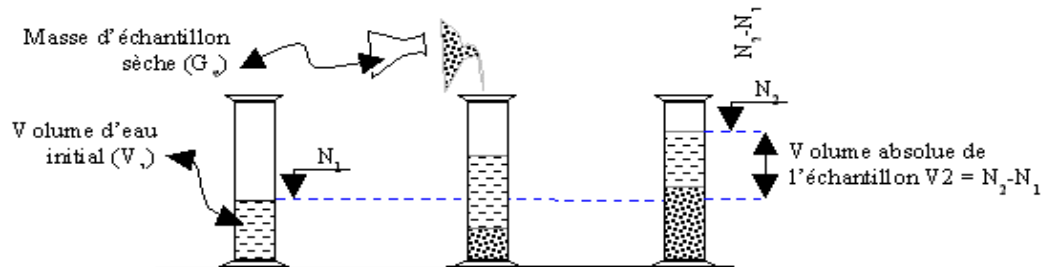


Fig.1. Détermination de la masse volumique absolue d'un matériau

D'abord on va remplir le volumétre d'eau (N_1), ensuite on verse l'échantillon sec dans le volumétre et le niveau de l'eau va augmenter (N_2). La différence entre le niveau N_1 et N_2 est le volume absolu de l'échantillon. La masse volumique absolue peut se calculer:

$$\gamma = \frac{M_s}{N_2 - N_1}$$

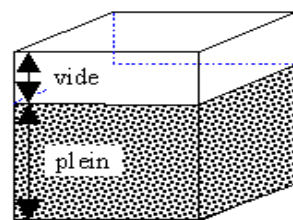
Si les grains ne sont pas poreux, la masse spécifique absolue et apparente sont identiques

$$\gamma_{\text{granulats usuels}} = 2,60 \text{ à } 2,70 \text{ (en moyenne } 2,68)$$

A la place de la masse spécifique et de la masse volumique, on utilise aussi les anciennes dénominations de poids spécifique et de poids volumique ainsi que les notions de densité apparente qui sont des nombres sans dimension égaux au rapport de la masse spécifique ou de la masse volumique à la masse d'un volume égal absolu ou apparent d'eau à 4° C.

La porosité et compacité (des granulats)**Porosité:**

La porosité est le rapport du volume vide au volume total.

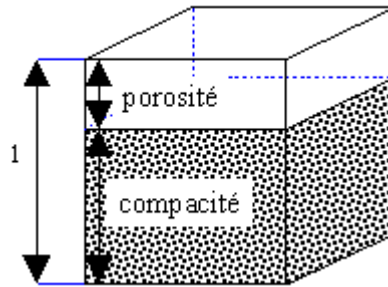
**Volume quelconque**

On peut aussi définir la porosité comme le volume de vide par unité de volume apparent.

$$p = \frac{\text{volume de vide}}{\text{volume total}}$$

Compacité:

La compacité est le rapport du volume des pleins au volume total.



Volume unitaire

Ou volume des pleins par unité de volume apparent.

$$p = \frac{\text{volume plein}}{\text{volume total}}$$

La porosité et la compacité sont liées par relation:

$$p+c=1$$

Porosité et compacité:

La porosité et la compacité sont souvent exprimées en %. La somme des deux est alors égale à 100%.

En effet:

$$p + c = \frac{\text{volume de vide}}{\text{volume total}} + \frac{\text{volume de plein}}{\text{volume total}} = \frac{\text{volume total}}{\text{volume total}} = 1$$

Si l'on connaît la masse volumique Δ et la masse spécifique γ_0 d'un matériau, il est aisé de calculer sa compacité et porosité.

$$c = \frac{\text{volume de plein}}{\text{volume total}} = \frac{V_{\text{absolu}}}{V_{\text{apparent}}} = \frac{V_{\text{absolu}}}{V_{\text{apparent}}} \cdot \frac{M}{M} = \frac{M/V_{\text{apparent}}}{M/V_{\text{absolu}}}$$

d'où $c = \frac{\Delta}{\gamma}$ ou, exprimée en %,

$$\begin{aligned} c\% &= 100 \frac{\Delta}{\gamma} \\ p\% &= 100 \left(1 - \frac{\Delta}{\gamma}\right) \end{aligned}$$

L'humidité

L'humidité est une des propriétés importante des matériaux de construction. Elle est un indice pour déterminer la teneur en eau réelle des matériaux au moment de l'expérience. En général l'humidité est

notée W et s'exprime en pourcentage (%). On peut déterminer l'humidité de matériaux quelconques en utilisant la formule suivante:

$$W = \frac{G_h - G_s}{G_s} \cdot 100\%$$

Où

G_s – est la masse sèche d'échantillon (après passage à l'étuve)

G_h – est la masse humide d'échantillon.

Le degré de l'humidité des matériaux dépend de beaucoup de facteurs, surtout de l'atmosphère où ils sont stockés, le vent, la température et de la porosité du matériau.

L'absorption de l'eau

L'absorption de l'eau du matériau est la capacité de conserver des échantillons quand ils sont immergés au sein de l'eau à température de 20,5 °C et à la pression atmosphérique. A cette condition l'eau peut pénétrer dans la plupart des vides intersticiels du matériau. Si la porosité du matériau est importante, l'absorption de l'eau est plus grande, mais l'absorption est toujours inférieure à la porosité du matériau.

On peut déterminer le degré d'absorption de deux manières:

a) L'absorption calculée suivant la masse du volume apparent d'échantillon notée H_v (%)

$$H_v = \frac{G_{ab} - G_s}{V_0} \cdot \%$$

Où

G_{ab} – est la masse absorbante.

G_s – est la masse sèche d'échantillon.

V_0 – est le volume apparent du matériau.

b) L'absorption calculée suivant la masse de l'échantillon notée H_p (%)

$$H_p = \frac{G_{ab} - G_s}{G_s} \cdot \%$$

Où

G_{ab} – est la masse absorbante.

G_s – est la masse sèche d'échantillon.

V_0 – est le volume apparent du matériau.

Degré de Saturation (Teneur en eau)

La résistance mécanique des matériaux dépend de plusieurs facteurs. Un des plus importants facteurs influençant la résistance est le degré de saturation. On a remarqué que les matériaux absorbants de l'eau, ont une résistance certainement diminuée. C'est pourquoi on doit déterminer le degré de saturation de matériaux.

Lorsque tous les vides d'un corps sont remplis d'eau, on dit qu'il est saturé. Le degré de saturation est le rapport du volume de vide rempli d'eau au volume total de vide. Il joue un grand rôle dans les phénomènes de destruction des matériaux poreux par le gel. En se transformant en gel, l'eau augmente de 9 % en volume environ.

Le degré de saturation est l'absorption maximale de matériaux sous les conditions de pression et de température. Il y a deux moyens pour réaliser la saturation dans les échantillons de matériaux: l'immersion des échantillons dans l'eau bouillante et à la saturation en pression d'air.

Pour déterminer le degré de saturation en pression d'air, on a la démarche suivante:

- Immerger les échantillons dans l'eau.
- Donner la pression de base de 20 mm Hg jusqu'au moment où on peut éliminer toutes les bulles d'air.
- Ensuite on fait baisser la pression de base de 20 mm Hg à la pression atmosphérique. À ce moment là, presque tout le vide est rempli d'eau et dans ce cas-là on dit que les échantillons sont saturés.

Le degré de saturation peut se calculer par la formule suivante:

$$BH = \frac{G_{sat} - G_s}{V_0} \cdot \%$$

Où

BH – est le degré de saturation (%)

G_{sat} – est la masse d'échantillon au moment de saturation.

G_s – est la masse sèche d'échantillon.

V_0 – est le volume apparent du matériau.

Mais de toutes façons, on ne peut pas remplir entièrement les vides de l'échantillon d'eau, c'est pourquoi il est obligatoire de présenter cette valeur en une autre solution: "coefficient de saturation", notée C_{BH} et exprimée en %. Ce coefficient peut être calculé avec la formule suivante:

$$C_{sat} = \frac{BH}{\gamma} \cdot \%$$

Où

γ – est le degré de porosité.

BH – est le degré de saturation.

Pour connaître la diminution de la résistance de matériaux en présence d'eau, on utilise l'indice molle:

$$K_m = \frac{R_{BH}}{R_k} \cdot \%$$

Où

K_m – Indice molle

R_{BH} – Résistance d'échantillon au moment de saturation.

R_k – Résistance d'échantillon sec.

A la place de la saturation, on utilise aussi la teneur en eau d'un matériau. Elle est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec. On peut aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau W contenu par unité de poids de matériau sec.

$$W = \frac{E}{P_s} = \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

Où

E – Poids d'eau dans le matériau.

P_s – Poids du matériau sec.

P_h – Poids matériau humide

Si W est exprimé en % :

$$W \% = 100 \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

A partir des définitions données plus haut, on peut écrire les relations :

$$E = \frac{W \%}{100} P_s \quad P_h = P_s + E = \left(1 + \frac{W \%}{100}\right) P_s$$

$$P_s = \frac{P_h}{1 + \frac{W \%}{100}}$$

$$E = \frac{W \%}{100 + W \%} P_h$$

L'eau et les matériaux pierreux (Divers états de l'eau dans un matériau poreux)

On distingue trois grandes catégories d'eau:

- L'eau absorbée: qui se trouve dans le vide entre les particules de matière solide;
- L'eau adsorbée: qui se trouve à la surface des particules solides; Plus les particules sont petites, plus cette eau joue un rôle important. La première couche moléculaire est orientée et présente des propriétés voisines de celles de l'état solide;
- L'eau chimiquement liée: qui fait partie des particules solides.

Ces distinctions ne sont pas toujours absolument claires.

Par exemple, dans le gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et dans le plâtre $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$, l'eau intervient dans l'édifice cristallin, mais tout en conservant son identité. Dans un spectre infra-rouge du gypse et du plâtre, il apparaît les bandes anhydrite CaSO_4 et eau H_2O juxtaposées. On parle d'eau d'hydratation ou de cristallisation.

Par contre, dans la réaction $\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg(OH)}_2$, l'eau se combine chimiquement en perdant son identité.

L'eau dans les granulats destinés à la confection des bétons

En général, les granulats naturels utilisés pour la confection du béton sont peu poreux et n'absorbent pratiquement pas d'eau lorsqu'ils sont gâchés avec le ciment et l'eau. Par contre, des granulats artificiels, tels le LECA (Light expanded clay aggregate = agrégats légers expansés d'argile), sont poreux. Il faut alors tenir compte de l'absorption de l'eau par les granulats lorsque l'on détermine la quantité d'eau requise pour fabriquer le béton.

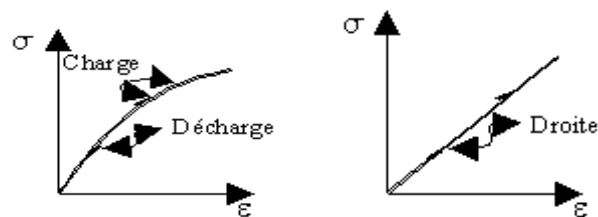
B. Les propriétés mécaniques

La déformation

La déformation est une des propriétés essentielles pour des matériaux de construction. Selon la caractérisation des déformations, on les divise en trois sortes:

Déformation élastique:

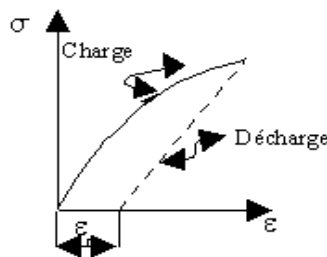
Lorsque l'on effectue un essai de mise en charge et si, après décharge le corps reprend les mêmes formes qu'il avait avant l'essai et qu'il ne reste aucune déformation résiduelle, on dit que le corps a un comportement parfaitement élastique (Fig 2).



