

Chapitre III. Nouveaux matériaux

III.1. Le béton Auto-plaçant

III.1.1. Introduction

Pendant plusieurs années commençantes en 1983, le problème de la durabilité des structures en béton était un sujet d'intérêt majeur surtout au japon, il est considéré comme un problème majeur auquel la société japonaise fait face. Surtout que le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton.

L'utilisation de béton très fluide, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme solution possible à ce problème.

Un béton fluide permettant :

- une mise en place aisée ;
- un bon remplissage des coffrages et des moules ;
- un parfait enrobage des armatures ;
- une forte compacité.

III.1.2. Définition du béton Auto-plaçant

Le béton auto-plaçant (BAP) est un béton **très fluide, homogène et stable, mis en place sans vibration**. Le compactage se faisant uniquement par le poids du béton, et confère à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques.

La technologie des BAP se veut innovante remplacera à terme la technique classique des bétons vibrés dans bon nombre d'applications.



Figure III.1. Le béton Autoplaçant.

III.1.3. Domaines d'utilisation privilégiés des BAP

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant :

- des densités de ferrailage importantes ;
- des formes et des géométries complexes : voiles courbes, etc. ;
- des voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, etc. ;
- des voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures ;
- des exigences architecturales et de qualité des parements particulières ;
- des accès difficiles voire impossibles pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration.

III.1.4. Le béton auto-plaçant tant que matériau

Les BAP sont utilisés, puisqu'ils sont mis en place sans vibration, pour leur aptitude à remplir les coffrages les plus densément armés sans intervention extérieure. Cette caractéristique est communément appelée « capacité de remplissage ».

La capacité de remplissage dépend de deux facteurs : la déformabilité et la résistance à la ségrégation.

Les recherches ont montré l'existence d'une relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement du béton. Pour de faibles valeurs de l'affaissement, l'écoulement aurait tendance à s'arrêter à cause d'une augmentation de la friction entre les particules du béton.

Pour des valeurs d'affaissement plus élevés au contraire, les granulats peuvent se séparer plus facilement du mortier et l'écoulement peut être bloqué par la formulation de ponts de granulats reposant sur les obstacles : **c'est la ségrégation.**

Pour avoir une capacité de remplissage maximale, il faut donc avoir une déformabilité maximale et une ségrégation minimale.

La résistance à la ségrégation dépend essentiellement de deux facteurs : la viscosité du mortier (ou de la pâte de ciment) et du volume des gros granulats. En effet, les recherches montrent qu'une diminution de la viscosité du béton s'accompagne d'une augmentation de la ségrégation.

L'entraînement des granulats par le mortier est favorisé par les forces de viscosité, une augmentation de la viscosité minimise donc la ségrégation.

Le volume des gros granulats ainsi que leur taille maximale jouent un rôle non négligeable dans la résistance à la ségrégation. En effet, les collisions et les frictions inter-granulaires, qui sont à l'origine du blocage de l'écoulement autour des obstacles, augmentent avec le volume des gros granulats dans le béton

La composition des BAP doit donc inclure des constituants supplémentaires et des dosages différents par rapport à ce qui est pratiqué pour les bétons vibrés pour présenter ces qualités

de déformabilité et de résistance à la ségrégation. Nous abordons dans le paragraphe suivant la composition et la formulation de ces bétons

III.1.5. Principes de formulation des BAP

La formulation des BAP fait appel à quatre principes fondamentaux :

- Fluidification de la pâte : cette fluidification est obtenue sans ajout d'eau
- Limitation des frottements entre les granulats pour favoriser l'écoulement et la fluidité
- Stabilisation du mélange pour éviter le ressuage et les risques de ségrégation ;
- Maintien de la rhéologie pendant la Durée Pratique d'Utilisation souhaitée.

III.1.6. Les principaux constituants des BAP

Les constituants des BAP peuvent être assez différents de ceux des BO. Ils peuvent différer tant par leurs proportions que par leur choix. Étant donné le mode de mise en place des BAP, les constituants entrant dans la fabrication du BAP, selon leur utilisation, en trois catégories ; les matériaux de base (ciment, granulats et eau de gâchage), les additions minérales, ainsi que les adjuvants chimiques.

III.1.6.1. Matériaux de base

Les granulats, le ciment et l'eau forment les éléments de base de tous types de béton. Ils sont qualifiés ainsi puisqu'ils sont historiquement les seuls constituants des bétons de nos ancêtres et parce qu'ils ont toujours les plus grosses proportions relatives dans le mélange de BAP.

A) Les granulats

Les granulats roulés ou concassés peuvent en principe être utilisés. Afin d'empêcher tout risque de blocage du BAP par les barres d'armature lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm. Le mélange pour béton (granularité) est caractérisé par une teneur élevée en sable et en éléments fins. Le passant au tamis de 2 mm devrait être idéalement compris entre 38 et 42%. De même, la proportion de farines (< 0,125 mm) ne devrait pas être trop faible, l'optimum étant situé entre 4 et 8%.

Le choix d'une granularité continue appropriée est très important, étant donné la forte incidence du volume des vides sur la quantité nécessaire de pâte de ciment. Afin d'assurer une bonne stabilité du BAP (éviter toute ségrégation), il est recommandé de choisir un sable spécialement optimisé, au besoin recomposé. Partir de plusieurs fractions.

B) Le ciment

En principe, tous les types normalisés de ciment conviennent pour la fabrication de BAP. Cependant, l'utilisation du ciment portland (contenant seulement le clinker) nous donne toute latitude pour varier et contrôler les quantités introduites des additions minérales.

C) L'eau de gâchage

Toute eau du réseau public d'eau potable convient pour la fabrication de béton Auto-plaçant. Etant donné que le dosage en eau influence de manière considérable la viscosité et la capacité d'autoplaçant du béton, il est indispensable de s'écarter le moins possible de la valeur planifiée. Il est ainsi très important de mesurer et de prendre en compte l'humidité des granulats et tout spécialement du sable. Cas échéant, on tiendra également compte de la teneur en eau des adjuvants.

