



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم
University Abdelhamid Ibn Badis - Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم الهندسة المدنية والمعمارية
Civil engineering & architecture department



N° d'ordre : M/GCA/2020

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie civil

Spécialité : Structure

Thème

**Renforcement des Structures par des
Matériaux Composites**

Présenté par :

-CHAREF Nadjet

- CHAIB Amina

Soutenu le .. / .. / 2020 devant le jury composé de :

Président : BELGHASMIA KHALIL

Examineur: ZELMAT YASSINE

Encadrant : REZIGUA AHMED

Année Universitaire : 2019 / 2020

Remerciements

*Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu **DIEU** qui m'a donné la santé, la volonté et la patience pour achever ce mémoire.*

*J'adresse ma profonde et respectueuse gratitude à Monsieur **REZIGA Ahmed** directeur de ce mémoire, qui a dirigé ce travail de recherche attentivement et efficacement l'évolution de ce travail.*

A tout le personnel de laboratoire de recherche de Génie Civil de l'Université de Mostaganem,

Enfin, Que tous les enseignants qui ont contribué à ma formation trouveront ici ma profonde reconnaissance

Dédicaces

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde, à toi mon père.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.

A tous mes frères et mes sœurs, ma nièce et mon neveu.

Je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements.

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amies et collègues d'étude,

CHARAF Nadjet.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A celle qu'elle a veillée sur moi pendant toujours, ma chère mère,

A mon très cher père,

A toute ma famille, mes frères, mes sœurs,

A ma chère fille

A tous mes amis

A tous les enseignants du département de génie civil.

CHAI B Amína.

Résumé:

On appelle béton de fibres, un béton dans lequel on a incorporé une armature par inclusion directe de fibres, ces fibres sont assimilables à un granulats spécial de forme très allongée et de bonne résistance à la traction, susceptible d'améliorer légèrement la résistance à la traction du matériau et de ralentir la propagation des fissures. En agissant comme par effet de couture (coudre les fissures), les fibres améliorent ainsi le comportement post fissuration de la matrice en maintenant une forte portance pendant l'accroissement des déformations. Le but de ce travail est alors de démontrer l'efficacité de l'incorporation de ces fibres dans le béton, et de prouver l'amélioration de ses propriétés mécaniques en particulier sa ductilité, et son efficacité à retarder l'apparition des fissures, et donc de préserver la durabilité de la structure.

Table des matières

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

Introduction générale 01

Chapitre I: Généralités sur le béton et les fibres

I Généralités sur le béton et les fibres	02
I.1 Le béton	02
I.1.1 définitions	02
I.1.2 Composants du béton	02
I.1.2.1 Le ciment (le liant)	02
a- Les ciments Portland purs (CPA – CEM I)	02
b- Les ciments Portland composés (CPJ – CEM II/A ou B)	02
c- Les ciments de haut-fourneau (CHF – CEM III/A, B ou C)	03
d- Les ciments pouzzolaniques (CPZ – CEM IV/A ou B)	03
e- Les ciments au laitier et aux cendres (CLC – CEM V/A ou B)	03
I.1.2.2 Les granulats	03
a- Naturels	03
b- Artificiels	04
c- Recyclés	04
d- Classification des granulats	04
e- Connaissance du matériau	04
I.1.2.3 Les sables	05
a- Les sables naturels	05
b- Les sables artificiels	06
I.1.2.4 L'eau de gâchage	06
I.1.2.5 Les adjuvants	06
I.2 Les fibres	07
I.2.1 Béton fibré	07
I.2.2 Différentes natures de fibres	07
I.2.2.1 Fibres naturelle	07
I.2.2.2 Fibres minérales	08
I.2.3 Fibres organique	11
I.2.4. Fibres Métallique	11
I.2.5 Propriétés des fibres	13
I.2.5.1 La notion de fibres structurales	13
I.2.5.2 Le facteur d'élançement	14
I.2.5.3 La performance	14
I.2.5.4 La valeur de résistance résiduelle	14
I.2.5.5 La distribution des contraintes mécaniques	14
I.2.5.6 La résistance à l'abrasion	15
I.2.5.7 Les propriétés spécifiques à chaque type de fibres.	15

Chapitre II: Caractéristiques et essais sur les différentes composantes du béton

II Caractéristiques et essais sur les différentes composantes du béton	17
II.1 Ciments	17
II.1.1 Masse volumique absolue	17
II.1.1.1 Objectif de l'essai	17
II.1.1.2 Principe de l'essai: (avec le pycnomètre)	17
II.1.1.3 Équipement nécessaire	17
II.1.1.4 Conduite de l'essai: (Mode opératoire)	17
II.1.2 Mesure de la finesse	18
II.1.2.1 Objectif de l'essai	18
II.1.2.2 Principe de l'essai	18
II.1.2.3 Équipement nécessaire	18
II.1.2.4 Conduite de l'essai (Mode opératoire)	18
II.1.3 Mesure des temps de début et la fin de prise	20
II.1.3.1 Objectif de l'essai	20
II.1.3.2 Principe de l'essai	20
II.1.3.3 Equipement nécessaire	21
II.1.3.4 Conduite de l'essai	21
II.1.4 Mesure la consistance de la pâte	22
II.1.4.1 Objectif de l'essai	22
II.1.4.2 Principe de l'essai	23
II.1.4.3 Equipement nécessaire	23
II.1.4.4 Conduite de l'essai	23
II.2 Les granulats	25
II.2.1 Echantillonnage au laboratoire	25
II.2.1.1 Quartage	25
II.2.2 Analyse granulométrique par voie sèche (sur le sable)	25
II.2.2.1 But de l'essai	25
II.2.2.2 Principe de l'essai	25
II.2.2.3 Dimension de tamis utilisés	25
II.2.2.4 Matériel nécessaire	25
II.2.2.5 Conduite de l'essai	26
II.2.3 Mesure de la propriété des granulats	26
II.2.3.1 Calcul de la teneur en impuretés (NF P18 - 591)	26
II.2.4 Essai d'équivalent de sable : (NF P18-597)	27
II.2.4.1 Définition	27
II.2.4.2 Principe de l'essai	27
II.2.4.3 Equipements utilisés	27
II.2.4.4 Conduite de l'essai	28
II.2.5 Détermination de masses volumiques absolues et apparentes des granulats	31
II.2.5.1 Masses volumiques	31
II.2.5.2 Détermination de la masse volumique apparente	31
II.2.5.3 Détermination de la masse volumique absolue	31
II.2.6 Teneur en eau des granulats	31
II.2.6.1 But de l'essai	31
II.2.6.2 Principe de l'essai	31
II.2.6.3 Matériels utilisés	31
II.2.6.4 Mesures et résultats	31