De nombreux corps soumis à des charges peu élevées ont un comportement presque élastique et la déformation est approximativement proportionnelle à la contrainte. Si l'on reporte les mesures sur un diagramme contrainte (σ) et déformation (ϵ), on obtient une ligne droite (Fig 3). Ce type de déformation est appelée élasticité linéaire.

Déformation plastique:

La déformation est dite plastique, si après décharge le corps ne reprend pas les mêmes formes qu'il avait avant l'essai, il reste quelques déformations (fig 4). Cette déformation est appelée aussi déformation résiduelle.



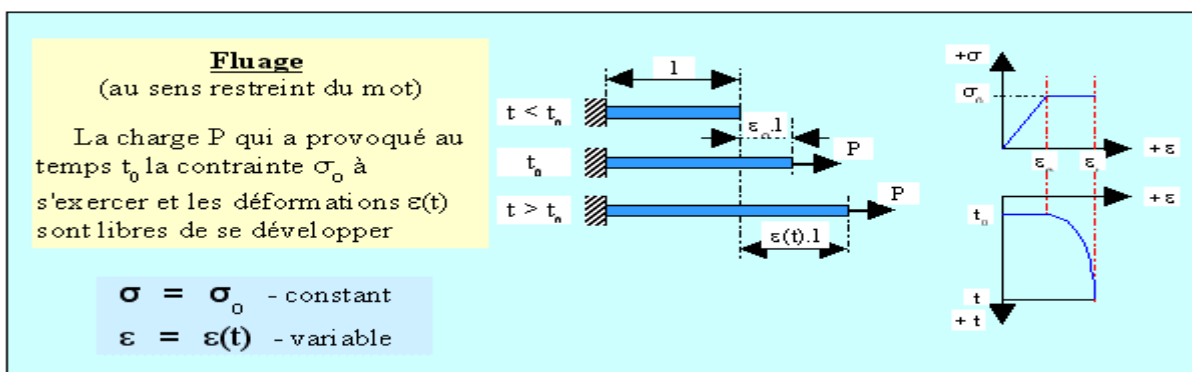
Le fluage et la relaxation :

Lorsqu'un corps est soumis à l'action prolongée d'une force, la déformation instantanée apparaissant lors de la mise en charge est suivie d'une déformation différée lente à laquelle on donne le nom de fluage.

Le fluage peut se manifester de deux façons:

- 1) Le fluage proprement dit (au sens restreint du mot)
- 2) La relaxation.

Admettons que l'action permanente ou de longue durée à laquelle est soumis le corps ait produit un état de contrainte σ_0 et une déformation ε_0 à l'instant de la mise en charge. Deux cas extrêmes peuvent se produire:



La résistance

La résistance des matériaux est un des cours de la formation des ingénieurs en génie civil. Dans ce cours on apprend de façon plus détaillée les calculs du comportement des matériaux, mais dans le cours de "Matériaux de construction" on va montrer seulement la résistance en compression et en traction.

Tableau 1 : Schéma et méthode de détermination de la résistance à la compression

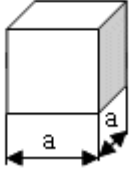
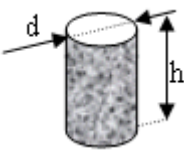
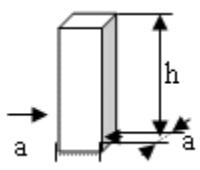
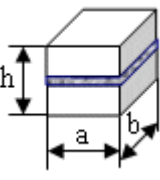
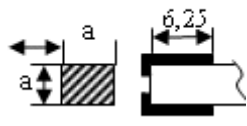
Echantillon	Schéma	Formule de calcul	Matériaux testés	Dimension des échantillons (cm)
Cube		$R = \frac{P}{a^2}$	Béton Mortier Roche naturelle	15x15x15 7,07x7,07x7,07 10x10x10 15x15x15 20x20x20
Cylindre		$R = \frac{4P}{\pi d^2}$	Béton Mortier Roche naturelle	d=15 ; h=30 d=h= 5; 7; 10; 15
Prisme		$R_{pr} = \frac{P}{a^2}$	Béton Bois	a=10; 15; 20 h=40; 60; 80 a=2; h=3
Échantillons assemblés		$R = \frac{P}{S}$	Brique	a=12; b=12,3; h=14
Moitié d'échantillon de Mortier		$R = \frac{P}{S}$	Ciment	a=4; S=25 cm ²

Tableau 2 : Schéma et méthode de détermination de la résistance à la flexion

Echantillon	Schéma	Formule de calcul	Matériaux testés	Dimension des échantillons (cm)
Essai de traction par flexion				
Prismatique Brique		$R_f = \frac{3Pl}{2bh^2}$	Ciment Brique	4x4x16 15x15x15
Prismatique		$R_{pf} = \frac{4l}{bh^2}$	Béton Bois	15x15x60 2x2x30
Essai de résistance en traction pure				
Cylindrique Prismatique		$R_t = \frac{4P}{\pi d^2}$ $R_t = \frac{P}{a^2}$	Béton Armature	5x5x50 10x10x80 d ₀ =1; l ₀ =5; l ≥ 10
Cylindrique		$R_{tf} = \frac{P}{\pi dl}$	Béton	d=15; l=30 d=16; l=32

En général la résistance des matériaux est sa capacité contre les actions des forces externes (les charges, les conditions d'ambiance) étant définie en contrainte maximale quand l'échantillon est détruit.

La propriété principale de béton durci est sa résistance à la compression. Pour pouvoir évaluer la résistance à la compression, on doit avoir la valeur moyenne de trois échantillons au moins, dont les différences entre eux doivent être inférieures à 15 %.

Il existe deux méthodes pour déterminer la résistance des matériaux : Méthode «Destruction d"échantillon» et méthode «Non destruction d"échantillon».

Méthode « destruction d'échantillon » :

La Méthode de destruction d'échantillon est la plus utilisée, surtout pour déterminer la résistance à la compression de béton, mortier, bloc de béton etc. Ce type de détermination est largement utilisé dans les laboratoires. Le mode opératoire est le suivant:

- Préparation des échantillons.
- Entretien des échantillons.
- Destruction des échantillons.
- Détermination des valeurs de résistance.

L'opération de l'essai est exécutée sur les réglementations de la norme concernée.

Méthode « Non destruction d'échantillon » :

La méthode de non destruction d'échantillon est une des méthodes, qui permet l'obtention rapide de la résistance des matériaux des ouvrages (béton d'un ouvrage), sans procéder à des prélèvements de béton durci par carottage.

Généralement il existe quelques moyens usités :

- On utilise l'appareil qui s'appelle « scléromètre ». En fait il s'agit de tester la dureté de surface d'un béton durci (d'ouvrage). Cette dureté d'autant plus élevée que le béton est plus résistant, cela permet d'avoir un ordre de grandeur de la résistance atteinte par un béton à un âge donné.
- On utilise l'appareil qui peut lancer le rayon X à travers l'ouvrage. Selon le changement de la vitesse du rayon X, il est possible de déterminer la résistance du matériau.
- L'utilisation de l'auscultation sonore : Le principe de l'essai consiste à mesurer la vitesse du son à l'intérieur du béton. Cette vitesse est d'autant plus élevée que le béton est plus résistant; cela permet d'avoir un ordre de grandeur de la résistance atteinte par un béton à un âge donné.

2. Les bétons autoplaçants (BAP)

Les BAP ont été développés dans les années 80 par des chercheurs de *l'Université de Tokyo au Japon*. Leur objectif était d'augmenter *la cadence de travail sur chantier*. Un BAP est un béton très fluide, homogène et stable (*c'est-à-dire une résistance à la ségrégation et au ressuage*). Les particularités de formulation des BAP liées à leurs exigences de *mise en place sans vibration* (*sous l'effet de leur propre poids et de leurs caractéristiques d'écoulement*). Ils épousent ainsi des formes de *coffrage complexes* sur les chantiers comme dans les usines de préfabrication. *Ceci n'est possible que si le BAP contient un adjuvant chimique de type dispersant (superplastifiant) et des additions minérales.*

2.1. Ils offrent de nombreux avantages :

- Facilité de mise en œuvre (en général par pompage) et exécution plus rapide ;
- L'allongement des temps d'ouvrabilité ;
- La diminution des reprises de bétonnage ;
- Le coulage facilité de structures complexes et souvent fortement ferrillées ;
- Un parfait enrobage des armatures ;
- Remplissage de parties difficilement accessibles ;
- Amélioration des conditions de travail et de sécurité ;
- Réduction des délais et des coûts de production, économie de main d'œuvre ;
- Réduction des besoins en matériel ;
- Amélioration de l'esthétique et de la qualité des parements ;
- Les BAP présentent des résistances et une durabilité analogues à celles des bétons mis en œuvre par vibration ;
- L'absence de vibration des BAP engendre une baisse considérable des niveaux du bruit ainsi que la diminution d'énergie de mise en place et le coût global des constructions pourraient ainsi être moindres.

2.2. Les innovations des BAP

- La mise en place des BAP est grandement facile et peut généralement être réalisée par un seul ouvrier, même dans le cas de volumes importants donc, il est raisonnable de penser que *la main d'œuvre nécessaire serait moindre ;*
- *Nécessité d'une bonne collaboration* entre le fournisseur d'adjuvants, le bétonnier et l'entreprise de gros œuvre ;
- *Surveillance des étanchéités des coffrages ;*
- *La cure des BAP est absolument nécessaire.*

2.3. Les domaines d'application des BAP

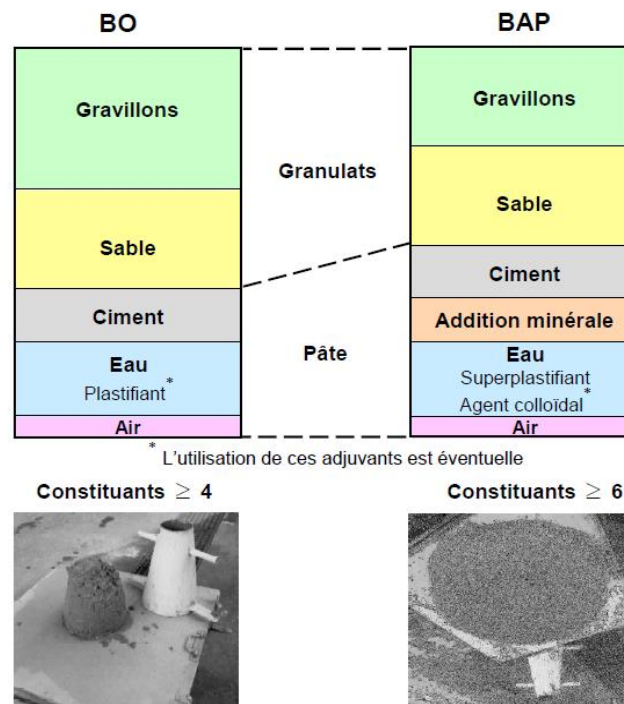
Ces domaines comprennent le bâtiment, les éléments pour le génie civil (bordures, chambres d'éclairage public, gradins, fossés,...), pour des formes et des géométries complexes (voiles courbes,...), pour des voiles minces et de grande hauteur (piles de ponts,...), pour des voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures, les ponts, les tunnels, la préfabrication, les travaux d'assainissement et de réhabilitation.