III.1.6.2. Additions minérales

Les BAP sont caractérisés par une fluidité importante et surtout une diminution de la ségrégation et du ressuage (par rapport au béton vibré).

Pour obtenir ces propriétés et pour un meilleur arrangement granulaire, on ajoute de fortes teneurs en additions minérales

Nous présentons ci-dessous les différentes additions minérales éventuelles qu'on peut incorporer dans les compositions des BAP :

1. Les fillers calcaires
2. Les pouzzolanes naturelles
3. Le laitier de haut fourneau
4. La fumée de silice
5. Les cendres volantes,...

III.1.6.3. Adjuvants chimiques

A) Les super-plastifiants

Ce sont des réducteurs d'eau à haute efficacité, et se présentent généralement sous forme de liquide. Ils sont composés de longues molécules organiques de masse élevée.

Le mode d'action des super-plastifiants est extrêmement complexe. Il peut être expliqué comme suit:

Lorsqu'ils sont en contact avec un milieu aussi polaire que l'eau, les grains de ciment tendent à s'agglomérer sous forme d'amas (floculation). Par conséquent, cette floculation piège un

certain volume d'eau entre les grains de ciment (eau captive) qui n'est plus disponible pour assurer une bonne maniabilité au béton.

Les super-plastifiants en s'adsorbant à la surface des grains de ciment brisent cette dynamique. Ils neutralisent les différentes charges et donnent la même charge électrostatique à chaque grain de ciment.

Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules et, par conséquent, la dispersion des grains de ciment libère. De l'eau qui est maintenant disponible à la lubrification du mélange d'où l'augmentation de la maniabilité.

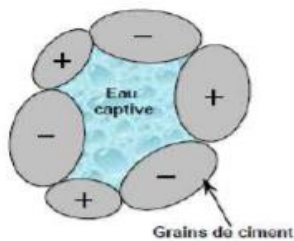


Figure III.2. Pâte de ciment non adjuvantée.

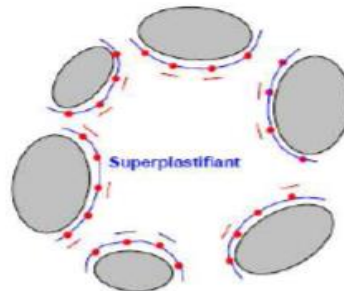


Figure III.3. Pâte de ciment additionnée d'un superplastifiant.

B) Les agents colloïdaux (agent de viscosité)

Généralement les fluidifiants diminuent la viscosité du béton, ce qui rend le matériau plus sensible vis-à-vis du phénomène de ségrégation. Les agents de viscosité (qui se présentent généralement sous forme de poudre) ont, eux, la propriété essentielle de modifier le comportement rhéologique des milieux aqueux dans lesquels ils sont utilisés (ce rôle modificateur peut aller du simple épaissement jusqu'à la gélification) et peuvent être utilisés avec intérêt dans la composition des BAP.

III.1.7. Pratique actuelle de la formulation

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

Par chance, le cahier des charges des BAP est très souvent réduit à sa plus simple expression, puisqu'il ne concerne que les propriétés à l'état frais. En fait, le client majoritaire des fabricants de béton est l'industrie du bâtiment, qui utilise principalement des bétons de 25 à 35MPa. Or, par expérience, on sait que ces résistances "ordinaires" sont facilement atteintes par les BAP (d'autant plus que leurs rapports E/C sont proches de ceux des BO qu'ils doivent remplacer).

En outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation ; les dosages en super-plastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement à cause de leur coût. Avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant un peu le travail du formulateur.

- 1- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- 2- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³.
- 3- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE (P18-305), soit en général de 300 à 350 kg/m³. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³.
- 4- Le dosage en super-plastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages.

Ainsi en termes de constituants, là aussi on constate une différence entre le béton traditionnel (BO) et le BAP, en effet celui contient plus comme le montre la figure suivante :

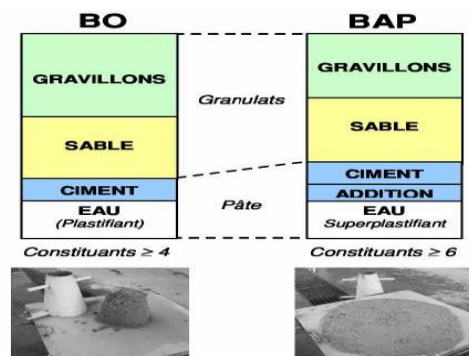


Figure III.4. Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP.
Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.

III.1.8. Caractérisations des BAP à l'état frais

Avant d'accepter une composition comme celle d'un BAP, il faut s'assurer que le béton résultant possède effectivement les qualités qu'on espère. Pour cela, il existe de nombreux essais permettant d'évaluer les différentes caractéristiques du béton à l'état frais.

Parmi les essais les plus utilisés pour la caractérisation des bétons auto-plaçant à l'état frais sont :

III.1.8.1. Détermination de la consistance (slump flow)

C'est un essai dérivé de l'essai d'affaissement. Au lieu de mesurer l'affaissement, on mesure le diamètre moyen de la galette formée par le béton lors de l'étalement.

- le résultat final est la moyenne des deux valeurs obtenues.

On vise habituellement un étalement compris : $\text{Slump flow} = \frac{D1+D2}{2}$

Tableau III.1. Essai d'étalement (slump flow)

Classe	ETALEMENT en (mm)
<i>SF1</i>	<i>550 à 650</i>
<i>SF2</i>	<i>660 à 750</i>
<i>SF3</i>	<i>760 à 850</i>

- la **classe SF1** est souvent appropriée : aux structures en béton non ou faiblement armées, bétonnées par le haut, avec un libre déplacement du point de remplissage
- la **classe SF2** est appropriée à de nombreuses applications courantes
- la **classe SF3** est normalement produite avec un diamètre maximum des granulats peu élevé (inférieur à 16 mm) et est utilisée pour des applications verticales dans des structures qui comportent un ferrailage dense, ou qui sont de formes complexes.