II.2.7	Mesure du Coefficient d'aplatissement des granulats	32
II.2.7.1	But de l'essai	32
II.2.7.2	Matériel nécessaire	32
II.2.7.3	Forme d'un granulats et coefficient d'aplatissement	32
II.3	Les Mortiers	32
II.3.1	Définition du mortier normal	32
II.3.2	Mesure des résistances à la compression et à la traction	33
II.3.2.1	Objectif de l'essai	33
II.3.2.2	Principe de l'essai	33
II.3.2.3	Equipement nécessaire	33
II.3.2.4	Conduite de l'essai	33
II.3.3	Mesure du retrait sur éprouvettes de mortier	34
II.3.3.1	Objectif de l'essai	34
II.3.3.2	Principe de l'essai	34
II.3.3.3	Equipement nécessaire	36
II.3.3.4	Conduite de l'essai	36
II.3.4	Mesure du temps de prise sur mortier	36

Chapitre III: Essais sur le béton

III.1	Essais sur le béton	37
III.1.1	L'essai sur béton témoin	37
III.2	Essais sur béton durci	37
III.2.1	Essai de compression	37
III.2.2	Essai de traction (Essai brésilien)	37
III.3	Essai d'élément sur table-Flow test (ISO 9812)	37
III.3.1	Principe de l'essai	38
III.3.2	Matériel nécessaire et principe de l'essai	38
III.3.3	Conduite de l'essai	38
III.3.4	Classe d'étalement sur table	39
III.4	Essai Vébé (ISO 4110)	39
III.4.1	Principe de l'essai	39
III.4.2	Matériel nécessaire	39
III.4.3	Conduite de l'essai	40
III.4.4	Classe de consistance Vébé	40
III.5	Essais de consistance	41
III.5.1	Maniabilité des bétons	41
III.5.2	Objectif des essais de consistance	41
III.6	Essai d'affaissement au cône d'Abrams slump test (NF P 18-451)	41
III.6.1	Principe de l'essai	41
III.6.2	Matériel nécessaire	41
III.6.3	Conduite de l'essai	42
III.6.4	Classe d'affaissement	42
III.6.5	Limites d'information de l'essai d'affaissement	43
III.7	Essai de compactage (ISO 4111)	44
III.7.1	Principe de l'essai	44
III.7.2	Matériel nécessaire	44
III.7.3	Conduite de l'essai	44
III.7.4	Classe de compactage	45
III.8	Résistance	45
III.8.1	Confection des éprouvettes	45
III.8.1.1	Dimension des moules (NFP 18-400)	45

III.8.1.2 Essai d'information (NF P 18-405)	45
III.8.2 Essais de compression (NF P 18-406)	46
III.8.2.1 Objectif de l'essai	46
III.8.2.2 Principe de l'essai	46
III.8.2.3 Equipement nécessaire	46
III.8.2.4 Rectification des extrémités des éprouvettes	46
III.8.2.5 Conduite de l'essai de rupture	47
III.8.2.6 Particularités de la rupture en compression	48
III.9 Mesure la résistance à la traction (NF P 18-408)	49
III.9.1 Objectif de l'essai	49
III.9.2 Principe de l'essai	49
III.9.3 Equipement nécessaire	49

Chapitre IV: Résultats et interprétation

IV.1 Béton fibré	51
IV.2 Essai sur le béton fibré	51
IV.2.1 Essai de compression	51
IV.3 Résistance en traction par flexion	52
IV.4 La valeur de résistance résiduelle	52
IV.5 Avantages du béton fibré	53
a - Aspect technique	54
b - Aspect économique	54
Conclusion Générale	55

Annexe

Références bibliographiques

Liste des figures

Chapitre I

Figure 1.1 : Rôle des fibres dans la matrice de béton .

Figure 1.2 : Vue microscopique de fibres d'amiante.

Figure 1.3 : Fibre de verre.

Figure 1.4 : fibres polypropylène.

Figure 1.5 : Fibres de carbone.

Figure 1.6 : Fibres métalliques.

Figure 1.7 : Géométrie des fibres métalliques.

Figure 1.8 : Essais de l'ASTM C 1018.

Chapitre II

Figure 2.1 : Principe de fonctionnement du perméabilimètre de Blaine

Figure 2.2: Appareil de vicat muni de l'aiguille amovible

Figure 2.3 : Appareil de vicat de la sonde de consistance

Figure 2.4 : Tamiseuse électrique

Figure 2.5 : Définition de l'équivalent de sable

Figure 2.6 : Tamis à fentes

Figure 2.7 : Moules pour moulage des éprouvettes de mortier

Figure 2.8 : Appareillage pour la mesure du retrait

Figure 2.9 : Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge

Chapitre III

Figure 3.1: L'affaissement d'un béton témoin.

Figure 3.2 : Essai d'étalement sur table.

Figure 3.3 : Essai de Vébé.

Figure 3.4 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.

Figure 3.5 : Classes de consistance mesurée au cône d'Abrams.

Figure 3.6 : Exemple d'un même affaissement ne signifiant pas la même maniabilité.

Figure 3.7 : Mesure du degré de compactage.

Figure 3.8 : Principe du surfaçage au soufre.

Figure 3.9 : Exemple de dispositif de centrage de l'éprouvette sur la presse.

Figure 3.10 : Mode de rupture des éprouvettes cylindriques en compression.

Figure 3.11 : Dispositif pour l'essai de rupture par fondage.

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau 2.1 : mesure des temps du début et la fin de prise

Tableau 2.2 : mesure de la consistance de la pâte

Tableau 2.3 : les limites de temps des autres âges.

Chapitre II

Tableau 3.1 : Classe d'étalement sur table.

Tableau 3.2 : Classe de consistance Vébé.

Tableau 3.3 : Classes de compactage.

Tableau 3.4 : Le format et la dimension des moules Mise.

Liste des symboles

C : Degré Celsius.

E : Module du Young.

UHM : Ultra haut module.

HM : Haut module.

THR : Très hautes résistante.

VHS : Very high strength.

PA : Polyamide.

Mpa : Méga Pascal.

ASTM : American Society For Testing Material.

BFM : Béton de fibres métalliques.

CEM : Ciment Portland.

CPJ-CEM II : Ciment Portland composé.

PM : Ciments Portland pour travaux à la mer.

HTS : Haute teneur en sulfate.

E/C : Rapport eau sur ciment.

Introduction Générale

Introduction générale

Le béton reste un matériau moderne, par ses nombreuses qualités il présente une excellente résistance à la compression, une grande rigidité, une faible conductivité thermique et électrique, mais sa faible résistance en traction, sa fragilité et son aptitude à la microfissuration limite son utilisation et fait qu'il doit être renforcé dans la majorité de ces applications.

L'intérêt de renforcement de béton par des fibres est d'améliorer le comportement vis à vis à la traction. L'intérêt des fibres est d'agir comme des armatures à l'intérieur du béton, permettant de répartir la fissuration.

Elles sont plus efficaces que les armatures traditionnelles vis-à-vis des fissures « de service », de faibles ouvertures, mais ne permettent pas de reprendre en ultime des efforts aussi importants que les armatures.

Leur efficacité est également d'autant plus grande que l'épaisseur de la structure est plus faible. En effet, les structures les moins épaisses tendent à présenter des fissures plus fines et plus réparties que les structures de grande hauteur. Pour la même raison, l'efficacité des fibres est d'autant plus grande que la structure est plus hyperstatique. L'amélioration de la résistance du béton renforcé par des fibres métalliques permet non seulement d'améliorer le comportement en flexion et en traction, mais également la résistance à la compression du béton.