2.4. Structure des BAP

Les BAP sont formulés différemment des BO (figure). Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau, de l'air et d'une addition minérale, est privilégiée au détriment des gravillons. En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une **addition minérale** qui sert de substitut aux gravillons.

Cependant, cette formulation n'est pas suffisante pour atteindre la fluidité, il est donc nécessaire d'ajouter aux BAP un défloculant (**superplastifiant**), sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée. D'autres adjuvants chimiques tels que **les agents colloïdaux** (*agents de viscosité*) peuvent être introduits afin d'empêcher la ségrégation et d'assurer une meilleure stabilité de béton.

Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr la méthode de formulation choisie.



Comparaison de la structure d'un BAP et d'un BO

De manière plus approfondie, les recherches consacrées aux BAP nous permettent de souligner cinq particularités de leur structure :

1. Un volume de pâte élevé

Les frottements entre les gravillons limitent l'étalement et l'écoulement des bétons. C'est pourquoi, les BAP contiennent un volume de pâte important dont le rôle est d'écarter les gravillons les uns des autres.

2. Une quantité importante de fines

Pour assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP renferment une quantité de fines supérieures à celle des BO. Toutefois,

pour éviter des problèmes d'élévation exagérée de la température lors de l'hydratation ainsi que pour abaisser leur coût global, le liant est souvent un composé binaire, voire ternaire ; **ciment Portland mélangé avec cendres volantes, laitier, fillers calcaires, pouzzolanes, ou fumée de silice.**

3. Un faible volume de gravillons

Les gravillons roulés ou concassés peuvent en principe être utilisés. Mais pour faciliter l'écoulement du mélange, la confection d'un bon béton autoplaçant utilise généralement des gravillons roulés de rivières et un apport de fines (par exemple des fillers calcaires) plus importants. Du fait que les frottements entre les gravillons limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons, **le volume de gravillons est donc limitée**, en général le rapport (gravillons / sable) exprimé en masse est de 1 dans un BAP. Le risque de blocage dans un milieu fortement ferraillé augmente lorsque le D_{\max} augmente. Ainsi, le D_{\max} des gravillons doit être compris entre 10 et 20 mm.

4. Un fort dosage de superplastifiant

L'introduction de dosage relativement important de superplastifiant dans les BAP permet en premier lieu de réduire la teneur en eau tout en conservant leur grande maniabilité. Toutefois, un dosage trop élevé (**proche ou supérieur au dosage de saturation**) peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

5. Utilisation éventuelle d'agent colloïdal

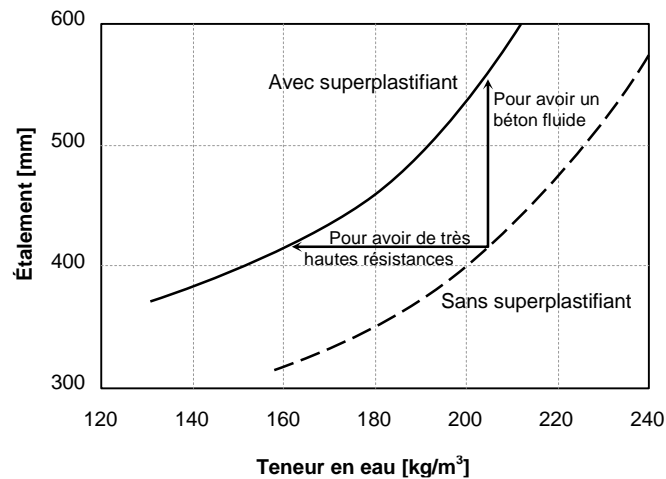
Ce produit, comme les fines, a pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des gravillons en rendant la pâte plus épaisse. De façon schématique l'utilisation de ce produit semble se justifier dans le cas des bétons **ayant des rapports eau/liant élevés** car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. Il semble par contre inutile dans le cas de BAP ayant des rapports massique eau/liant faible (**BAP de résistance supérieure à 50 MPa**). Pour la gamme des bétons intermédiaire, leur utilité est à étudier au cas par cas. L'agent colloïdal a la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations d'eau vis-à-vis du problème du ressuage et de la ségrégation.

2.5. Constituants des BAP

Généralement, on peut diviser les constituants entrant dans la fabrication du BAP, selon leur utilisation, en trois catégories ; **les matériaux de base** (ciment, gravillons et eau de gâchage), **les additions minérales** (cendres volantes, laitier, fillers calcaires, pouzzolanes, ou fumée de silice), ainsi que **les adjuvants chimiques** (superplastifiants et les agents colloïdaux).

2.5.1. Superplastifiants

Ce sont **des réducteurs d'eau à haute efficacité**, et se présentent généralement sous forme de **liquide**. La figure montre que l'utilisation des superplastifiants **permet d'abaisser la teneur en eau en maintenant un même étalement**, ce qui donne de grandes performances du béton durci. De plus, elle permet d'améliorer l'étalement, afin de confectionner un béton extrêmement fluide, sans le besoin d'ajouter une quantité d'eau supplémentaire.



Relation entre l'étalement et le dosage en eau d'un béton avec et sans superplastifiant

2.5.2. Agents colloïdaux

En 1977, des agents colloïdaux *améliorant la viscosité, la stabilité et d'empêcher la ségrégation du béton* ont été développés en Allemagne. Ces adjuvants, se présentent généralement sous forme de *poudre*. L'utilisation d'agents de viscosité a pour but de *stabiliser le béton en fixant l'eau dans le mélange, ce qui diminue le phénomène de ressuage et donne une plus grande cohésion de mélange des BAP*. Leur utilisation commence à être populaire, mais ils sont actuellement relativement chers comparés aux autres adjuvants. Ils ont été classés selon leur origine en trois catégories : polymères naturels (gommes naturelles) ; les polymères semi-synthétiques et les polymères synthétiques.

2.6. Caractérisation des BAP à l'état frais

Les chercheurs ont développé différents types d'essais, qui permettent d'évaluer l'ordre de grandeur de *fluidité*, de *déformabilité* et de *stabilité*.

2.6.1. Essai de fluidité (Étalement)

L'essai d'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité des BAP. Il s'effectue comme un *essai d'affaissement au cône d'Abrams*. On mesure le diamètre moyen (*moyenne sur deux diamètres orthogonaux*) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute. Ce diamètre, appelé *étalement* (ϕ), donne une indication sur la mobilité du BAP dans un milieu non confiné. *La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être ≥ 55 cm.*

La figure montre les différentes étapes de l'essai d'étalement. Cet essai est très facile à réaliser en chantier.

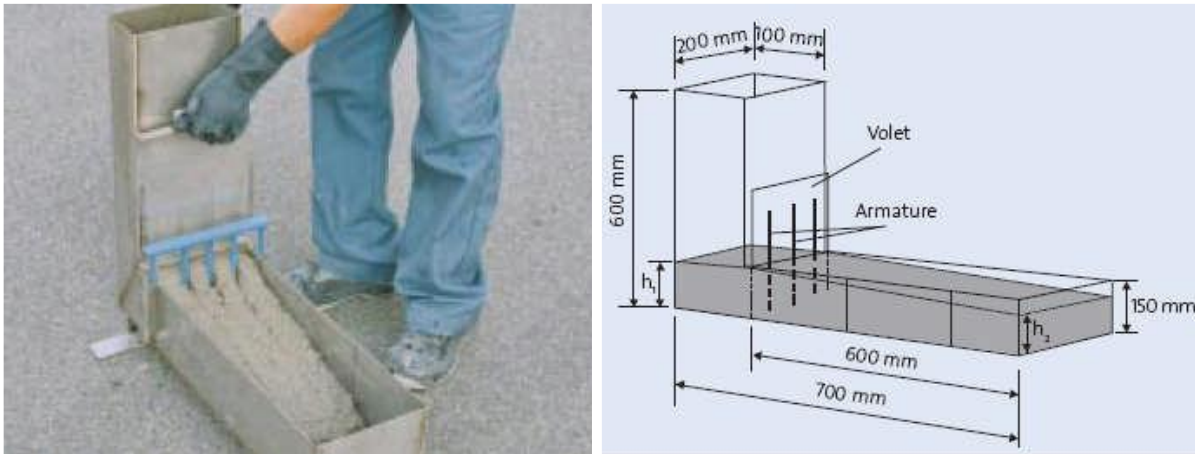


Différentes étapes de l'essai d'étalement

2.6.2. Essai de déformabilité (boîte en «L»)

L'essai de la boîte en «L» permet de *tester la mobilité du béton en milieu confiné* et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas gênée par des phénomènes de blocage inacceptables.

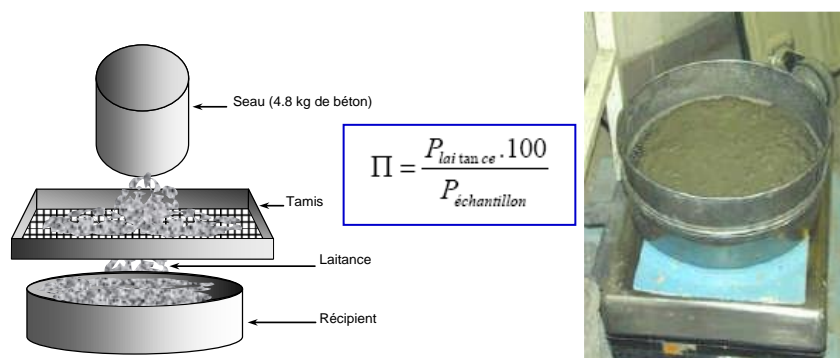
Le principe de cet essai est le suivant ; La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton. Après une minute, la trappe est levée permettant l'écoulement du béton dans la partie horizontale de la boîte à travers trois armatures de diamètre $\varnothing 14$ mm et distant entre eux de 39 mm. Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs finales de béton aux extrémités (H_1 à l'extrémité de la partie verticale et H_2 à celle de la partie horizontale) et on exprime le résultat de *taux de remplissage H_2/H_1* qui renseigne sur la mobilité de BAP en milieu confiné. *Ce taux doit être ≥ 0.80* pour obtenir un BAP. La figure représente l'écoulement de BAP lors de cet essai.



L'écoulement de BAP dans la boîte en «L»

2.6.3. Essai de stabilité (stabilité au tamis)

La procédure de cet essai est la suivante ; À la fin du malaxage, 10 litres de béton sont versés dans un seau. Après une attente de 15 minutes, un échantillon de 4,8 kg est versé du seau sur un tamis de maille 5 mm (figure). 2 minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis. *Le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon donne l'indice de ségrégation (π)*. (L'indice π doit être $\leq 20\%$).