Figure III.5. Essai d'étalement.

III.1.8.2. Détermination du risque de blocage à l'aide de la L-Box

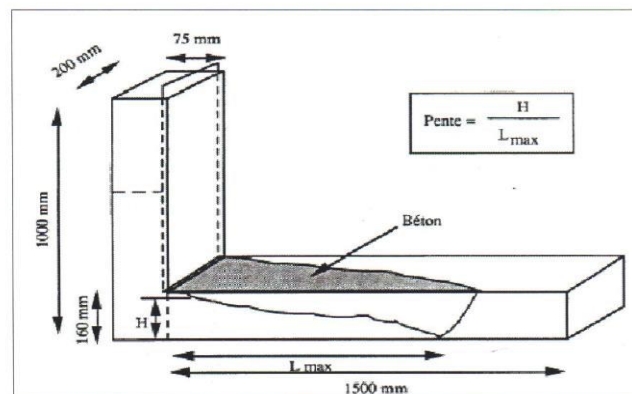
Ces essais permettent de tester la mobilité du mélange frais en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables. Le principe de cet essai est le suivant :

- la partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton,
- Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute, puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage,
- Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H_1 et H_2 .

Tableau III.2. Taux de remplissage dans la boîte en L.

Classe	Taux de remplissage
PL1	$\geq 0,80$ avec 2 armatures
PL2	$\geq 0,80$ avec 3 armatures

- **PL1** pour les structures avec un intervalle d'écoulement compris entre 80 mm et 100 mm
- **PL2** pour les structures avec un intervalle d'écoulement compris entre 60 mm et 80 mm

**Figure III.6.** Schéma de la boîte en L.

III.1.8.3. Détermination de la vitesse d'écoulement à l'aide du V-Funnel

Ce test admet d'estimer la mobilité d'un BAP en milieu non confiné.

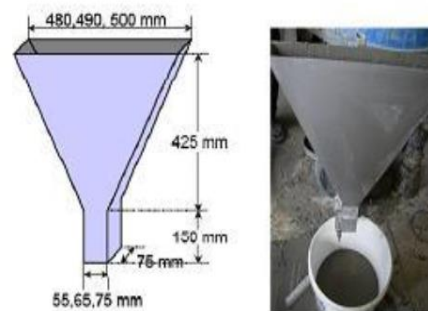
Il possède un signe sur la viscosité du béton en calculant le temps d'écoulement de 12 litres de béton à travers un entonnoir de section carrée. Plus le temps d'écoulement est long moins le béton est fluide et plus il est visqueux. D'après les précisions deux catégories de viscosité ont été incitées.

- Pour un $T_{50} \leq 2$ s on a la catégorie VF1, lorsque temps d'écoulement «t» est inférieur à 8 s.
- Pour un $T_{50} > 2$ s on a la catégorie VF2 pour un temps d'écoulement allant de 9 à
- 25 s.

Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton auto-plaçant.

Tableau III.3. Classification des BAP selon la norme NFP 12350-9.

Classe	Temps (seconde) relatif à l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V
VF1	< 9,0
VF2	9,0 à 25,0

**Figure III.7.** Essais des Entonnoirs.

III.1.8.4. Détermination de la résistance à la ségrégation par l'évaluation de la stabilité au tamis

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, il vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier.

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (Plaitance) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm. Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes :

- $0\% \leq \% \text{ Plaitance} \leq 15\%$: stabilité satisfaisante,
- $15\% < \% \text{ Plaitance} \leq 30\%$: stabilité critique : essai de ségrégation à réaliser in situ,
- $\% \text{ Plaitance} > 30\%$: stabilité très mauvaise : ségrégation systématique, béton inutilisable.

Tableau III.4. Stabilité au tamis.

Classe	Pourcentage de laitance
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

- **classe SR1** est généralement applicable aux dalles de faible épaisseur et peut également être utilisé dans les applications verticales avec une distance maximale de cheminement de 5 m et un intervalle d'écoulement supérieur à 80 mm.
- **lasse SR2** est mieux adapté dans les applications verticales si la distance de cheminement est supérieure à 5 mètres et si l'intervalle d'écoulement est supérieur à 80 mm.



Figure III.8. Essai de la stabilité au tamis.

III.1.9. Caractérisation des BAP à l'état durci

Lorsque le BAP est formulé et mis en œuvre de manière adéquate, ses propriétés à l'état durci (résistance, déformation, durabilité) ne se différencient guère de celles d'un béton ordinaire vibré. Généralement ces propriétés d'après plusieurs chercheurs, sont meilleures, en particulier lorsque le béton spécifié doit répondre à des exigences courantes, ce qui est généralement le cas dans le domaine du bâtiment.

III.1.9.1. La résistance mécanique

Les chercheurs montrent que, en utilisant les fillers, la résistance mécanique s'accélère aux jeunes âges.

Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les super-plastifiants, favorisent l'hydratation du ciment et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours. puis deviennent moins significatifs par la suite.

Cet effet tend à s'annuler au-delà de 28 jours. Les bétons auto-plaçants présentent une même résistance mécanique que celui d'un béton ordinaire (béton vibré).

III.1.9.2. Le module élastique

Plusieurs recherches concernant le module d'élasticité des BAP montrent qu'il est souvent proche à celui de BO, lorsque les deux types de béton ont la même résistance

III.1.9.3. Durabilité

Les BAP, formulés avec les mêmes composants que les bétons traditionnels, sont soumis aux mêmes propriétés de transfert et mécanismes d'altération vis-à-vis des agressions externes (attaques sulfatiques, gel...) et internes (carbonatation, pénétration des chlorures). Ils présentent donc une durabilité au moins équivalente à celle des bétons vibrés.