L'introduction des fibres est un moyen d'améliorer certaines propriétés du béton y compris la résistance à l'abrasion. Les fibres métalliques ont pour rôles d'absorber et dissiper l'énergie, réduire l'initiation et la propagation des fissures, augmenter la durabilité du béton soumis à l'abrasion et ralentir la dégradation.

Parmi les paramètres qui influents sur les performances mécaniques d'un béton fibré est la distribution des fibres et leur orientation.

Ce paramètre est lié directement à l'état d'ouvrabilité de béton, donc il serait plus judicieux de comparer les différents dosages en fibre avec la même maniabilité (même plasticité)

C'est dans cette optique que s'insère notre travail qu'on a dressé en deux parties.

La première partie fera l'objet d'une revue de la documentation scientifique offrant une présentation générale concernant le béton renforcé de fibres métalliques, sa composition, sa formulation et ses différents comportements à l'état frais et à l'état durci.

La deuxième partie est consacrée à la partie expérimentale dans laquelle on a fait des expériences sur le béton ordinaire et le béton fibré ; des essais de compression, et traction par flexion sur des éprouvettes du béton et leurs résistances pour sortir d'une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur le béton et les fibres

Chapitre I : Généralités sur le béton et les fibres

I.1. Le béton

I.1.1 définitions :

Le béton est un matériau composite formé par le mélange de liant (ciment), des granulats (graviers, sable), de l'eau et éventuellement des ajouts (retardateur ou accélérateur de prise, plastifiant, entraîneur d'air ...). Du fait de son hétérogénéité, il est nécessaire de comprendre le rôle des différents éléments qui constituent ainsi que leur comportement. Le béton est un matériau facile à mouler quelles que soient les formes de l'ouvrage, à l'épreuve du temps, économique, nécessitant peu d'entretien.

I.1.2 Composants du béton

I.1.2.1 Le ciment (le liant)

le ciment est un liant hydraulique c'est - à - dire un matériau minéral finement moulu s'hydratant en présence d'eau .il forme une pate qui fait prise et durcit progressivement à l'air et dans l'eau .après durcissement , il peut conserver sa résistance et sa stabilité même sous l'eau c'est le constituant fondamental du béton car il assure la cohésion des différents composants .

Le ciment utilisé est généralement de classe portland, avec ou sans constituants secondaires. La qualité du ciment est par indication de sa résistance à la compression à 28jours sur mortier normal, est exprimée en Kgf/cm ou en MPA, cette résistance est appelée « résistance vraie du ciment » le ciment portland a été découvert au xx émet siècle et est issu d'un mélange de clinker et de sulfate de calcium dans un rapport d'environ 5 à 95%

Les principaux composants du ciment portland sont les suivants :

- 60 à 65% -**C3S** = $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ -silicate tricalcique ($\text{Ca}_3 [\text{SiO}_4]$ O-alite)
- 20 à 25% -**C2S**= $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ -silicate bicalcique ($\beta \text{Ca}_2[\text{SiO}_4]$ - bélite)
- 8 à 12% -**C3A**= $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ -aluminat tricalcique ($\text{C}_3 [\text{Al}_2\text{O}_4]$ - célit)
- 8 à 10% -**C4AF**= $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ -alumino-ferrite tétracalcique

a- **Les ciments Portland purs (CPA – CEM I)**, qui contient au moins 95 % de clinker. Le pourcentage restant est appelé constituant secondaire.

b- **Les ciments Portland composés (CPJ – CEM II/A ou B)**, dont la teneur en addition minérale est de 6 à 20 % pour la sous-catégorie A, et de 21 à 35 % pour la sous-catégorie B.

c- **Les ciments de haut-fourneau (CHF – CEM III/A, B ou C)**, dont la teneur en laitier respective est comprise dans les intervalles suivants: [36, 65 %], [66, 80 %], [81, 95 %].

d- **Les ciments pouzzolaniques (CPZ – CEM IV/A ou B)**, qui contiennent des pouzzolanes à hauteur de 10 à 35 % pour la catégorie A, et 36 à 55 % pour la catégorie B.

e- **Les ciments au laitier et aux cendres (CLC – CEM V/A ou B)**, comprenant un mélange des deux types d'additions dans des proportions de 18 à 30 %, ou de 31 à 50 %, respectivement.

Ces différents ciments sont caractérisés par les différents éléments qui entrent dans leur composition.

- **Choix des ciments :**

la gamme des ciments courant permet de choisir un ciment en fonction de la résistance visée pour le béton, de l'environnement de l'ouvrage, de la saison de la construction, ainsi que du type d'ouvrage à construire.

- **Dosage de ciment :**

le dosage en ciment des ouvrage varie en général de 200 à 300 Kg par m³ de béton en œuvre pour le non armé et de 300 à 400 kg/ m³ pour le béton armé ; un dosage de 350 kg/ m³ est considéré comme un minimum pour les ouvrage en béton précontraint

En fait, pour des limites de 200 à 500 kg/ m³, les résistances sont sensiblement proportionnelles aux dosages.

- **Caractéristiques des liants :**

Les caractéristiques des liants sont :

- La vitesse de prise.
- La résistance mécanique.
- L'indice d'hydraulicité.

- **Rôles des liants dans la construction:**

Ils assurent la cohésion des éléments de maçonnerie en les reliant entre eux d'où la nécessité de réaliser une pâte plastique et pouvant durcir à l'air ou sous l'eau, ce qui implique :

un second rôle : le liant devra assurer la prise et le durcissement du mortier.

En outre, dans le béton le liant participe au bouchage des vides, c'est-à-dire à l'accroissement de compacité.

I.1.2.2 Les granulats

Les granulats sont des matériaux inertes, sable, gravier ou cailloux qui constituent le squelette du béton et représentent environ 60-80% du volume du béton .les granulats sont d'origines diverses et peuvent être :

- **Naturels** (origine minéral sans transformation autre que mécanique),

- **Artificiels** (origine minérale et transformés, exemple du schiste expansé),
- **Recyclés** (exemple du béton concassé).

Pour le type de granulats on distingue :

Le granulat dit « **Roulé** » obtenu par criblage et lavage des matériaux alluvionnaires généralement de forme arrondie.

Le granulat dit « **concassé** » obtenu par concassage de roches éruptives ou sédimentaires ; généralement de forme plus ou moins anguleuse .

Le granulat dit « **mixte** » comporte à la fois des éléments roulés et concassés.

En général les granulats utilisés pour la fabrication du béton sont des granulats naturels ces granulats proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires ,de roches métamorphiques (quartz)ou de roches éruptives (basalte,granite).au contact avec la pâte de ciment on peut distinguer des granulats réactifs et des granulats neutres .

Les granulats réactifs (calcaires) présentent de fortes liaisons avec la pâte de ciment du fait des réactions chimiques qui se produisent au cours du temps .en ce qui concerne les granulats neutres (siliceux) ,ils ne réagissent pas avec la pâte de ciment et présentent de faibles liaisons .