Représentation de l'essai de stabilité au tamis

2.7. Caractérisation des BAP à l'état durci

2.7.1. Résistances mécaniques

La résistance à la compression : Les BAP peuvent présenter une gamme étendue des résistances à la compression en jouant sur la nature du liant qui les compose (*ciment, additions*) et le *rapport E/L*.

La résistance à la traction : Les spécificités de composition des BAP permettent d'anticiper une légère différence de rapport entre la résistance à la traction et celle à la compression par rapport aux BO. En effet, les résultats obtenus confirment que pour les mêmes résistances à la compression les BAP possèdent des résistances à la traction légèrement supérieures à celles des BO.

2.7.2. Déformations

Le module d'élasticité : Comme les BAP renferment un faible volume de gravillons, il faut prévoir des modules d'élasticité plus faibles. De manière plus précise, pour expliquer ce fait, on peut imaginer le béton comme un composite à deux phases composées d'une matrice, la pâte de liant durcie, et en second lieu, d'inclusion des gravillons. Sachant que le module d'élasticité est principalement affecté par les gravillons, les BAP sont donc susceptibles d'être plus déformables que les BO. Néanmoins, plusieurs recherches concernant le module d'élasticité des BAP montre qu'il est souvent proche à celui de BO, lorsque les deux types de béton ont la même résistance.

Le retrait total : L'influence du volume de la pâte sur le retrait total du béton conduit à penser que ce type de déformation sera augmenté pour les BAP par rapport aux BO.

Le fluage : Le fluage des BAP paraît comparable à celui des BO de même résistance.

2.7.3. Adhérence (acier-béton)

Bien que l'absence de vibration et le changement de compositions du béton aient une influence non négligeable sur la liaison (acier-béton), plusieurs études montrent que l'adhérence des BAP aux armatures est similaire à celle des BO.

2.7.4. Durabilité

En général, la durabilité est relative aux paramètres de composition en termes de porosité, de nature du liant et des gravillons. Grâce à leurs additions minérales, les BAP présentent d'excellente étanchéité ainsi que des meilleures résistances à la pénétration d'agents agressifs.

2.8. Formulation des BAP

Plusieurs méthodes empiriques de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (méthode Japonaise (*basée sur l'optimisation du mortier*), méthode Française du LCPC (*basée sur l'optimisation du squelette granulaire*), méthode reposant sur la théorie de «l'excès de pâte» (*basée sur l'optimisation du volume de pâte*), etc...).

Dans ce cours on va présenter la méthode Japonaise (basée sur l'optimisation du mortier)

Les concepteurs des BAP, proposent de les formuler en ***composant en premier lieu le mortier du béton***. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver ***expérimentalement*** les dosages en eau et en superplastifiant, pour un liant donné (***rapport massique (addition/liant) fixé***), et suivant certains critères de ***rhéologie*** pour la vérification. La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité.

Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

Dosage des gravillons : les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est ***limité à la moitié de sa compacité***. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système (grains + vides). Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

A défaut d'indication, nous avons choisi de la mesurer en suivant ***la procédure du LCPC***. La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m³. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, nous choisissons de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

Dosage du sable : le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

Dosage du liant : la méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m³). Les rapports massiques (eau/liant) et (addition/liant) peuvent également être choisis sur des critères de ***résistance***.

Dosage de l'eau et du superplastifiant : les dosages en eau et en superplastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier (a) et des mesures d'écoulement à l'entonnoir (b).

Les auteurs définissent alors l'étalement relatif D_r par l'équation suivante :

$$D_r = \frac{d^2 - d_0^2}{d^2}$$

Où « d » est le diamètre de la galette et « d₀ » la base du cône.

Ils définissent également l'écoulement relatif « T » par l'équation :

$$T = \frac{10}{t_e}$$

Où « t_e » est le temps d'écoulement à l'entonnoir.

Les auteurs ont montré que la relation entre l'étalement et l'écoulement est linéaire lorsque le dosage en eau varie à quantité de superplastifiant constante. À l'aide de peu d'essais, il est alors possible de trouver un couple (adjuvant/eau) permettant de fluidifier de manière optimale

le mortier. Selon ces auteurs, le couple ($D_r = 10$; $T = 1$) est optimal dans le sens où il donne *un béton fluide avec un risque de ségrégation minimale*.



a : Cône à mortier.



b : Entonnoir à mortier.

Essais d'optimisation des dosages en eau et en superplastifiant sur mortiers

3. Les bétons à hautes performances (BHP)

Vers la fin des années 1980, plusieurs pays ont lancé des projets de recherche spécifiques sur le (BHP). Parmi ceux-ci on retrouve les Etats-Unis, Norvège, Canada, France, la Suisse, l'Australie, l'Allemagne, Japon, Corée, la Chine et Taiwan. De résistance en compression de l'ordre de 50 MPa, les BHP ont été utilisés pour la première fois en 1984 dans la construction d'un petit pont.

Cette nouvelle génération des bétons, *plus compacts, se caractérise par une durabilité améliorée et une (très) haute résistance* : à partir de 50 MPa à 28 jours (contre 30/35 MPa pour un béton traditionnel). Et par un rapport *Eau efficace/liant* équivalent inférieur à 0,4 qui implique l'utilisation de *superplastifiant* permettant de conserver une rhéologie compatible avec les contraintes de mise en place sur chantier, avec un taux dans le cas de BHP plus élevée que celui utilisé dans le béton traditionnel.

Une autre *distinction qui existe* entre les BHP et les bétons traditionnels se situe au niveau de leur composition qui fait intervenir de *nombreux constituants jouant tous un rôle bien spécifique*. En plus, les BHP sont des matériaux dont la formulation est optimisée de manière à atteindre des propriétés précises. *Il apparaît donc normal que la précision nécessaire à leur calcul soit en rapport avec la précision de leur fabrication.*

Le tableau montre que l'obtention de propriétés précises de ce béton repose sur des principes de formulations particulières. En plus des constituants de base présents dans les bétons traditionnels, on utilise des *fumées de silice, fillers siliceux, fillers calcaires, cendres volantes, pouzzolanes naturelles, pouzzolanes artificielles* ou encore des *laitiers de haut fourneau* qui viennent compléter la partie fine du squelette granulaire et améliorer les performances de la pâte.

Comparaison entre les formules traditionnelles et le BHP

Type de béton	Eau (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	Fumé de silice (kg/m ³)	Cendres volantes (kg/m ³)	laitiers (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)	Gravillon (kg/m ³)
Conventionnel	170	340	0	0	0	635	1270
BHP 80 MPa	150	315	36	0	137	745	1130
BHP 120 MPa	139	534	40	59	0	623	1069

Une des particularités de BHP, par rapport à celle du béton ordinaire, est le volume important de liant utilisé. Donc le choix du BHP comme matériau a un *impact sur les coûts* de construction initiaux, mais il a aussi des conséquences tout au long de la vie utile de l'ouvrage.

La plus vaste utilisation du béton à haute performance intégrant des ajouts cimentaires pourrait donc entraîner des *bénéfices tant environnementaux que financiers et construire des ouvrages plus durables.*

3.1. Les BHP présentent :

- Une **grande ouvrabilité** grâce à l'ajout des superplastifiants et une **résistance élevée au jeune âge** autorise **les décoffrages rapides, les délais avant mise en tension des câbles de précontrainte raccourcis et la réduction du délai d'exécution de l'ouvrage** ;
 - Absence de ségrégation grâce à l'excellente cohésion, ils peuvent également présenter des **formes plus complexes** ;
 - Une faible porosité grâce à une teneur en eau réduite et une granulométrie à 4 niveaux ;
 - Perméabilité 10 fois plus faible, ce qui assure une excellente protection des aciers (**très faible pénétration des chlorures**) ;
 - Réduire l'ouverture des fissures à contraintes égales dans les armatures et donc **d'augmenter la résistance à la fissuration et à la ruine des structures** ;
 - Résistances en compression élevées, **ce qui permet de réduire les sections des éléments de béton** (l'allègement des structures imposé par certaines exigences architecturales) ;
 - Le module d'élasticité des BHP est **supérieur** à celui des bétons traditionnels ;
 - Déformations sous charges diminuées (**fluage inférieur**), ce qui autorise la conception de **structures plus élancées** et permet d'assurer une **meilleure efficacité de la précontrainte** (les faibles déformations différées permettent de réduire **les pertes de précontrainte**) ;
 - Résistances en traction supérieures, **ce qui permet de limiter la précontrainte et d'amincir la section transversale en béton** ;
 - Performances en flexion qui se traduisent par une **augmentation de la rigidité en flexion** et qui permettent **un allongement des portées** et offrent des gains importants de poids propre, générant des économies de fondations ;
 - Une grande résistance à la pénétration d'agents agressifs et aux cycles gel/dégel ;
 - Un faible risque de corrosion des armatures ; une meilleure adhérence acier/béton ;
 - Une durabilité améliorée en réduisant corrélativement les frais de maintenance et d'entretien, **grâce à une compacité élevée due au faible rapport 'eau/liant' et à la présence du fumé de silice** ;
 - Le BHP se caractérise par une **meilleure adhérence entre les granulats et la matrice de ciment**. En outre, la résistance de la matrice sera pratiquement égale à la résistance des granulats. A l'approche de la rupture, **les fissures se seront désormais généralement propagées au travers des granulats** ;
 - **L'ensemble de ces propriétés permet de réduire le coût global d'un ouvrage.**
- **Par contre**, les BHP ont une **chaleur d'hydratation élevée** et un **retrait élevé** qui implique **l'importance de la cure soignée** ;
 - La **faible porosité** peut générer **des problèmes** sur ces bétons lorsqu'ils sont **soumis à des températures élevées** (la résistance au feu est cependant un élément sur lequel il convient d'attirer l'attention). **En raison de la structure très dense des pores, la pression de vapeur, qui apparaît à l'intérieur du béton à des températures excédant 100 °C, peut difficilement être réduite. La vapeur ne peut en effet pas être rapidement évacuée à l'extérieur. Réduire le risque d'écaillage des BHP par l'introduction de fibres de polypropylène (à des dosages de quelques kg/m³) ; les fibres en fondant, vers 170 °C, constituent un réseau connecté de canaux rendant le matériau beaucoup plus perméable, ce qui permet l'évacuation de la vapeur).**

3.2. Classifications des bétons

La classification actuelle des bétons est basée sur la résistance en compression à 28 jours :

Résistance R_{c28j} (MPa)	$20 \leq R_{c28j} < 50$	$50 \leq R_{c28j} < 80$	$80 \leq R_{c28j} \leq 120$
Classe du béton	BO	BHP	BTHP

3.3. Spécifications sur les constituants

Le béton à haute performance est composé des mêmes matériaux que le béton ordinaire. Leur technologie est plutôt un développement logique de béton *contenant à la fois de la fumée silice et du superplastifiant*. Le BHP, qui sont avant tout une modification des bétons ordinaires, sont influencés de la même façon par les différents matériaux cimentaires. Il se compose *de granulats, d'eau, de ciment, de superplastifiant, un retardateur de prise y est parfois ajouté pour augmenter le temps de mise en œuvre et éventuellement d'une addition*. Il ne contient pas de constituants vraiment spécieux ou inhabituels.