III.1.10. Fabrication des BAP

- En principe tous les types de malaxeurs conviennent pour la fabrication des BAP.
- Lors de l'introduction des différents constituants dans le malaxeur, on appliquera les mêmes consignes que celles recommandées pour les bétons vibrés,
- Le temps de malaxage est légèrement plus long que pour un béton classique, afin que le mélange, riche en éléments fins et en adjuvants, soit le plus homogène possible.
- L'un des points les plus importants de la fabrication est le contrôle strict de la teneur en eau du mélange.

III.1.11. Transport des BAP

En raison de sa fluidité élevée, le béton auto-plaçant doit être transporté en camion malaxeur. Le tambour du malaxeur doit tourner lentement pendant toute la durée du transport. Dans le cas d'un terrain en forte pente, la fermeture du tambour avec un couvercle est recommandée. Comme dans le cas d'un béton vibré, la fluidité du béton peut se modifier durant le transport, la manière et l'ampleur de cette modification sont fonction de plusieurs paramètres : le type d'adjuvant, la durée de transport, le dosage en eau et la température.

Dans une certaine mesure il est possible de corriger ces modifications pour vérifier les exigences d'ouvrabilité souhaitées au moment du déchargement sur chantier. Avant le déchargement, le béton doit être malaxé à nouveau pendant environ 5 minutes à vitesse de rotation maximale.

III.1.12. La mise en place des BAP

Par rapport au béton vibré la mise en place du BAP est grandement facilitée, elle peut être réalisée par une seule personne et selon 03 méthodes différentes :

- *La première méthode:* Mise en œuvre à la benne à manchette traditionnelle, Le béton est mis en

Œuvre par le haut du coffrage. La manche est glissée dans le coffrage pour réduire la hauteur de chute

- *La deuxième méthode*: la mise en œuvre par pompage en pied de coffrage, cette méthode est adaptée en particulier pour les éléments verticaux de grande hauteur. Elle supprime toute intervention en partie haute des coffrages.
- *La troisième méthode* est la mise en place par pompage, Le tube plongeur doit être suffisamment introduit dans le coffrage pour limiter au maximum la hauteur de chute. il est fortement conseillé de limiter la hauteur maximale de chute du béton à 5 mètres. Cette méthode est aussi adaptée au bétonnage d'éléments verticaux.

III.1.13. Les avantages des bétons auto-plaçant

- Amélioration des conditions de travail suite à l'absence de nuisances sonores ;
- Facilité et rapidité de la mise en œuvre ;
- Une économie de mains d'œuvre et excellent remplissage des coffrages ;
- Béton de qualité et surface plane, régulière ;
- Possibilité de bétonner des formes complexes.

III.2. Béton de fibres

III.2.1. Introduction

Le béton est un matériau dont les performances en traction sont faibles par rapport à celles en compression. Pour l'utilisation efficace d'un tel matériau, il a été nécessaire de le renforcer par des aciers qui reprennent les efforts de traction : le béton armé. Le renforcement de la zone tendue du béton par des armatures en acier a permis le développement de ce matériau dans le bâtiment et les travaux publics.

Cette solution, outre toutes ses qualités (résistance, formulation relativement simple, facilité de mise en œuvre...), présente néanmoins deux inconvénients : ce matériau est fortement hétérogène et son comportement en traction reste du type fragile. De plus, sa mise en œuvre se heurte parfois à la complexité du ferrailage.

Cependant, l'incorporation des fibres au sein du béton améliore son comportement de façon à augmenter ces caractéristiques mécaniques. Ce procédé a donné naissance à un nouveau matériau qui présente une bonne résistance à la traction, un comportement post-rupture satisfaisant et un caractère plus ou moins homogène dans tout le volume de la matrice : béton de fibre.

Certains auteurs l'appellent nouveau matériau mais en fait depuis 1960, des recherches importantes ont été faites sur ce nouveau matériau qu'est le béton de fibres, notamment en ce qui concerne les propriétés mécaniques et le procédé de mise en œuvre de ce matériau.

III.2.2. Définition des fibres

Les fibres sont largement utilisées depuis plusieurs années dans le domaine du génie civil, elles sont produites à partir d'acier, de plastique, de verre et de matériaux naturels sous différentes formes et dimensions.

Les fibres sont classées en trois grandes familles selon leur nature et leur propriété mécanique :

- fibres naturelles : d'origine minérale, animale ou végétale.
- fibres synthétiques : comme le polypropylène et le nylon.
- fibres métalliques : comme l'acier, la fonte ou l'inox

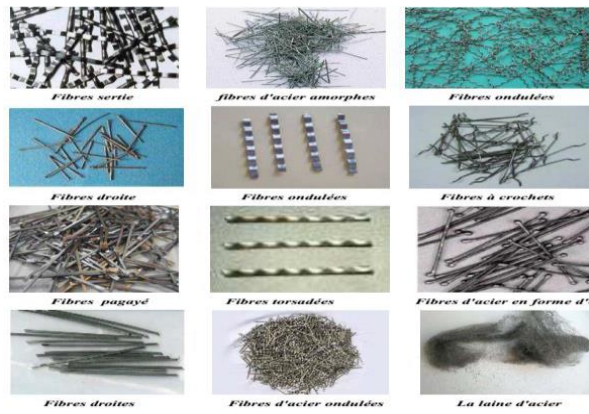


Figure III.9. Les fibres métalliques



Figure III.10. Les fibres synthétiques



Figure III.11. Les fibres naturelles

Les fibres présentent des caractéristiques et des propriétés différentes : forme des fibres (plate, ondulée...), état de surface (lisse, rugueuse...), dimensions (diamètre, longueur...) et l'adhérence qui garantissent des caractéristiques mécaniques spécifiques aux ouvrages dans lesquels elles sont incorporées.