L'origine minéralogique ,la forme et la granulométrie sont des paramètres très importants dans le choix des granulats pour la confection d'un béton .

Le sable est un constituant important .il est très abondant comme dépôt de surface, le long des cours d'eau , sur les rives des lacs et des mers et dans les régions arides

Le sable doit être sain, siliceux, silico-calcaire ou même calcaire à condition que les grains ne soient pas faibles il doit être propre ,c'est -à-dire dépourvu d'impuretés susceptibles de compromettre la qualité du mortier en œuvre (argile ,vase ,terre végétal , plâtre ,sels minéraux

Il est préférable d'utiliser des sables roulés de rivière les sable de carrière conviennent s'ils ne renferment pas d'impuretés nocives les sables de mer doivent être lavés (sinon ils sèchent mal et peuvent donner lieu à des efflorescences en raison des sels qu'ils contiennent)

- **Classification des granulats :**

Les granulats sont répertoriés selon leurs tailles,

- les fillers ou fines (diamètre $D < 2\text{mm}$ et $70\% < 0,063\text{mm}$),
- les sablons qui constituent les granulats les plus fins ($D < 1\text{mm}$ et $70\% < 0,063\text{mm}$),
- les sables ($1\text{mm} < D < 6,3\text{mm}$),
- les gravillons qui constituent les granulats les plus gros ($1\text{mm} < D < 125\text{mm}$).

Avec ; D: dimension supérieure du granulat.

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine soit : naturelle, artificielle ou recyclée.

- **Connaissance du matériau :**

Le béton renforcé de fibres métalliques (BRFM) est un matériau composite dont les propriétés mécaniques résultent de la combinaison des propriétés du béton, des fibres et de l'interface entre les matériaux.

L'ajout de fibres dans le béton modifie ses propriétés. Largement utilisées pour assurer la pérennité des ouvrages, certaines sont capables de couvrir les microfissures. Une pièce en béton armé renforcée à l'aide d'une couche en béton de fibres permettrait d'augmenter la résistance au feu (par limitation des ouvertures des fissures et aussi protègent les armatures traditionnelles). Il existe maintenant trois gammes de fibres utilisées pour des applications très différentes : métalliques, macro fibres synthétiques et microfibres polypropylènes

I.1.2.3 Les sables

Les sables utilisés pour le béton sont soit d'origine naturelle, soit artificielles.

a- Les sables naturels :

- Sable de mer :

Ce sable est généralement, pur est excellent s'il n'est pas trop fin, le sable de mer, que l'on trouve à l'embouchure des rivières est en générale inutilisable car il est souvent mélangé avec la vase. Toutefois, le sable de mer est chargé en sel; ceci est sans inconvénient pour tous les travaux à la mer et les fondations, mais il faut prendre des précautions pour les ouvrages en élévation, car les murs auraient tendance à rester humides. Si l'on est obligé d'utiliser le sable de mer dans ce cas, il est nécessaire de le laver au préalable à l'eau douce et purifié

- Sable d'oued ou de rivière :

Il est extrait par curage du lit des cours d'eau, on choisit pour effectuer ces curages, les endroits donnant des matériaux siliceux. Toutefois, certaines régions, le sable de rivière est schisteux et donne de moins de bons résultats, surtout si le schiste est tendre car il a en outre, tendance à se transformer en argile. En fin, le sable de rivière gypseux est à éliminer.

- Sable de dune :

C'est une variété de sable de mer. Ce sable est de qualité très médiocre pour la construction, car il est constitué d'éléments très réguliers et très fins.

- Sable de carrière :

Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains de sable et les empêchent d'adhérer au liants, il est donc à utiliser avec précaution. Les sables quartzes sans matières terreuses ou argileuses, sont excellents pour les maçonneries.

b- Les sables artificiels :

Il provient, soit de transformation thermique des roches (après cuisson), minerais et déchets, soit de la démolition d'ouvrages divers. On les obtient par broyage de roches dures (calcaires durs, grés, quartzites, laves). Ces matériaux sont intéressants, tant pour la confection de béton, que pour la confection de matériaux enrobés pour chaussés.

Il convient toutefois de maîtriser le pourcentage de fines. Parmi les variétés des sables artificiels, on distingue :

- Le sable de tuiles ou de briques :

On fabrique un excellent sable, a propriétés pouzzolaniques, en broyant des déchets de briques ou de tuiles.

- Le sable de laitier de haut fourneau concassé :

Certains granulats artificiels ont des qualités remarquables de résistance et de granulométrie, c'est le cas de ce sable, très utilisé dans les régions de l'est de France, également dans le reste du pays pour la confection d'assises de chaussée stabilisées.

I.1.2.4 L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage est un ingrédient essentiel du béton et joue deux fonctions principales confère au béton sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation des grains de ciment. La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le rapport eau/ciment a une forte influence sur la porosité, la perméabilité, la résistance mécanique, la durabilité, la microstructure du béton et la cinétique d'hydratation du ciment.

L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux exigences de la norme **NF EN 1008**, les autres eaux comme l'eau récupérée de la fabrication de bétons, eaux d'origine souterraine, eaux naturelles de surface et eaux de rejet industriel, eaux de mer et eaux saumâtres, doivent être soumises à des essais de contrôle préliminaires

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

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

de l'eau de mer).

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

I.1.2.5 Les adjuvants:

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ 3% à 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants:

- Les plastifiants (réducteurs d'eau);
- Les entraîneurs d'air;
- Les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs);
- Les hydrofuges

I.2 Les fibres

I.2.1 Béton fibré :

Le béton renforcé de fibres métalliques (BRFM) est un matériau composite dont les propriétés mécaniques résultent de la combinaison des propriétés du béton, des fibres et de l'interface entre les matériaux.

L'ajout de fibres dans le béton modifie ses propriétés. Largement utilisées pour assurer la pérennité des ouvrages, certaines sont capables de couvrir les microfissures. Une pièce en béton armé renforcée à l'aide d'une couche en béton de fibres permettrait d'augmenter la résistance au feu (par limitation des ouvertures des fissures et aussi protègent les armatures traditionnelles). Il existe maintenant trois gammes de fibres utilisées pour des applications très différentes : métalliques, macro fibres synthétiques et microfibres polypropylènes

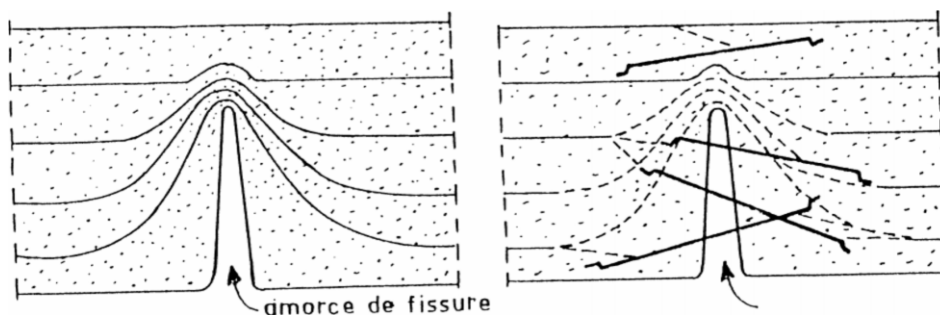


Figure 1.1 : Rôle des fibres dans la matrice de béton.