En particulier, pour la réalisation de bétons à hautes performances, il est habituel d'ajouter au ciment une *poudre siliceuse ultrafine* qui, d'une part, permet d'améliorer le squelette granulométrique du mélange en *comblant les vides entre les grains du ciment*, et d'autre part, intervient chimiquement, par effet "*pouzzolanique*" dans la réaction d'hydratation du ciment. Généralement, cette poudre siliceuse est constituée de *fumée de silice*, c'est-à-dire un produit obtenu industriellement et présentant une granulométrie moyenne de 0,1 μm . En outre, sa *grande finesse* lui donne une très bonne *capacité de remplissage*, et conjuguée à sa structure amorphe, la *forte pouzzolanité* qui en découle permet une augmentation des résistances du béton et une amélioration de sa durabilité.

La proportion de fumée de silice utilisée dans les BHP est relativement importante. Des études montrent que *l'optimum de fumée silice a été trouvé entre 8 et 15 % en poids de ciment* et pour des quantités supérieures, 40 % par exemple, *le béton devient fragile*, et des particules de fumée silice *restent non hydratées*.

3.4. Les domaines d'application des BHP

A l'heure actuelle, quatre pays développent particulièrement l'utilisation des BHP, la Norvège orientée essentiellement vers *les structures marines (Offshore)*, les Etats-Unis et le Canada intéressés par *la construction des gratte-ciels* et la France oriente ses efforts vers *les ouvrages d'art (les ponts, les bâtiments de grande hauteur)*.

A ces trois domaines principaux, il faut ajouter quelques applications plus particulières, comme *les éléments préfabriqués pour les bâtiments (les poutres et les poutrelles), les chaussées, les assainissements, les tunnels, les centrales nucléaires, les plates-formes pétrolières, les ouvrages exposés au gel* et de très nombreux *produits précontraints*.

3.5. Formulation des bétons à hautes performances

L'objectif de toutes les méthodes de formulation des bétons est de **déterminer la combinaison de matériaux à utiliser** pour produire le béton qui aura les propriétés désirées et qui sera le plus économique possible.

En règle générale, une méthode de formulation permet aussi de calculer un mélange de départ que l'on pourra plus ou moins modifier pour obtenir les propriétés désirées à partir de **quelques gâchées d'essai**.

Par ailleurs, le problème de la formulation des bétons s'est singulièrement compliqué dans les années récentes du fait de nouveaux constituants tels que **les adjuvants et les additions minérales**.

La résistance du béton est liée à sa porosité et à la distribution des pores capillaires. La recherche des hautes performances passe donc par **la réduction de la porosité** du béton.

L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste donc à :

- Diminuer la porosité ;
- Optimiser le squelette granulaire.

Pour diminuer la porosité, il faut :

- Réduire le rapport (E/L) de l'ordre de 0.3 à 0.35 ;
- Fluidifier le mélange à l'aide de superplastifiant (l'emploi de superplastifiant permet une réduction de la teneur en eau du mélange à consistance égale).

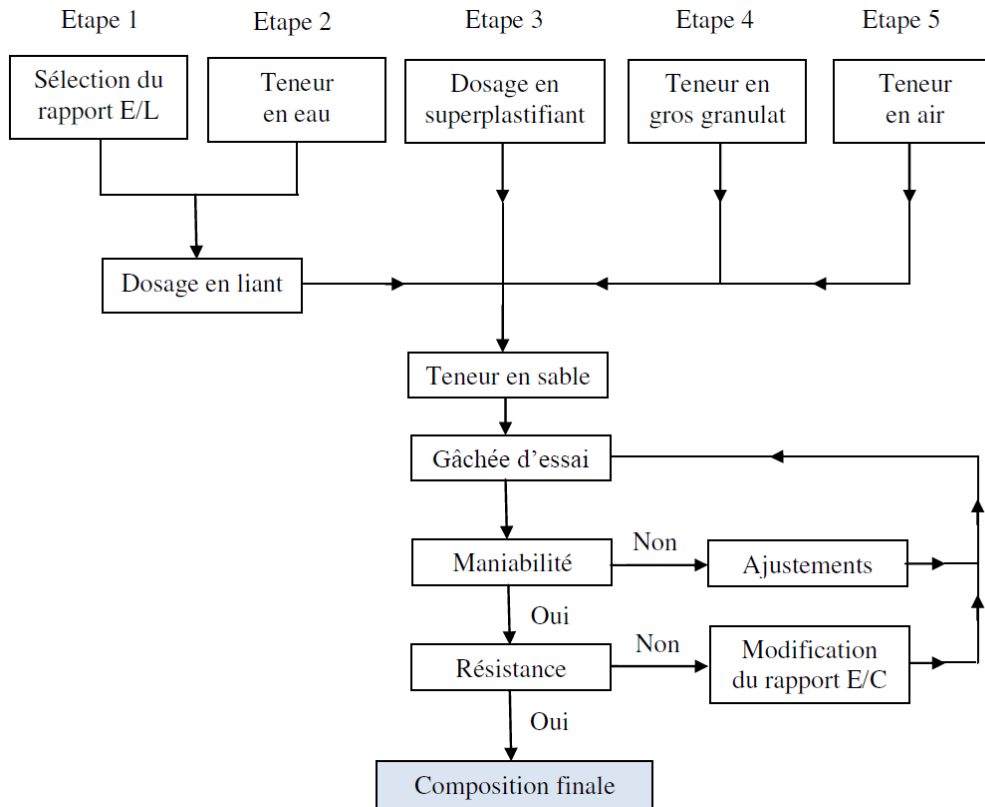
Pour optimiser le squelette granulaire, il faut :

- L'ajout de particules ultrafines, le plus souvent à caractère pouzzolanique ;
- Chaque classe granulaire (4 niveaux de taille de grain) est adaptée afin d'obtenir un mélange à très haute compacité (les éléments fins remplissant les espaces entre les plus gros granulats) ;
- Déterminer la distribution de taille des grains, la forme et la résistance des grains les mieux adaptés.

3.5.1. Méthode de formulation de l'Université de Sherbrooke

Cette méthode très simple suit la même approche que la norme [ACI 211-I]. Il s'agit d'une combinaison de résultats empiriques et de calculs basée sur la méthode des volumes absolus. L'organigramme de cette méthode est présenté par la figure ci-dessous.

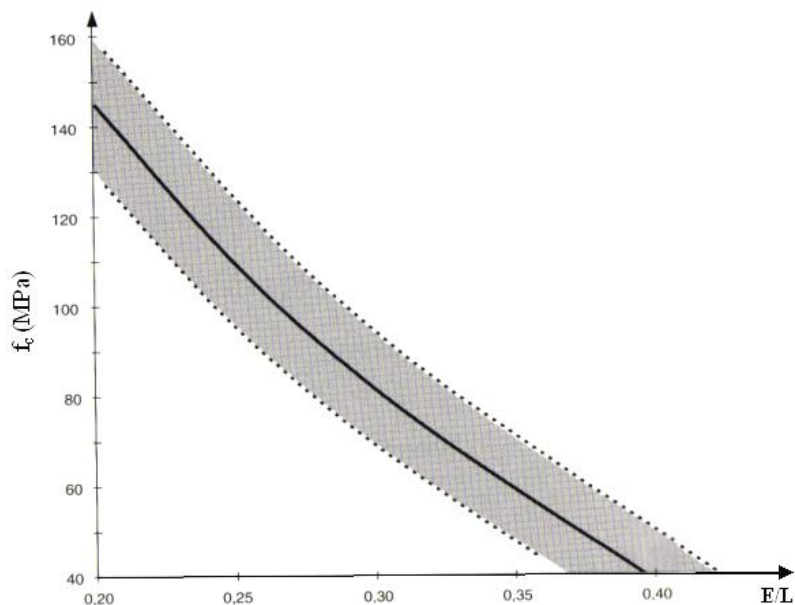
La méthode de formulation développée à l'Université de Sherbrooke permet de formuler un BHP avec une procédure basée sur le choix de cinq caractéristiques particulières du BHP ou des matériaux utilisés :



Organigramme de la méthode de formulation de l'Université de Sherbrooke proposée pour formuler des BHP

✓ Le rapport (E/L)

La résistance des bétons croît en raison inverse du rapport (E/L). On peut trouver le rapport (Eau/Liant) en utilisant la figure ci-dessous pour une résistance à la compression à 28 jours donnée (*la résistance à la compression est mesurées sur des cylindres de 100×200 mm*). Le fuseau de la figure ci-dessous donne une gamme relativement étendue de rapport (E/L) pour une résistance donnée. On peut commencer par prendre la valeur moyenne donnée par ce fuseau si l'on ne connaît pas l'efficacité du liant que l'on utilise.

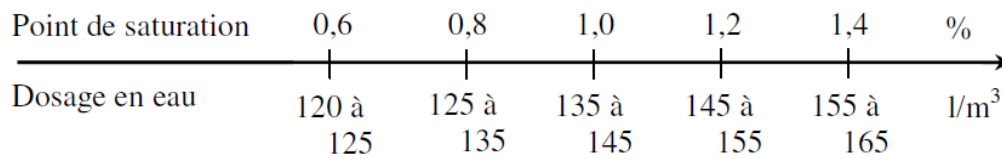


Relation proposée entre le rapport (E/L) et la résistance à la compression

✓ Dosage en eau

La figure ci-dessous présente une approche simplifiée, basée sur le concept de point de saturation. La dose de saturation correspond à la quantité de superplastifiant, incorporée au mélange, qui au-delà de laquelle il n'y aura plus l'effet fluidifiant supplémentaire. La détermination de cette dose se fait habituellement par la méthode des coulis au moyen du cône de Marsh.

Pour calculer une formulation robuste, on peut ajouter 5 l/m^3 à toutes les valeurs présentées à la figure ci-dessous. Lorsque le point de saturation du superplastifiant n'est pas connu, on recommande de commencer avec une quantité d'eau de malaxage égale à 145 l/m^3 .



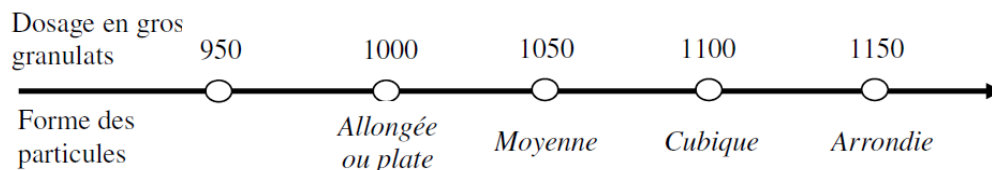
Détermination du dosage en eau

✓ Dosage en superplastifiant

Pour un rapport (E/L) 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. La solution consiste à défloculer le ciment par l'utilisation de superplastifiant. Le dosage en superplastifiant se déduit du dosage au point de saturation. Si l'on ne connaît pas le point de saturation, on peut toujours commencer avec un dosage en superplastifiant égal à 1 %.

✓ Dosage en gros granulats

Le dosage en gros granulats peut être déduit de la figure ci-dessous en fonction de la forme des granulats. S'il ya quelques doutes sur la forme des granulats ou si on ne la connaît pas, on peut toujours commencer avec une quantité de gros granulats de 1000 kg/m^3 .