L'idée de l'utilisation des fibres est très ancienne. Il y a près de 3500 ans, les matériaux de construction fragiles, par exemple les briques cuites en argile étaient renforcées avec du crin de cheval, de la paille et d'autres fibres végétales.

Les fibres sont largement utilisées dans la matrice cimentaire depuis le début du 20ème siècle pour améliorer la résistance à la flexion, à la ténacité, aux chocs, à la fatigue, à l'abrasion, à la capacité de déformation et aux caractéristiques de ductilité du béton. Le principal avantage des fibres est le contrôle des fissurations.

Les fibres d'acier et les fibres de polypropylène sont les plus utilisées comme fibres de renfort. Malgré leurs avantages, le coût élevé de la matière première, le processus de fabrication coûteux et non respectueux de l'environnement notamment les émissions à effet de serre, a incité les chercheurs et les industries à les substituer dans la mesure du possible, par des fibres végétales non traitées chimiquement pour la confection d'un béton économique, durable et respectueux de l'environnement.

III.2.3. Caractéristiques et propriétés des fibres

Chaque fibre présente des caractéristiques et des propriétés spécifiques : dimensions (diamètre inférieur en général à 1 mm, longueur en général inférieure à 60 mm...), formes (lisses, crantées, ondulées, à crochet...), résistances mécaniques (résistance à la traction), ce qui génère des performances mécaniques et des propriétés très variées.

III.2.4. Définition du béton de fibres

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres. Les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement homogène. Les fibres ont pour rôle principal de maîtriser la fissuration et de reprendre les efforts au droit des fissures éventuelles. Crochet...), résistances mécaniques (résistance à la traction), ce qui génère des performances mécaniques et des propriétés très variées.

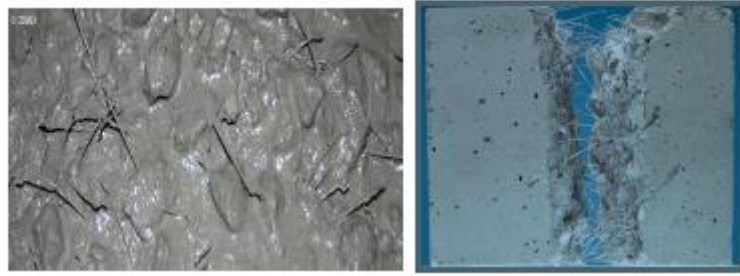


Figure III.12. Béton de fibre.

III.2.5. Utilisation des fibres dans le béton

Les fibres de différentes compositions incorporées au béton ont pour effet d'augmenter la résistance résiduelle du béton. Dans certains cas, l'utilisation de fibres permet de renforcer la structure.

En général, les fibres permettent une meilleure répartition des contraintes mécaniques. Les propriétés majeures reliées à l'utilisation de fibres sont :

III.2.5.1. Amélioration des caractéristiques mécaniques

L'utilisation de fibres augmente la ductilité du béton, c'est-à-dire ses caractéristiques en post-fissuration.

De plus, l'utilisation de fibres peut apporter une amélioration en flexion, en tension, en torsion et en cisaillement ainsi qu'à la résistance aux impacts et à la fatigue. Un béton fibré continue donc à supporter des charges après la formation de fissures.

Il est important de se rappeler que la distribution uniforme des fibres dans le mélange est la condition essentielle pour obtenir une amélioration des caractéristiques mécaniques du béton fibré.

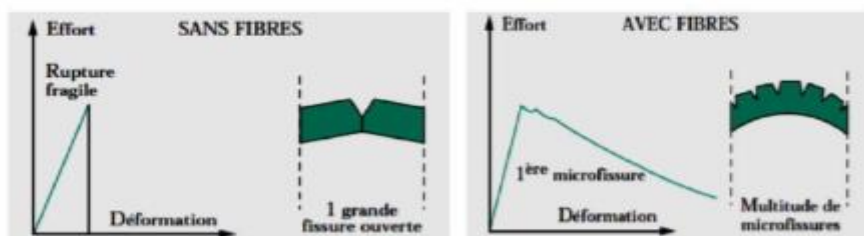


Figure III.13. Comportement fragile du béton ordinaire et comportement ductile du béton fibré.

III.2.5.2. Contrôle de la fissuration de retrait

Pour optimiser le contrôle de la fissuration, les fibres doivent être distribuées de manière homogène dans le béton tout en ayant un dosage adéquat. L'utilisation de fibres aide donc à diminuer la fissuration causée par le retrait plastique.

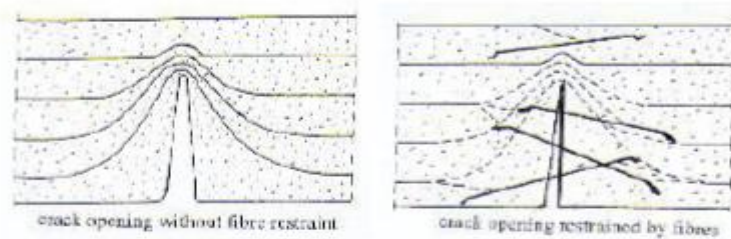


Figure III.14. Effet de retardement de la fissuration du béton avec fibres.

III.2.6. Composition du béton fibré

La composition du béton fibré est très proche de celle du béton ordinaire. Lors de la formulation du béton fibré, la quantité de fibres varie selon l'application et le type des fibres. Pour obtenir une maniabilité correcte (un mélange fluide), les bétons fibrés ont souvent besoin d'adjuvants tels que les super-plastifiants. Ces derniers permettent d'obtenir un béton ouvrable, même en présence des fibres.

III.2.7. Les avantages et inconvénients du béton fibré

III.2.7.1. Les avantages :

Les fibres offrent une meilleure cohésion au béton, augmentent sa résistance, améliorent sa déformabilité et réduisent les effets de retrait ainsi que les microfissures.