I.2.2 Différentes natures de fibres

Les fibres sont classées selon leur origine (naturelle, synthétique ou artificielle), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc), leur dimension (macro ou microfibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Les principales fibres utilisées sont :

1.2.2.1 Fibres naturelle :

- Fibres végétales :

La principale fibre végétale est la cellulose qui résiste aux alcalis. Les fibres végétales résistent aussi à la plupart des acides organiques mais sont détruites par les acides minéraux forts. Il existe quatre sortes de fibres végétales : les fibres provenant des poils, les fibres du liber, et les fibres

extraites des troncs de certaines graminées. Elles sont souvent utilisées dans la fabrication du papier et dans les panneaux de construction (fibres de bois).

- Fibres animale :

Les fibres animales sont composées principalement de protéines. La kératine constitue les poils (dont les laines en tout genre) et les plumes. La soie est une sécrétion de fibroïne produite par le ver à soie, chenille d'un papillon du genre bombyx et les araignées. La laine et les plumes sont des très bons isolants pour la construction.

I.2.2.2 Fibres minérales :

- Fibres d'amiante :

Ces fibres sont considérées comme les renforcements les plus anciens des matrices cimentaires et aussi pour la confection de tissus résistants aux feux.

Elles sont en fait, des bûchettes de micro- fibres extrêmement fines, difficilement fusibles (vers 1500°C) et ont l'avantage d'être inattaquables par les ciments. Elles possèdent une excellente tenue au feu, une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité élevé. Elles sont aussi plus résistantes aux agressions chimiques et aux microorganismes, ainsi que leur résistance électrique élevée. Les fibres d'amiante sont utilisées dans les applications suivantes : voiles, tuyaux, panneaux, matériaux d'isolation thermique et protection contre le feu, tuyaux d'égout, plaques de toitures plates et ondulées, revêtements de mur



Figure 1.2 : Vue microscopique de fibres d'amiante

- Fibres de verre :

Ces fibres sont fabriquées à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet Joule, qui comporte 50 à 800 trous d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100µm. Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à la demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12, et 50 mm de long. Ils sont regroupés en trois types : La fibre de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et la fibre de verre au borosilicate. Ces fibres sont généralement caractérisées par les propriétés suivantes :

Bonne adhérence avec la matrice ;

- Disponibilité sous toutes les formes (coupées, continues ...) ;
- Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion ;
- Conductivité thermique relativement faible



Figure 1.3 : Fibre de verre

- **Fibre polypropylène:**

Les fibres de polypropylène sont fabriquées depuis 1954 . L'ajout de fibres au mortier ou au béton remonte industriellement à 1960 et ce n'est qu'à partir de 1967 qu'apparaissent des réalisations intéressantes notamment en Grande Bretagne (Panneaux de façade de 33 mm d'épaisseur du Londonderry House à Park-Lane à Londres). Les premiers fils étaient de sections circulaires et lisses.

Le polypropylène appartient à la famille de polyoléfine des produits chimiques. les fibres sont hydrophobes, qui n'absorbent pas l'eau, et non corrosives. D'ailleurs, les fibres de polypropylène ont les excellentes résistances contre des alcalis, les produits chimiques et le chlorure, et une basse conductivité thermique. Par ces caractéristiques les fibres de polypropylène n'ont donc aucun effet significatif sur la demande de l'eau du béton frais. Les caractéristiques principales de ces fils de polypropylène sont les suivantes:

- Diamètre de 0.01 à 0.2 mm.
- Longueur : 25 à 75 mm.
- Masse volumique : 0.9 Kg/dm³.
- Résistance en traction : 400 à 8000 Mpa.
- Module d'élasticité : 4000 à 8000 Mpa.
- Coefficient de dilatation thermique : 90 $\mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$

Les propriétés rhéologiques du béton frais renforcé par des fibres sont dues à la fois à la présence des fibres de polypropylène , très élastiques empêchant le béton frais de se déformer, et à celle de l'air occlus apportant une sorte de thixotropie. Ce béton conserve ainsi à l'état frais les empreintes faites en surface sans affaissement, ni ressuage. Nous pouvons le travailler afin d'obtenir des reliefs très variés soit manuellement, soit à l'aide de machine adaptées. Le type de fibres à utiliser dépend essentiellement de la dimension des granulats, les fibres les plus courtes étant choisies pour des micros-béton, les plus longues pour ceux dont le « D » le diamètre

est important. C'est ainsi que certains fabricants préconisent des fibres de 20 mm pour des bétons dont la dimension des granulats n'excède pas 15 mm, celles de 50 mm étant réservées à des bétons pour lesquels « D » est compris entre 30 et 40 mm.

On utilise ces type de fibres dans :

- Les pieux de fondation.
- Les pieux précontraints.
- Les panneaux de revêtement.
- Les éléments flottants de débarcadères et amarres pour les marines.
- Les matériaux de réparation des routes, couches de lest pour les tuyaux sousmarins.



Figure 1.4 fibres polypropylène

- **Fibres de carbone :**

Le carbone est très dispendieux ce qui le rend beaucoup moins populaire que le verre moins disponible sur le marché, les fibres de carbone sont cependant reconnues comme étant les fibres les plus performantes.

Les types de fibres de carbone sont classés selon leurs propriétés mécaniques.

Ces propriétés dépendent des cycles de pyrolyse ainsi que de la nature du précurseur.

On distingue deux types de fibres divisés en quatre grandes classes de fibres.

- les types hauts modules soient les classes UHM (Ultra Haut Module) et HM (Haut Module),
- les types hautes résistances soient les classes l THR ou VHS (Très haute résistance ou Very High Strength) et HR ou HS (Haute Résistance ou High Strength).

Les fibres de carbone sont très fragiles ce qui rend l'opération de malaxage du béton de ces fibres très difficile. Pour cela, elles sont ajoutées par la suite au béton par projection. Par

ailleurs, le béton de ces fibres présente des caractéristiques de durabilité très intéressantes .

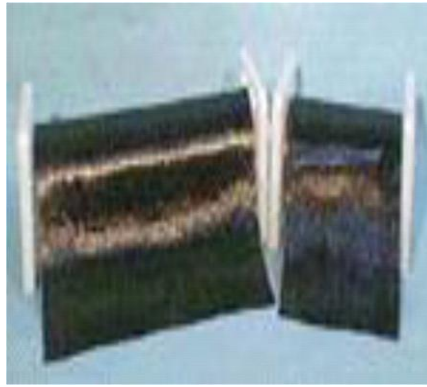


Figure 1.5 : Fibres de carbone

I.2.3 Fibres organique :

Les fibres de polymères sont d'origine plastique, on distingue trois familles principales de ces fibres à savoir

- Le polyamide , qui représente la famille la plus importante des plastiques par leur tonnage. Le PA résiste mal aux acides minéraux.
- Le polychlorure de vinyle (PVC), est une matière thermoplastique obtenue par polymérisation du chlorure de vinyle. Le PVC résiste bien aux acides et aux alcalis.
- Le polypropylène (PP), est un thermoplastique formé de chaîne linéaire constitué de motifs propylènes dans le cas d'un homopolymère et d'une altération contrôlée de motifs propylène et éthylène dans les copolymères. Le PP résiste bien aux alcalis et aux acides.