Dosage en gros granulats

✓ Teneur en air

La seule quantité d'air que l'on retrouvera dans les BHP est le volume d'air piégé. Cependant, de façon à améliorer la manipulation et la mise en place des BHP, certains auteurs suggèrent de rajouter systématiquement une très faible quantité d'air entraîné dans le BHP.

Par conséquent, certains auteurs recommandent d'utiliser une valeur de 1,5 % comme valeurs initiale de la quantité d'air piégé et d'ajuster les résultats par la suite en fonction de ce qui est obtenu lors des gâchées d'essai.

3.5.2. Feuille de calcul

Tous les calculs nécessaires à la formulation d'un BHP sont présents sur une seule feuille de calcul.

f'_c MPa														
		%												
	G_c													
Ciment														
Addition (1)														
Addition (2)														
Granulat	G_{SSS}	E_{abs}	E_{tot}	E_h										
Gros														
Fin														
$E_h = E_{tot} - E_{abs}$		$M = M_{SSS}(1 + E_h)$												
Superplastifiant		$M_{sol} = L \times \frac{D}{100}$	$V_{liq} = \frac{M_{sol}}{S \times G_{sup}} \times 100$	$V_E = V_{liq} \times G_{sup} \times \frac{100 - S}{100}$	$V_{sol} = V_{liq} - V_E = V_{liq} (1 - (\frac{100-S}{100}) G_{sup})$									
Densité (G_{sup})	Teneur en solides S(%)	15 E	24 F	21 G	11 H									
matériaux	1		2		3		4		5		6			
	Teneur Kg/m ³		Volume l/m ³		Dosage État SSS Kg/m ³		Correction d'humidit l/m ³		Composition 1 m ³		gâchée d'essai			
Eau	2		2		2				23		25			
Ciment	3		4-1		8-1				4-1		4-1		26-1	
			4-2		8-2				4-2		4-2		26-2	
			4-3		8-3				4-3		4-3		26-3	
Gros granulat	5		9		5				18		17		27	
Granulat fin			13		14		20		19		28			
Air	pourcentage		10		0									
	6 %													
Super-plastifiant	7 %		11		15		21		24 V_{liq}		29 V_{liq}			
Total			12		16		22				30			

Feuille de composition d'un BHP

La feuille de calcul utilise les symboles suivants :

G_c : densité du ciment ou des ajouts cimentaires ;

G_{ss} : densité des granulats à l'état saturé superficiellement sec ;

E_{abs} : quantité d'eau absorbée dans les granulats (%);

E_{tot} : Teneur en eau totale des granulats (%);

E_h : humidité des granulats (%);

G_{sup} : densité du superplastifiant liquide ;

s : Teneur en solide du superplastifiant (%);

M_{sol} : Masse du solide dans le superplastifiant ;

D : Dosage du superplastifiant exprimée sous forme de pourcentage de la masse de solide par rapport à la masse de matériaux cimentaires ;

V_{liq} : Volume de superplastifiant liquide ;

V_E : Volume d'eau dans le superplastifiant ;

V_{sol} : Volume de solide dans le superplastifiant ;

E : Masse d'eau en kg/m^3 dans le béton ;

L : Masse de liant par m^3 de béton ;

Avant de présenter la pratique de la méthode, les paragraphes ci-dessous expliquent les calculs détaillés qu'il faut effectuer pour remplir chacune des cases de la feuille de calcul.

Case 1 : rapporter la valeur du rapport eau/liant tel que choisi à la figure ($R_c = f(E/L)$).

Case 2 : écrire la quantité d'eau nécessaire, selon la figure (*Détermination du dosage en eau*), et recopier cette valeur dans les colonnes 1, 2 et 3 où l'on retrouve la case 2.

Case 3 : à partir des valeurs qui apparaissent dans les cases 1 et 2, calculer la masse de liant.

Case 4-1, 4-2 et 4-3 : calculer la masse de chaque ajout cimentaire nécessaire et reporter ces valeurs dans les colonnes 1, 3 et 5 où l'on retrouve ces cases.

Case 5 : reporter la masse de gros granulat trouvé à la figure (*Dosage en gros granulats*) et écrire cette valeur dans la case 5 des colonnes 1 et 3.

Case 6 : écrire la quantité d'air piégé en (%) que l'on prévoit obtenir dans le BHP.

Case 7 : écrire la quantité de superplastifiant en (%) qu'il sera nécessaire d'utiliser en se basant sur la valeur du point de saturation.

A cette étape, la seule information manquante est **la masse de granulat fin** qu'il faut utiliser. Cette valeur peut **se calculer par la méthode des volumes absolus**, c'est-à-dire que l'on soustrait de 1 m^3 le volume de tous les ingrédients déjà sélectionnés de façon à trouver le volume restant pour le granulat fin, ce qui se fait dans **la colonne 2**.

Case 8-1, 8-2 et 8-3 : calculer les volumes des différents ajouts cimentaires en divisant leur masse (case 4-1, 4-2 et 4-3) par leur densité respective.

Case 9 : calculer le volume de gros granulat en divisant la masse du gros granulat apparaissant dans la case 5 par sa densité SSS.

Case 10 : multiplier le % d'air (case 6) par 10 pour obtenir le volume d'air piégé en l/m^3 .

Case 11 : calculer le volume V_{sol} (volume des solides contenus dans le superplastifiant en utilisant la formule.

Case 12 : inscrire la somme de tous les volumes déjà calculés.

Case 13 : calculer le volume de granulat fin (en l/m^3) en soustrayant de $1000 l/m^3$ la somme déjà calculée à la case 12. On peut alors calculer dans la colonne 3 la masse de granulat fin et la masse volumique du béton.

Case 14 : calculer la masse de granulat fin en multipliant son volume apparaissant dans la case 13 par sa densité SSS.

Case 15 : calculer la masse de solide dans le superplastifiant (M_{sol}) et reporter sa valeur dans cette case.

Case 16 : calculer le total de toutes les masses qui apparaissent dans la colonne 3 pour obtenir la masse volumique du béton.

Il faut noter que, jusqu'à présent, les masses de granulats ont toujours été calculées dans des conditions SSS. ***Il faut donc corriger le dosage en eau de gâchage*** pour tenir complètement celle de l'état SSS et pour tenir compte de la quantité d'eau contenu dans le superplastifiant.

Ces corrections sont faites dans **les colonnes 4 et 5, dans les cases 18, 20 et 21** selon la convention arbitraire de signes suivante : si un granulat apporte de l'eau au béton (c'est-à-dire si sa teneur en eau total est supérieure à son absorption à l'état SSS), cette quantité d'eau devra être soustraite de la quantité d'eau de gâchage et l'on utilisera **un signe moins** dans la case correspondante, tandis que l'on utilisera **un signe plus** lorsque le granulat absorbera une partie de l'eau contenue dans le béton.

Case 17 : multiplier la masse SSS du gros granulat par $(1 + (E_h/100))$.

Case 18 : soustraire la valeur trouvée à la case 17 de la valeur de la case 5 et écrire ce résultat à la case 18.

Case 19 : multiplier la masse SSS du granulat fin par $(1 + (E_h/100))$.

Case 20 : soustraire la valeur apparaissant dans la case 19 de celle apparaissant dans la case 14 et écrire ce résultat à la case 20.

Case 21 : écrire la quantité d'eau contenue dans le superplastifiant tel que calculée à la case G (le signe négatif apparaît déjà dans cette case).

Case 22 : ajouter algébriquement toutes les corrections d'eau.

La composition finale de $1 m^3$ de béton avec des granulats humides est maintenant calculée dans la colonne 5.

Case 23 : ajouter (*en tenant compte du signe*) la correction en eau que l'on retrouve dans la case 22 du volume d'eau à la valeur qui apparaît dans la case 2.

Case 24 : écrire le dosage en superplastifiant V_{liq} que l'on trouve dans la case F.

La gâchée d'essai peut être calculée dans la colonne 6. Chaque valeur apparaissant dans la colonne 5 doit être *multipliée par un facteur F* égale à la masse de béton que l'on désire fabriquer dans la gâchée d'essai exprimée en kg, divisée par la masse volumique du béton qui apparaît dans la case 16.

Case 25 à 29 : multiplier les valeurs de la colonne 5 par le facteur F .

Case 30 : calculer la masse de la gâchée d'essai en additionnant les masses des différents ingrédients du béton que l'on retrouve dans les case 25 à 29. Vérifier les calculs en multipliant les résultats de la case 16 par F : le résultat devrait être le même que celui qui est inscrit dans la case 30.

4. Les bétons fibrés (BF)

Un *béton fibré* est un béton dans lequel sont incorporées des fibres. À la différence des armatures traditionnelles, *les fibres sont réparties dans la masse du béton*, elles permettent de constituer un matériau qui présente *un comportement plus homogène*. Les fibres, selon leur nature ont un comportement contrainte-déformation très différent. Elles peuvent, sous certaines conditions et pour certaines applications ou procédés, *remplacer les armatures traditionnelles passives*. Les fibres présentent des caractéristiques géométriques et mécaniques intéressantes selon leur nature. Chacune a une influence particulière sur les lois de comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des applications adaptées et spécifiques.

L'emploi de superplastifiant est recommandé pour compenser la diminution d'ouvrabilité provoquée par l'incorporation de fibres.

4.1. Les différents types de fibres

On distingue trois grandes familles de fibres.

- Les fibres métalliques :
 - acier ;
 - inox ;
 - fonte (amorphe).

- Les fibres organiques :
 - polypropylène ;
 - polyamide ;
 - acrylique.
 - mélange polypropylène/polyéthylène ;
 - kevlar ;
 - aramide ;
 - carbone.

- Les fibres minérales :
 - verre ;
 - wollastonite ;
 - basalte ;
 - mica.

Chaque fibre présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : dimensions (diamètre, longueur, etc.), formes (lisses, crantées, ondulées, biondulées, à crochet, munies de cônes aux extrémités, etc.), résistance à la traction. Les dosages courants en fibres sont de l'ordre de 0,5 à 2 % en volume soit de **5 à 150 kg par m³ de béton**.

4.2. Les caractéristiques et les propriétés des fibres

Chaque famille de fibres présente des caractéristiques et des propriétés spécifiques. Le tableau suivant résume les caractéristiques et les propriétés spécifiques de ces familles.

Caractéristiques et propriétés spécifiques de chaque famille de fibres

	Masse volumique (en g/cm³)	Diamètre moyen (en µm)	Résistance à la traction (en N/mm²)	Module d'élasticité (en GPa)
Fibres métalliques	7,85	50 - 1 000	1 000 - 2 500	150 - 200
Fibres de verre	2,6	9 - 15	2 000 - 3 000	80
Fibres polypropylène	0,9	> 4	500 - 750	5 - 10

4.3. Les exigences des fibres lors de la mise en œuvre du béton

Pour faciliter leur utilisation, les fibres doivent:

- être faciles à incorporer dans le béton et ne pas perturber le malaxage ;
- ne pas avoir d'agglomération de fibres lors du malaxage ou du bétonnage (se répartir de manière homogène au sein du béton) ;
- il faut bien talocher la surface et bien enrobées (il faut une main d'œuvre qualifiée) ;
- être anticorrosion, inoxydables et d'un prix compétitif et acceptable ;
- non attaqué par le milieu basique de béton ;
- non dangereux pour la main d'œuvre ;
- ne pas se casser lors de malaxage.