De façon générale, voici quelques avantages observés au niveau du béton :

- Une facilité de mise en œuvre ;
- Une longue durée de vie et un poids léger ;
- Le remplacement total ou partiel des armatures passives ;
- La baisse du risque de fissuration ;
- Une bonne résistance au feu, à l'abrasion, aux chocs, à la traction et à la flexion.

III.2.7.1. Les inconvénients du béton fibré :

- Le béton fibré est plus cher que le béton ordinaire.
- L'incorporation de fibres diminue l'ouvrabilité du béton, l'ajout de superplastifiant est alors recommandé.
- Il est interdit d'utiliser des fibres structurales en zone de risque sismique modéré et plus.

III.2.8. Les bétons de fibres métalliques

Le mélange des fibres métalliques au béton doit être particulièrement soigné, certaines fibres ayant tendance à s'agglomérer (phénomène communément appelé « formation d'oursins »), pour éviter ce problème on doit limiter D_{\max} des gros granulats, augmenter la proportion de granulats fins et contrôler la vitesse d'introduction des fibres, l'incorporation des fibres peut être faite soit au malaxage, soit au moment du coulage soit à la projection.

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



Figure III.15. Formation d'oursins.

Pour avoir une répartition homogène des fibres dans l'entièreté, La mise en œuvre et le compactage doivent être étudiés pour le béton considéré et en fonction de sa maniabilité qui diffère généralement de celle des bétons classiques sans fibres.

Les dosages en fibres sont de l'ordre de 0.3 à 2% en volume, soit 25 à 160 Kg/m³.

III.2.9. Les fibres de verre

Les fibres de verre sont, grâce à leurs qualités mécaniques et leur rigidité, des renforts très efficaces du béton. Elles se dispersent facilement dans la matrice cimentaire, ce qui permet de réaliser des produits de formes très variées.

En s'opposant à la propagation des microfissures dans le béton, elles améliorent la résistance en traction du béton et sa ductilité.

- Propriétés des fibres de verre

- Les caractéristiques mécaniques élevées : 3000 MPa pour la résistance à la traction.
- Une excellente résistance au feu (jusqu'à 800 C) ce critère ajouté a un coefficient de dilatation du même ordre que celui de la pâte de ciment confère aux bétons de fibres de verre une bonne résistance au feu.

- Elaboration des bétons de fibres de verre

Ce procédé consiste à fabriquer un mortier dans un malaxeur et à y ajouter 4 à 5 % en poids de fibres de verre coupées (entre 15 à 60 mm de longueur), ce mélange peut être moulé ou pressé, mais dans tous les cas la vibration doit être de faible amplitude pour maintenir une répartition homogène des matériaux

- Applications

Sur chantier les mortiers de fibres de verre s'utilisent pour les enduits extérieurs monocouches ainsi que pour certains procédés d'isolation thermique.

En préfabrication les domaines d'application sont très vastes :

- panneaux de façade minces de 10 à 15 mm d'épaisseur ou panneaux sandwich à isolant incorporé
- éléments de bardage et éléments décoratifs
- mobilier urbain
- éléments divers : coffrets, coffrages, habillages,
- produit d'assainissements : tuyaux, caniveaux

III.2.10. Fibres de polypropylène

Ce sont des fibres industrielles (plastiques) minces, de différentes couleurs, chimiquement calmes et ne réagissent pas avec les composants de mélange du béton. La résistance des fibres de polypropylène à la tension est très forte, ainsi son élasticité. Le poids spécifique est faible et ces fibres n'absorbent pas de l'eau.

- Propriétés des fibres de polypropylène

Si leurs caractéristiques mécaniques ont des valeurs plus faibles que celles des fibres métalliques, il faut cependant mentionner leur insensibilité chimique, leur souplesse, qui rend aisée leur incorporation au béton et leur allongement à la rupture (15 à 20 %), qui favorise la «ductilité» du béton.

Comme la plupart des matières plastiques, les fibres de polypropylène sont peu résistantes au feu : leur température de fusion est d'environ 160 C° mais leur fusion n'affecte pas la résistance du béton.

- Les bétons de fibres de polypropylène

La fabrication du béton avec fibres de polypropylène ne soulève aucune difficulté, la répartition des fibres

se faisant facilement et ne nécessitent pas de précaution particulière lors de malaxage.

Les fibres de polypropylène améliorent la maniabilité du béton et sa cohésion.

Ces propriétés sont intéressantes pour les pièces à démoulage immédiat (bordures, tuyaux) en même temps qu'elles améliorent l'aspect et la précision des angles, des tranches ou arêtes des pièces moulées ou des dallages.

Le grand avantage des bétons de fibres de polypropylène est leur bonne résistance à la fissuration due au « premier retrait » ainsi que leur résistance aux chocs.

Les dosages couramment pratiques sont de l'ordre de 0.05 à 0.2 % en volume (0.5 à 2 Kg de fibres par m³ de béton)

- Application

Des propriétés précédentes découlent les applications des bétons de fibres de polypropylène :

- Dallages industriels et chaussées
- Pièces préfabriquées (panneaux décoratifs)
- Mortiers projetés
- Enduits.

III.3. Béton de chanvre

Dans le cadre du développement durable, les nouvelles réglementations en matière d'isolation thermique dans le secteur du bâtiment, conduisent les chercheurs à la recherche de nouveaux matériaux pour constituer des systèmes économes en énergie tout en assurant le confort de l'habitat. Cette recherche s'est très vite dirigée vers l'utilisation de matériaux issus de la matière végétale. Parmi les nouveaux matériaux à base végétale, le chanvre est le plus utilisé dans la construction.