Le module de Young de ces fibres est de même ordre de grandeur que celui du béton.

L'adhérence fibre-béton est généralement faible, du fait qu'il n'y a aucune liaison chimique possible entre les fibres et la matrice, ce qui limite la reprise des efforts par les fibres à l'interface fibre-matrice après la fissuration de la matrice.

Par contre, il faut noter l'excellente résistance de ces fibres (PVC, PP) vis-à-vis aux acides, aux sels et alcalins du béton.

De ce fait, de récentes études menées sur des bétons renforcés par ce type de fibres ont montrés que ce matériau composite présentait des propriétés mécaniques comparables à celle d'un béton renforcé par des fibres de verre .

I.2.4. Fibres Métallique :

Ce type de fibres, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été et reste encore l'objet de recherches très importantes dans le monde.

Dans la présente étude, nous nous sommes intéressé à la fibre métallique (acier), vue les caractéristiques (forme, élancement, caractéristiques physicochimique... etc.) qu'elles présentent.

L'ajout des fibres au béton, apporte une certaine ductilité ; pour une longueur de fibres égale à 30 mm et un pourcentage en fibres de 1%, le résultat est meilleur avec les fibres en copeaux.

Cependant, en ce qui concerne l'énergie de rupture, elle est plus importante dans le cas des éprouvettes armées de fibres Dramix (pour $L_f=50\text{mm}$). Ceci peut s'expliquer par le fait que ces fibres présentent un système d'ancrage, elles sont munies de crochets aux extrémités. L'adhérence fibres-matrice (béton) est ainsi meilleure.

Il existe sur le marché, une panoplie de fibres métalliques d'acier, voici quelques types de fibres :

- fibres ondulées - crantées - torsadées-droites ;
- fils, rubans ;
- fibres à extrémités aplaties, à crochets, à têtes coniques, etc



Figure 1.6 : Fibres métalliques

- Les Fibres d'acier

Les fibres d'acier restent parmi les fibres les plus utilisées dans le renforcement des bétons ou mortiers. En effet, ces fibres présentent une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité très élevé

Parmi les fibres d'acier les plus utilisées nous citons :

- Les Fibres Euro-Steel

Ce sont des fibres ondulées en acier à haute résistance, tréfilé, dur, à teneur en carbone inférieure à 0.15%. La contrainte limite de rupture en traction est de 1400 MPa

- Les Fibres Bekaert de Chez Dramix

Ces fibres en acier tréfilé sont fabriquées par Bekaert. Elles se présentent sous forme de plaquettes collées, ce qui facilite leur introduction dans le béton et évitent la formation d'oursins. En effet, la colle se dissout facilement dans l'eau de gâchage.

Les fibres les plus courtes sont actuellement utilisées en béton projeté. Elles ont une résistance à la traction minimale de 1100 MPa. Leur diamètre varie de 0.4 à 0.8 mm et leur longueur de 25 à 60 mm.

- Les Fibres Harex

La fibre Harex est obtenue par fraisage. Les copeaux, produits légèrement enroulés sur eux-mêmes, possèdent une résistance à la traction d'environ 700 MPa .

- **Les fibres Ruban en Fonte Amorphe de Pont-à-Mousson**

Ces fibres sont développées par SEVA (Pont à-Mousson), sont des rubans de fonte amorphe obtenue par refroidissement brutal. Cette trempe crée une structure vitreuse qui est en partie à l'origine de sa résistance à la corrosion.

Les longueurs commercialisées de ces fibres sont de 15, 30, 45 et 60 mm.

Une de leurs caractéristiques importantes est leur grande résistance à la corrosion. La résistance à la traction de ces rubans est d'environ 200 MPa.

- **Les Fibres à Tête d'encrage en Acier Trfile**

Ces fibres sont développées par EURO-STEEL, elles se distinguent par leur capacité à développer très tôt un bon ancrage, donc à limiter la chute d'effort post- fissuration.

L'angle d'inclinaison des têtes a été choisi pour permettre un confinement du béton

- **Les Fibres de Beki -Shield**

Ce sont des fibres métalliques spéciales, fabriquées et commercialisées sous le nom de Beki Shield, présentent des caractéristiques intéressantes, elles sont très minces et moins abrasives, moins irritantes au toucher que les fibres de verre.

Ces fibres sont fabriquées à partir d'un acier inoxydable qui offre de très grande résistance à la corrosion.

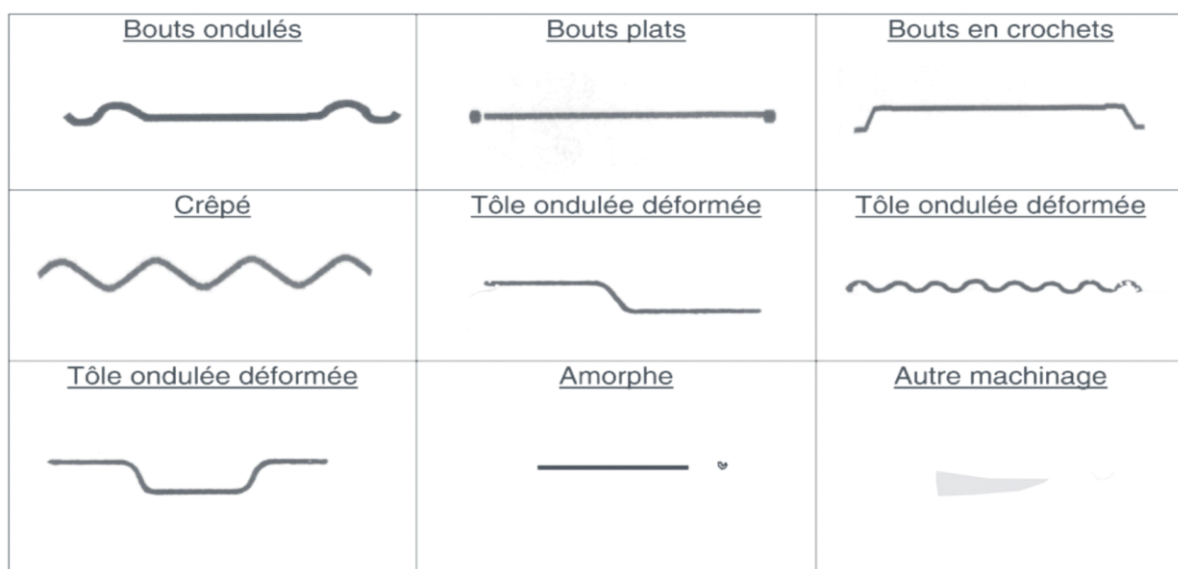


Figure 1.7 : Géométrie des fibres métalliques

I.2.5 Propriétés des fibres

I.2.5.1 La notion de fibres structurales

La notion de fibres structurales n'est applicable qu'à certains types de fibres métalliques pour lesquelles les résistances résiduelles s'apparentent à l'action structurale des armatures

traditionnelles. Il est important de réaliser que le terme « fibre structurale » est inapplicable à la plupart des types de fibres.