4.4. Les caractéristiques des fibres qui influent sur la maniabilité du béton

L'influence des fibres sur la maniabilité du béton dépend:

- De leur dimension ;
- De leur dosage.

4.5. Les caractéristiques du béton durci apportées par les fibres

Les caractéristiques du béton durci apportées par les fibres, sont:

- La ductilité ;
- La résistance à la flexion et à la traction ;
- La résistance aux chocs, etc...

4.6. Les exigences des fibres pour le béton durci

Pour améliorer les performances mécaniques des bétons (ductilité, résistance en flexion, résistance aux chocs, etc.), elles doivent:

- être déformables sans être fragiles ;
- être relativement longues et fines et présenter une grande surface spécifique ;
- offrir une bonne capacité de déformation ;
- posséder un module d'élasticité plus élevé que celui de la matrice cimentaire ;
- présenter une bonne adhérence avec la pâte de ciment ;

4.7. Le rôle des fibres

Les fibres ont généralement pour rôle de **renforcer ou remplacer l'action des armatures traditionnelles** en s'opposant à **la propagation des microfissures**. Elles peuvent également

dans certaines applications remplacer les armatures passives. Selon les fibres utilisées (forme et nature) et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations relatives à:

- la cohésion du béton frais ;
- la déformabilité avant rupture ;
- la résistance à la traction par flexion ;
- la ductilité et la résistance post fissuration ;
- la résistance aux chocs ;
- la résistance à la fatigue ;
- la résistance à l'usure ;
- la résistance mécanique du béton aux jeunes âges ;
- la réduction des conséquences du retrait par effet de couture des microfissures ;
- la tenue au feu ;
- la résistance à l'abrasion.

4.8. Quelques fibres les plus utilisés

4.8.1. Les fibres polypropylène

Ces fibres obtenues par extrusion du polypropylène, se présentent en faisceaux ou sous forme de filament individuel. Les fibres polypropylène permettent en particulier de mieux contrôler le retrait plastique du béton frais mais n'améliorent pas son comportement à la fissuration (contrairement aux fibres métalliques).



Fibres polypropylène

Rôle des fibrés polypropylène

Améliorent la maniabilité et la cohésion du béton (en particulier dans le cas de béton projeté).

- Elles sont particulièrement souples et insensibles chimiquement.
- Mais peu résistantes au feu (température de fusion comprise entre 140 à 170 °C).

Domaine d'application des fibrés polypropylène

- Dallages et aménagements urbains ;
- Produits préfabriqués ;
- Mortiers projetés ;
- Revêtement d'ouvrages souterrains ;
- Parements esthétiques.

4.8.2. Les fibres métalliques

Les fibres métalliques, *notamment d'acier*, ont fait l'objet de nombreuses recherches pour développer leurs emplois dans le béton. Elles présentent une très bonne compatibilité avec le béton.



Fibres métalliques

Différents types des fibrés métalliques existants

- Fibres ondulées - crantées - torsadées - droites ;
- Fils, rubans ;
- Fibres à extrémités aplaties, à crochets, à têtes coniques, etc...

Rôle des fibrés métalliques

- Une bonne résistance à la traction ;
- Une bonne résistance à la flexion.

Domaine d'application des fibrés métalliques

- Dans les dallages et les sols industriels ;
- Pour la fabrication des tunnels, de coques ;
- Pour réaliser des bétons projetés ;
- Pour la réalisation de produits préfabriqués ;
- Pour la confection de mortier de réparation ;
- Pieux de fondation, semelles filantes.

4.8.3. Les fibres de verre

Les fibres de verre sont, *grâce à leurs qualités mécaniques et leur rigidité*, des renforts très efficaces, mais elles sont *sensibles* aux alcalis libérés par l'hydratation du ciment (protection ou imprégnation nécessaire). Mais certaines fibres de verre présentent des propriétés « *alcali-résistantes* ».



Fibres de verre

Utilisation des fibres de verre et les techniques de mise en œuvre

Les bétons fibrés peuvent être mis en œuvre sous différentes formes :

- Béton coulé en place : (à la pompe ; à l'aide d'une benne munie d'un manchon) ;
- Béton préfabriqué ;
- Béton projeté.

L'incorporation des fibres dans le béton doit être particulièrement soignée, elle peut se faire :

- au malaxage (en centrale à béton) ;
- au moment du coulage (dans la toupie sur le chantier) ;
- lors de la projection (béton projeté).

Domaine d'application des fibrés de verre :

En préfabrication, les domaines d'application sont très vastes. Les fibres de verre permettent la réalisation d'éléments de faible épaisseur :

- Panneaux de façade minces à faible épaisseur ;
- Panneaux sandwich pour l'isolation ;
- Éléments décoratifs ;
- Produits d'assainissements (tuyaux ; caniveaux).

4.9. Les domaines d'application des bétons fibrés

Les bétons fibrés peuvent être utilisés pour une grande variété d'applications en bâtiment et en génie civil :

- béton coulé en place (dalles, planchers, fondations, voiles, pieux, etc.) ;
- béton préfabriqué (poutres, voussoirs de tunnels, tuyaux d'assainissement, etc.) ;
- béton projeté (construction et réparation de tunnels, stabilisation de pente, confortement de parois, etc...) ;
- mortiers (prêts à l'emploi) de réparation et de scellement.

Le choix du type de fibres est fonction du domaine d'application et des performances souhaitées.

5. Béton de Poudres Réactives (BPR)

Béton de Poudres Réactives (BPR) est en réalité un micro béton en raison de leur composition et du diamètre du gros granulat.

En France, au début des années 1990, la *direction scientifique de la Société Bouygues* s'est engagée dans une recherche visant à définir le dernier type de matériau à ultra haute résistance à base de ciment Portland, développé par *P.Richard & M.Cheyrezy*, mais ce n'est sûrement pas le dernier. Ce matériau est appelé « Béton de Poudres Réactives (BPR) ».

En 1994, un partenariat a été constitué entre *Bouygues, Lafarge & Rhodia* pour exploiter et approfondir toutes les voies d'amélioration de cette classe de matériaux appelés aujourd'hui : « bétons à ultra-hautes performances (BUHP) » ou « bétons fibres à ultra-hautes performances (BFUHP) », quelques fois appelés également « Mortier de poudres réactives (MPR) ».

Dans ce cours on va présenter les bétons fibres à ultra-hautes performances (BFUHP)

Les bétons fibres à ultra-hautes performances (BFUHP) sont des matériaux à matrice cimentaire, renforcés par des fibres. Leurs formulations font appel à des *forts dosages en ciment* et en adjuvants *superplastifiants*, des *ultrafines* et des *compositions granulaires spécifiques*, ainsi qu'à des *fibres* (fibres métalliques, polymères ou minérales).

5.1. Les BFUHP offrent des propriétés et des performances exceptionnelles :

- une très grande ouvrabilité ;
- de hautes résistances à court terme ;
- des résistances à la compression à 28 jours très élevées comprises entre 130 et 250 MPa ;
- une résistance en traction comprise entre 5 et 12 MPa ;
- une résistance en flexion comprise entre 30 et 50 MPa ;
- une ductilité importante (déformabilité sous charge sans rupture fragile). *Par contre, le comportement fragile des (BHP, BTHP) vis à vis de la ductilité malgré leurs performances. Amélioration de la ductilité par l'emploi des fibres métalliques.*
- un retrait et un fluage très faible ;
- une compacité très importante et une faible perméabilité ;
- une durabilité exceptionnelle (ce qui permet de les utiliser dans des environnements très agressifs) ;
- une grande résistance à l'abrasion et aux chocs ;
- une ténacité élevée (*résistance à la micro-fissuration*);
- une dureté de surface très importante ;
- des aspects de parements particulièrement esthétiques et une texture de parement très fine ;
- une optimisation des frais de maintenance et d'entretien des ouvrages ;
- de nouvelles perspectives constructives.

5.2. L'évolution des BFUHP par rapport aux Bétons à Hautes Performances (BHP) se caractérise par :

- leurs très grandes résistances en compression, mais aussi en traction ;

- leur fort dosage en ciment (700 à 1000 kg/m³) et en adjuvants ;
- leur squelette granulaire spécifique (4 à 5 échelles de grains) et l'optimisation de leur empilement granulaire ;
- l'utilisation de granulats de faibles dimensions (*amélioration de l'homogénéité macroscopique du béton par la réduction du diamètre du plus gros granulats*) ;
- une teneur en eau beaucoup plus faible ;
- la présence de fibres à un taux élevé (de l'ordre de 2 à 3 % en volume) ;
- Ils se caractérisent par une microstructure extrêmement fermée gage de performances mécaniques et de durabilité.

Les résistances élevées du matériau et l'absence d'armatures passives facilitent la réalisation de *structures légères et élancées et l'élaboration de formes complexes* (coques, structures en treillis, voiles minces,...). Il permet de *réduire les volumes de béton* à mettre en œuvre, d'affiner les structures et donc de *réduire le poids des ouvrages et leur impact sur les fondations*.

5.3. Principe de formulation des BFUHP

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

- 1) *Une teneur en eau extrêmement faible* (rapport E/L < 0,25 voire 0,20) grâce à l'utilisation optimisée de superplastifiants qui déflocculent les particules fines.
- 2) *Une compacité maximale*, obtenue en utilisant des composants correspondant à plusieurs classes granulaires (classiquement quatre, qui incluent *ciment, ultrafines, fillers* et *sable fin*). La taille et la quantité des plus gros grains sont considérablement réduites (*diamètre maximal variant de 1 à 7 mm*). *L'optimisation de l'empilement granulaire permet de diminuer le volume des vides*. Les BFUHP présentent donc une très faible porosité capillaire.

Les ultrafines utilisées dans les BFUHP sont en général des *fumées de silice* qui *remplissent les espaces intergranulaires* optimisant la compacité du matériau, et qui *réagissent grâce à leur pouvoir pouzzolanique avec la chaux issue de l'hydratation du ciment*. Elles participent activement à la résistance de l'ensemble et ferment le réseau des pores à la diffusion des ions et des gaz. D'autres ultrafines peuvent être également utilisées telles que les *microfillers calcaires ou siliceux et les pouzzolanes naturelles ou artificielles (métakaolins)*.

L'emploi d'adjuvants tels que les *plastifiants réducteurs d'eau* et les *superplastifiants* permet de formuler les BFUHP avec un *très faible rapport Eau/Liant* équivalent.

Les *fibres*, composant clé des BFUHP *confèrent au matériau sa ductilité*. Ces fibres ont une longueur adaptée à la taille du plus gros grain et une section la plus faible possible pour garantir *un bon ancrage*. Elles ont en général un diamètre de 0,1 à 0,3 mm et une longueur de 10 à 20 mm. Les *fibres métalliques* sont utilisées pour des applications structurelles nécessitant des *résistances mécaniques importantes*, les *fibres polymères et minérales* plutôt *pour des applications esthétiques*.