Le béton de chanvre est un nouveau matériau de construction qui a été mis au point en mélangeant des particules de chènevotte et un liant minéral (ciment ou chaux de préférence). Sa première utilisation remonte à 1986, lorsque Charles Rasetti, entrepreneur éclairé, utilise le béton de chanvre en collaboration avec la Chanvrière de l'Aube, pour la rénovation de la Maison de la Turquie à Nogent-sur-Seine

III.3.1. Le Chanvre

Le chanvre (*Cannabis Sativa*) est cultivé par l'homme depuis le néolithique pour ses fibres résistantes, ses graines oléagineuses et ses vertus médicinales. Sa culture a perduré durant plusieurs siècles principalement en raison de l'utilisation de sa fibre pour réaliser les voiles de bateau, du cordage ou des vêtements. Il a longtemps occupé une place prépondérante dans le paysage agricole européen. Couvrant la France de près de 200 000 ha au XIXe siècle, il a vu son activité décroître du fait de la concurrence de fibres exotiques ou artificielles. Devenue de plus en plus rude, cette dernière a fait quasiment disparaître la culture du chanvre en Europe au début des années 1960. Des années 1940, jusqu'à la fin des années 1990, l'industrie papetière a été le seul véritable débouché industriel du chanvre. Le développement actuel de nouveaux marchés (bâtiment, plasturgie) offre aujourd'hui au chanvre de nouvelles perspectives. L'intégralité de la plante est valorisable et trouve des applications variées.



Figure III.16. Plante de cannabis, la tige et la chènevotte

Le chanvre fournit trois co-produits : **la graine, les fibres et les chènevottes** (longtemps considérées comme un déchet utilisé essentiellement en paillage). La graine n'est pas valorisée dans les matériaux de construction, les fibres peuvent être utilisées pour produire de la laine et les chènevottes pour produire des bétons de chanvre et des enduits.

La transformation du chanvre peut se faire avec un défibrage pour obtenir des fibres et des chènevottes défibrées ou sans défibrage pour obtenir des chènevottes fibrées. Le défibrage du chanvre ne nécessite aucun traitement chimique mais est seulement réalisé sous action mécanique.



Figure III.17. Produits du défibrage du chanvre

Le processus d'extraction des fibres de chanvre se déroule en plusieurs étapes : la récolte, le rouissage sur champ et l'exploitation de la paille de chanvre

III.3.2. La composition du béton de chanvre

Le béton de chanvre est un matériau poreux obtenu en mélangeant un liant à base de chaux, des fibres de chanvre (chènevotte) et de l'eau.

La chaux employée est en majeure partie de la chaux aérienne Ca(OH)_2 , puis de chaux hydraulique. La chaux est adaptée aux constructions en matériaux naturels tel le chanvre puisqu'elle récupère le CO_2 lors de sa mise en œuvre. Pour le béton de chanvre, ces deux liants sont normalement combinés d'un mélange avec une proportion quelconque par exemple le liant T70 se compose 1/3 de chaux hydraulique et 2/3 de chaux aérienne. En ce qui concerne les particules, elles sont obtenues à partir de la tige d'une plante le « Cannabis Sativae» tandis que les graines ou chènevis de cette plante sont utilisées dans l'alimentation animale, cosmétique etc.

La forte porosité des particules de chanvre est due aux nombreux capillaires dont le diamètre est compris entre 10 et 40 μm qui mettent en évidence la structure tubulaire de la particule. Sa structure poreuse permet d'expliquer deux caractéristiques importantes : sensibilité à l'eau (pouvoir absorbant élevé) et capacité de déformation du granulat.

Les performances mécaniques et hygrothermiques sont liées au dosage de chaux. Plus le dosage de liants est grand, plus seront grandes la conductivité thermique et la résistance mécanique. Cela peut être expliqué par le fait que plus le dosage en liant est grand, plus les particules de béton de chanvre sont noyées par une matrice de chaux réduisant leur capacité d'isolation thermique.

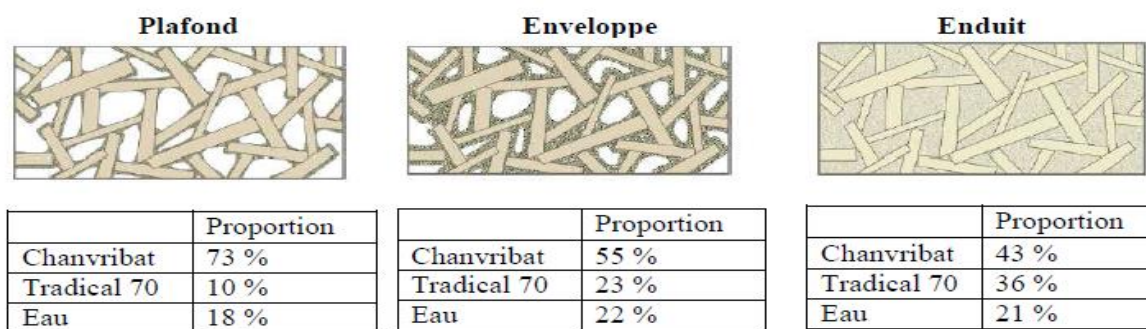


Figure III.18. Dosage en fonction de l'utilisation

Le dosage employé dépend également de l'utilisation du béton de chanvre dans l'enveloppe du bâtiment.

III.3.3. Caractéristiques de béton de chanvre

III.3.3.1. Caractéristiques physiques

A. masse volumique

Les masses volumiques apparentes sont de l'ordre de 200 à 250 kg.m^{-3} pour les bétons de chanvre utilisés comme matériau d'isolation en toiture, de l'ordre de 350 à 450 kg.m^{-3} pour les bétons de chanvre utilisés pour réaliser des murs et de l'ordre de 500 kg.m^{-3} pour les bétons de chanvre utilisés en isolation des sols.

B. Porosité

Les bétons de chanvre sont des matériaux très poreux. , les porosités totales sont de 72 à 80 %.