Il est à noter que les applications de dalles sur sol ne sont pas considérées comme étant structurales. Les fibres métalliques et les macrofibres synthétiques peuvent être utilisées en concentration nécessaire pour satisfaire aux spécifications du devis.

I.2.5.2 Le facteur d'élanement

Le facteur d'élanement est défini par un ratio géométrique. Le facteur d'élanement est donc le ratio qui représente le rapport de la longueur sur le diamètre équivalent de la fibre. Le tableau 4-2 indique des valeurs de ratio pour certains types de fibres.

Le lien entre la matrice du béton et la fibre augmente proportionnellement avec le facteur d'élanement. Par contre, les fibres avec un facteur d'élanement supérieur à 60 et dotées d'une géométrie particulière sont potentiellement susceptibles de former des « oursins »

I.2.5.3 La performance

La performance des fibres est directement reliée à la valeur de résistance résiduelle qu'il est possible d'obtenir pour une formulation donnée d'un béton. La performance des fibres est évaluée selon différentes normes japonaises et américaines

I.2.5.4 La valeur de résistance résiduelle

Les fibres dans le béton apportent une meilleure résistance aux déformations en flexion des ouvrages de béton soumis à des charges. C'est lorsque apparaît la première fissure que les fibres sont sollicitées et qu'il est possible de déterminer une valeur de résistance résiduelle.

Effectivement, les fibres apportent une meilleure cohésion et résistance intrinsèque de la matrice et augmentent ainsi la résistance à la propagation et à l'augmentation de la fissuration.

Les fibres permettent une reprise de charge en post-fissuration.

Il existe trois méthodes d'essais de référence qui donnent des valeurs différentes pour la détermination de la résistance résiduelle :

- ASTM C1018: détermine le facteur de résistance résiduelle;
- ASTM C1399: détermine la résistance résiduelle moyenne;
- JCI SF-4 : détermine la résistance résiduelle équivalente.

L'essai JCI SF-4 est le plus utilisé pour les méthodes de conception [18].

I.2.5.5 La distribution des contraintes mécaniques

Un des principaux avantages de l'ajout des fibres est le meilleur contrôle de la postfissuration du béton. Les fibres ont la particularité d'absorber l'énergie de fissuration et de redistribuer les contraintes mécaniques dans la matrice du béton.

La répartition des fibres dans la masse du béton permet de différer la rupture fragile

du béton en s'opposant à la propagation des microfissures (figure 1.7). Selon les fibres utilisées et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations en post-fissuration relatives à :

- la résistance à la traction;
- la résistance aux impacts;
- la résistance à la fatigue;
- la résistance à l'abrasion;
- la réduction des fissures de retrait.

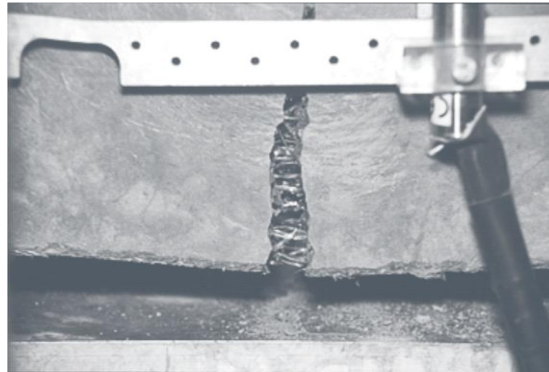


Figure 1.8 Essais de l'ASTM C 1018

1.2.5.6 La résistance à l'abrasion

L'essai de résistance à l'abrasion s'effectue selon les normes ASTM C 418 et C 779.

Un article de la revue « Concrete Technology Today » de l'Association Canadienne du Ciment explique la résistance à l'abrasion de la manière suivante :

Les informations sur la résistance à l'abrasion du béton fibré sont rares et conflictuelles. Selon les valeurs disponibles, lorsque l'érosion est provoquée par la cavitation et par l'action abrasive d'un fort débit d'eau ou à l'impact de larges débris, c'est alors que le béton fibré améliore la résistance à l'abrasion. Par contre, pour une érosion de basse vitesse, c'est plutôt la propriété de la matrice et des granulats que celle de l'utilisation de fibres qui détermine la résistance à l'abrasion.

De la même façon, c'est également la propriété de la matrice qui détermine la résistance à l'usure pour le pavage et les dalles sur sol.

1.2.5.7 Les propriétés spécifiques à chaque type de fibres

Les fibres ont un rôle qui se traduit par des résultats variables, donc des applications différentes en fonction de leur nature. Pour apprécier l'apport des fibres au béton et leur influence sur ses lois de comportement, il importe de connaître leurs caractéristiques, aussi bien géométriques que mécaniques.

Selon leur type, les fibres métalliques, synthétiques ou naturelles ont une influence différente sur les propriétés du béton durci.

Le type de liant utilisé dans le béton, la géométrie et la composition des fibres, ainsi que leur orientation, leur distribution et leur densité à travers le béton, sont des facteurs qui influencent les propriétés du béton frais et durci

Chapitre II

Caractéristiques et essais sur les différentes composantes du béton

Chapitre II : Caractéristiques et essais sur les différentes composantes du béton**II-1 Ciments****II-1-1 Masse volumique absolue****II-1-1-1 Objectif de l'essai**

Il s'agit de mesurer la masse volumique absolue du ciment anhydre qui varie en fonction de la composition du ciment, tout en restant comprise entre 3,0 et 3,2 g/cm³.

II-1-1-2 Principe de l'essai: (avec le pycnomètre)

On repère en comparant la masse (m_c) d'un volume connu de ciment (V_c) à la masse (m_t) d'un même volume d'un liquide dont la masse volumique (ρ_t) est connue. La masse (ρ_c) s'en déduit en écrivant:

$$\rho_c = \rho_t \frac{m_c}{m_t}$$

II-1-1-3 Équipement nécessaire

- Un volumétre d'une contenance minimale de 50 cm³.
- Un récipient contenant de l'eau à 20 ± 1 °C.
- Un liquide qui ne doit pas être réactif avec le ciment, du toluène par exemple (le tétrachlorure, le benzène, cancérigène, le pétrole, ne doit plus être utilisé).
- Une balance. La précision de la balance devra être adaptée à la masse de l'échantillon utilisé.
- Un thermomètre, précis à 0,1 °C, permettant de connaître la température du laboratoire.

II-1-1-4 Conduite de l'essai: (Mode opératoire).

Remplir l'appareil de tétrachlorure de carbone jusqu'à ce que le niveau parvienne entre les divisions zéro et 1. Éviter de mouiller les parois lors du remplissage. Immerger le volumétre dans un récipient contenant de l'eau à 20 ± 1 °C. Pendant l'équilibrage de température, peser une masse de ciment de 64 g à 0,1 g près.

Repérer exactement le niveau atteint N_0 .

Verser le ciment très lentement (en ¼ d'heure environ) dans l'appareil en prenant garde à ne pas laisser de dépôt sur les parois.