Exemples de formulations de BFUHP (pour 1 m³)

<i>Ciment</i>	<i>Sable fin</i>	<i>Quartz broyé</i>	<i>Fumée de silice</i>	<i>Fibres métalliques</i>	<i>Adjuvant (extrait sec)</i>	<i>Eau totale</i>
710 kg	1 020 kg	215 kg	230 kg	160 kg	10 kg	140 l
1 075 kg	1 030 kg	—	160 kg	220 kg	35 kg	200 l



Vue du béton classique



Vue du BFUHP

5.4. Traitement thermique

Les BFUHP peuvent faire l'objet de traitements thermiques juste après la fin de leur prise, ce qui permet:

- d'obtenir des résistances mécaniques élevées très rapidement (*accélérer l'hydratation*) ;
- d'obtenir des performances en traction et en compression plus élevées ;
- d'améliorer la microstructure ;
- d'améliorer la durabilité grâce à une réduction de la porosité ;
- de diminuer les effets différés du retrait et du fluage ;
- d'éviter tout risque de fissuration par retrait.

Après traitement thermique, le retrait est quasi inexistant et le fluage très fortement réduit.

5.5. Domaines d'applications potentiels des BFUHP

Les nombreuses qualités des BFUHP, permettent d'envisager une multitude d'applications aussi bien en structure de génie civil (*poutres précontraintes, canalisations, couvertures de grande portée, silos, réservoirs, tours de refroidissement, murs de soutènement, dalles, structures triangulées, voussoirs de tunnels, etc...*) qu'en bâtiment (*poutres, poteaux élancés, planchers de grande portée, etc...*) et leur utilisation dans des applications innovantes jusque-là inaccessibles au matériau béton et réservées à d'autres matériaux.

En règle générale les BFUHP à base de *fibres métalliques* sont destinées à des applications structurelles, ceux à base de *fibres organiques* à des applications architectoniques (éléments architecturaux, panneaux de façade, corniches, etc...).

Les BFUHP sont utilisés aussi bien par l'industrie du béton pour constituer des *produits préfabriqués*. Ils sont en général *autoplaçants et parfaitement pompables*.

Les BFUHP compte tenu de leurs multiples performances s'adaptent aux diverses contraintes et exigences des ouvrages. Ils ouvrent de grandes perspectives d'applications pour les ouvrages nécessitant résistances importantes, durabilité et esthétisme. Ils répondent aux évolutions majeures de la construction en permettant d'optimiser les

dimensionnements (augmentation des portées, réduction des quantités de matériaux utilisés), de réduire la durée des chantiers et les coûts globaux des ouvrages, d'améliorer l'esthétique des parements et d'offrir une liberté architecturale. Ne nécessitant en général ni vibration, ni armatures passives, les BFUHP permettent une diminution de la difficulté sur les chantiers. Ils satisfont les exigences et tendances actuelles du secteur de la construction: réduire les temps de travail, l'impact sur l'environnement tout en augmentant la sécurité sur les chantiers. Leurs performances exceptionnelles offrent la possibilité de nouveaux domaines d'applications et de nouvelles structures de bâtiment ou de génie civil.



Passerelle de Seoul (Dalle : 3 cm d'épaisseur)

6. Béton à base de polymères (BP)

Le béton polymère apparaît aujourd'hui comme une alternative très efficace au béton traditionnel. **Plus performant, plus maniable et plus léger**, il est de plus en plus utilisé dans le domaine de la construction et du bâtiment.

6.1. La composition du béton polymère

Le béton polymère est un matériau composé de différents types d'agrégats (d'une granulométrie maximale de 16 mm). Ces derniers sont liés par des résines de polyester pour assurer la solidité de chaque réalisation. Cette combinaison se complète, pour les bétons préfabriqués, un mélange de granulats de quartz et de la résine de polyester stable.

Preuve de sa performance, le béton polymère a déjà obtenu de très nombreuses certifications de qualité auprès d'organismes du bâtiment comptant parmi les plus réputés.

6.2. Les nombreuses qualités du béton polymère

Le béton polymère est une excellente alternative au béton traditionnel. En effet, il possède une résistance mécanique à la compression de très haut niveau. **Celle-ci est jusqu'à quatre fois supérieure à celle du béton ordinaire.**

Le Béton Polymère possède une plus grande résistance à la flexion et à la compression par rapport à un béton classique ce qui permet d'obtenir une épaisseur et un poids moindre par rapport à des ouvrages en béton armé augmentant ainsi le temps de pose.

En outre, **le béton polymère est particulièrement léger**. Il possède un pourcentage d'absorption de l'eau quasi nul, ce qui lui confère **une totale étanchéité**. Également **très résistant aux changements de température**, il supporte très bien les passages du **gel au dégel**, ainsi que **l'usure par abrasion**. Ce matériau de qualité **résiste aussi à la dispersion de produits chimiques** et aux différents **chocs**.

De faible dimension, le béton polymère facilite enfin l'organisation des chantiers et en améliore le rendement en raison de sa simplicité d'installation et de manipulation.

6.3. Caractéristiques mécaniques et physiques

- Valeur de compression : 80 - 90 Mpa.
- Valeur de flexion par traction : 20 - 24 Mpa.
- Module d'Young : 21300 Mpa.
- Abrasion : 1,15.
- Absorption d'eau : 0,2 %.
- Coefficient d'écoulement : 108 moyens.
- Résistance au gel : Inaltéré.
- Dureté Vickers superficiel : > 320 N/mm².
- Etat de surface (essais CNR) : K > 110.
- Densité : 2,1.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Cours en ligne: Matériaux de construction Chapitre 1: Introduction. http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre_un.html.
2. Okamura H., Ouchi M. Self-compacting concrete. *J Adv Concr Technol* 2003;1:1-15.
3. Uysal M, Yilmaz K. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. *Cem Concr Compos* 2011;33(7):771-6.
4. Okamura H. et al. Self-compacting high performance concrete. *Proceeding of the Fifth EA SEC*, vol.3, pp.2381-2388, 1995.
5. Yurugi, M., Sakata, N., Iwai, M. and Sakai, G. Mix proportion for highly workable concrete. *Proceedings of the International Conference of Concrete*, Dundee, UK, 1993.
6. Khayat K.H. Viscosity-Enhancing Admixtures for cement-based materials - An overview. *Cement and Concrete Composites*, 20, pp. 171-188, 1998.
7. Sedran, T. and De Larrard, F. Mix design of self-compacting concrete. *Proceedings of the International RILEM Conference on Production Methods and Workability of Concrete*, Paisley 1996.
8. Okamura H., Ozawa K. Self-compactable high performance concrete. *International Workshop on High Performance Concrete*, American Concrete Institute, Detroit, pp. 31-44, 1994.
9. Sedran T. Les bétons Autonivelants. *Bulletin LCPC* 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-avril 1995.
10. De Larrard F. et al. Mix design of self compacting concrete. *RILEM International Conference on production methods and workability of concrete*, pp.439-451, Glasgow, 3-5 juin 1996.
11. Petersson Ö., Billberg P. and Van B.K. A model for Self- Compacting Concrete. *International Rilem Conference on 'Production methods and workability of concrete'*, RILEM Proceedings 32, 1996.
12. Su N., Hsu K.C., Chai H.W. A simple mix-design method for self compacting concrete. *Cem Concr Res*, 31(12), pp1799-1807, 2001.
13. NF EN 12350-8: Novembre 2010. Essai pour béton frais - Partie 8: béton auto-plaçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams.
14. NF EN 12350-10: Novembre 2010. Essai pour béton frais - Partie 10: béton auto-plaçant - Essai à la boîte en L.
15. NF EN 12350-11: Novembre 2010. Essai pour béton frais - Partie 11: béton auto-plaçant - Essai de stabilité au tamis.
16. NF EN 12390-3: Avril 2012. Essais pour béton durci - Partie 3: résistance à la compression des éprouvettes.
17. NF EN 12390-5: Avril 2012. Essais pour béton durci - Partie 5: résistance à la flexion sur éprouvettes.
18. COLLECTION TECHNIQUE CIM-BÉTON, «G11. Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre » chapitre 3 ; Fiches Techniques Tome II, Ecole Française du Béton, pp : 110-119. Janvier 2013. Le site web du centre d'information : <http://www.infociments.fr/publications/ciments-betons/collection-technique-cimbeton/ct-g11>.
19. Aitcin C P. Bétons Haute Performance. Edition Eyrolles, ISBN 2-212-01323-X, 683 pages, Paris, 2001.
20. Aitcin P C, 1995. Developments in the application of high-performance concretes. *Construction and building materials*, Vol. 9, No. 1, 1995.
21. Chaid R. Formulation, Caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux. Thèse de doctorat d'état, ENP, Décembre 2006.
22. Lakhil R. Elaboration des BHP à base des sous produit locaux : formulation et caractérisation physico-mécanique. Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2011.
23. R. Zaitri. Effet de l'ajout de calcaire et de sable de dune broyés sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons à hautes performances. Thèse de doctorat, Université de Laghouat, 2016.
24. COLLECTION TECHNIQUE CIM-BÉTON, «G11. Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre » chapitre 3 ; Fiches Techniques Tome II, Ecole Française du Béton, pp : 96-109. Janvier 2013. Le site web du centre d'information : <http://www.infociments.fr/publications/ciments-betons/collection-technique-cimbeton/ct-g11>.
25. COLLECTION TECHNIQUE CIM-BÉTON, «G11. Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre » chapitre 3 ; Fiches Techniques Tome II, Ecole Française du Béton, pp : 120-125. Janvier 2013. Le site web du centre d'information : <http://www.infociments.fr/publications/ciments-betons/collection-technique-cimbeton/ct-g11>.
26. Lanez M. Contribution à l'étude des bétons de poudres réactives. Magister, USTHB/FGC, Alger. 129, 2005.

27. Tafraoui A. Contribution à la valorisation du sable de dune de l'erg occidental (Algérie) - Application aux nouveaux bétons. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
28. Richard P. and Cheyrezy M.H. Composition of reactive powder concretes. Cement and Concrete Research, vol.25(7), p. 1501-1511, 1995.
29. COLLECTION TECHNIQUE CIM-BÉTON, «G11. Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre » chapitre 3 ; Fiches Techniques Tome II, Ecole Française du Béton, pp : 126-136. Janvier 2013. Le site web du centre d'information : <http://www.infociments.fr/publications/ciments-betons/collection-technique-cimbeton/ct-g11>.
30. LES BETONS : DE NOUVELLES PROPRIETES AU SERVICE DU DEVELOPPEMENT DURABLE. Les bétons fibrés a ultra-hautes performances. <http://www.planete-tp.com/les-betons-fibres-a-ultra-hautes-performances-bfup-a2191.html>.
31. FICHE TECHNIQUE BÉTON POLYMÈRE - RÉSINE POLYESTER ET SABLES DE QUARTZ. <http://www.artiplant.com/FICHE-TECHNIQUE-BETON-POLYMERE.pdf>.
32. A. Guidoum. POLYMERES ET COMPOSITES. Matériaux de Construction. <http://lmc.epfl.ch/webdav/site/lmc/shared/MX%20Courses/Polymeres&Composites.pdf>.
33. Le béton polymère : <http://www.eti-construction.fr/le-beton-polymere-a-la-fois-leger-et-resistant-5014/>.
34. Le béton polymère : <http://www.designenbretagne.com/beton-polymere/>.