C. Capacité d'absorption d'eau

En présence de particules végétales poreuses, il convient de s'intéresser également à leur capacité d'absorption d'eau. Celle-ci est liée notamment à la taille des capillaires. Les chercheurs montrent des capacités d'absorption de l'ordre de 250%.

D. Caractéristiques thermiques

Le béton de chanvre présente une forte porosité ce qui lui confère une conductivité thermique adaptée pour une isolation répartie. Du fait de ses propriétés hygroscopiques, sa teneur en eau évolue avec les conditions ambiantes ce qui influe sur sa conductivité thermique.

La conductivité thermique de bétons de chanvre a été étudiée par plusieurs auteurs. Les résultats sont cohérents entre eux. Des chercheurs donnent des conductivités thermiques entre 0,09 et 0,16 W.m-1.K-1 pour des masses volumiques apparentes sèches entre 400 et 700 kg.m-3. D'autres chercheurs obtiennent des conductivités thermiques entre 0,11 et 0,12 W.m-1.K-1 pour des masses volumiques apparentes sèches entre 460 et 500 kg.m-3.

Les conductivités thermiques de béton de chanvre pour une stabilisation à (23°C, 50%HR), comprises entre 0,10 et 0,14 W.m-1.K-1 pour des formulations murs (masse volumique comprise entre 390 et 480 kg.m-3) de 0,09 W.m-1.K-1 pour une formulation « toit » et de 0,15 W.m-1.K-1 pour une formulation dalle.

III.3.3.2. Caractéristiques mécaniques

A. Caractéristiques requises

Le béton de chanvre n'assure pas un rôle porteur vis-à-vis de la structure. Il convient cependant de garantir un minimum de résistance et de rigidité à ce matériau.

L'association construire en chanvre propose ainsi des valeurs minimales indiquées dans le Tableau 3.4 pour la résistance en compression et le module d'élasticité (module apparent), selon l'application visée.

Tableau 3.4. La résistance en compression et le module d'élasticité

MUR	Module d'élasticité (MPa)	Résistance à la compression* (MPa)
Valeur seuil (minimum) en condition standard	>15 MPa	>0,2 MPa
TOIT	Module d'élasticité (MPa)	Résistance à la compression* (MPa)
Valeur seuil (minimum) en condition standard	>3 MPa	>0,05 MPa
ENDUIT	Module d'élasticité (MPa)	Résistance à la compression* (MPa)
Valeur seuil (minimum) en condition standard	>20 MPa	>0,3 MPa

III.3.4. Mise en œuvre du béton de chanvre

Il existe quatre façons différentes d'utiliser le béton de chanvre dans la construction :

III.3.4.1. La voie sèche : matériau sec sur le chantier, il s'agit d'un bloc, d'un parpaing, ou bien d'un mur préfabriqué.

La mise en œuvre des blocs est proche de celle d'un mur de brique (en dehors de la dimension).

Un parpaing en béton de chanvre est actuellement disponible avec une mise en œuvre très proche de celle des parpaings de ciment, mais plus léger. Ce nouveau système de parpaing, appelé Biosys, se monte par emboîtement à sec. L'ossature en béton armé est coulée dans des blocs amenant le caractère porteur du dispositif. Ce système breveté apporte une fois de plus, une solution écologique et facile à mettre en œuvre par les professionnels du bâtiment.

Ces éléments peuvent être utilisés en isolation intérieure, extérieur, au sol, ou bien pour réaliser des cloisons.

III.3.4.2. La voie humide

Le matériau est posé de façon humide, ou bien projeté sur une structure bois ou métallique, ou bien banché c'est-à-dire tassé entre deux parties fixes. Une machine projette le mélange chanvre-chaux dans les moindres recoins du mur ou du toit traité, pour une isolation parfaite.

III.3.4.3. Couple béton de chanvre et bois

La construction ossature bois constitue le cadre complémentaire idéal de la mise en œuvre du béton chanvre. Cette alliance de deux matériaux bio sources, permet d'obtenir une construction légère et souple, parfaitement isolée (respect des règles de l'art et bon dimensionnement des épaisseurs de murs), et adaptée aux zones sismiques et en surélévation,

du fait de l'élastoplasticité du béton de chanvre qui limite les effets de tassement. De plus d'après « Construire en Chanvre », « le béton de chanvre a une excellente capacité à retarder la progression de la chaleur à l'intérieur du mur. Ainsi, la dégradation de l'ossature en bois (qui assure la fonction porteuse de la structure) par la chaleur sera retardée de manière très importante » (Source : Rapport filière chanvre construction, 2019, page 8). Un module en béton de chanvre de 35cm d'épaisseur avec une ossature en bois stocke environ 48kg de CO₂ équivalent. Un mur traditionnel (solution parpaing + isolant), émet quant à lui environ 100 kg CO₂/m². Un mur en béton de chanvre agit alors comme un véritable puit de carbone.

III.3.5. Utilisation de béton de chanvre

Le béton de chanvre est utilisé en éco-construction pour des constructions neuves ou en réhabilitation. Le béton de chanvre est utilisé :

- par **projection**, voire déversement, dans le cas d'isolation de combles ;
- en **blocs**, moulés à froid, pour la conception de cloisons intérieures ;
- pour les sols.

III.3.6. Béton de chanvre : ses avantages et ses inconvénients

Les propriétés et les caractéristiques du béton de chanvre constituent de nombreux avantages. Mais à cela, il faut ajouter :

- une bonne résistance thermique ;
- une production écologique, car elle ne nécessite ni extraction ni cuisson ;
- une mise en œuvre peu laborieuse.

Les inconvénients du béton de chanvre se concentrent autour :

- de ses performances thermiques, en fonction du dosage ;
- de son séchage, qui peut être long, et des difficultés d'application en saison hivernale ;
- du besoin d'ossature pour sa projection/application, car c'est un matériau non porteur.