Déplacer le volumétre contenant le ciment, de récipient et le poser sur la table.

Boucher le volumétre, l'incliner à 45° par rapport à la table et le faire rouler avec un mouvement de va-et-vient de manière à faciliter le départ de l'air. Replacer l'appareil dans le bain et lire le niveau N_1 du liquide après équilibrage de température.

La masse volumique absolue est donnée par le

$$\rho_c = \frac{64}{N_1 - N_0} \cdot \text{g/cm}^3$$

II-1-2 Mesure de la finesse

II-1-2-1 Objectif de l'essai

Les ciments se présentent sous forme de poudre finement divisée. Cette finesse est une caractéristique importante: lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète.

La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface massique: c'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. La surface massique est généralement exprimée en cm^2 de surface des grains de ciment par gramme de poudre. L'objectif de l'essai est d'apprécier cette surface.

II-1-2-2 Principe de l'essai

L'essai a pour but de calculer le débit d'air susceptible de passer à travers la poudre.

La surface massique du ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment référence dont la surface massique est connue. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment. Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps t mis par l'air pour traverser la poudre est long. Dans les conditions normalisées décrites, la surface est proportionnelle à

II-1-2-3 Équipement nécessaire

Un appareil appelé «Perméabilimètre de Blaine». Il se compose pour l'essentiel d'une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester et d'un manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur d'une huile légère. La cellule est équipée d'une grille en sa partie inférieure. Un piston sert à tasser le ciment dans la cellule sous un volume V défini.

- Une balance précise à 0,001 g.
- Un chronomètre précis à 0,2 s près.
- Du ciment de référence de surface massique (S_0) et de masse volumique (ρ_0) connues.
- Des rondelles de papier filtre adaptées au diamètre de la cellule.
- Du mercure pour mesurer le volume V de la couche tassée.
- Un thermomètre précis à 0,1 °C près pour mesurer la température de l'air

II-1-2-4 Conduite de l'essai (Mode opératoire).

Le liant hydraulique dont on désire mesurer la surface spécifique doit être à porosité constante (égale à 0,500).

- Méthode : peser à 0,01 g près, une masse m de liant telle que, compte tenu de son volume V après tassement dans la cellule, sa porosité soit égale à 0,500.

La masse de matière à prendre s'écrit: $m = (1 - e) \rho V$ ρ - masse volumique V – volume utile de la cellule.

Placer la grille au fond de la cellule. Appliquer sur cette grille, au moyen d'une tige à face inférieure plane et d'une équerre, un disque neuf de papier filtre.

Verser le liant dans la cellule en utilisant un entonnoir.

Donner quelques légères secousses à la cellule pour niveler la couche supérieure du liant, puis placer sur celui-ci un autre disque neuf de papier filtre.

Tasser avec précaution au moyen du piston en évitant la remontée de la poudre au-dessus du papier filtre jusqu'à ce que le collier vienne buter contre le haut de la cellule.

Retirer le piston lentement (Il est commode de pratiquer une légère rotation alternative).

Vérifier le niveau du liquide du manomètre qui doit affleurer au trait inférieur. Enduire de vaseline la partie rondée de la cellule et la placer sur son ajustage en lui imprimant un léger mouvement de rotation pour répartir la vaseline; veiller au cours de cette opération à ne pas altérer le tassement de la couche.

Aspirer lentement au moyen de la poire l'air du tube jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le trait supérieur. Fermer le robinet. Mettre en marche un chronomètre sensible au cinquième de seconde quand le niveau de liquide atteint le deuxième trait.

L'arrêter quand le niveau de liquide atteint le troisième trait.

Noter le temps écoulé t ainsi que la température de la pièce.

Faire trois mesures et prendre la moyenne arithmétique des trois temps.

La surface spécifique est calculé par la formule:

$$S = k \frac{\sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho(1-e)\sqrt{\eta}}$$

S : Surface spécifique (cm^2/g). .

K : Constante de l'appareil. .

e : Porosité de la couche tassée .

t : Temps mesuré en secondes.

ρ : Masse volumique (g/cm^3).

H : Viscosité de l'air à la température d'essai (en poises).

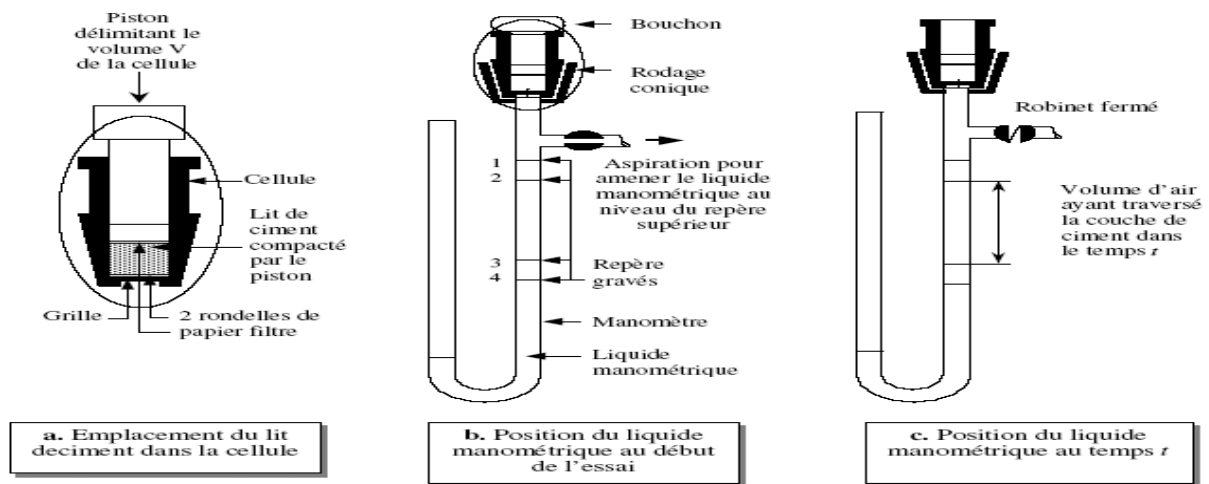


Figure 2.1 : Principe de fonctionnement du perméabilimètre de Blaine

II-1-3. Mesure des temps de début et la fin de prise :

II-1-3-1 Objectif de l'essai :

Il est nécessaire de connaître les début et fin de prise des pâtes de ciment (des liants hydrauliques) afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers et des bétons qui seront ensuite confectionnés.

Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui donne deux repères pratiques: Le début de prise et la fin de prise.

II-1-3-2-Principe de l'essai :

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée; l'appareil utilisé est appareil de VICAT équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre. Quand sous l'effet d'une charge de 300 g l'aiguille s'arrête à une distance d du fond du moule telle que $d = 4\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ on dit que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début du malaxage, est appelé « TEMPS DE DEBUT DE PRISE ». Le « TEMPS DE FIN DE PRISE » est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm.

II-1-3-3-Equipement nécessaire

- Salle climatisée: L'essai doit se dérouler dans une salle, dont la température est de $20^{\circ} C \pm 1^{\circ} C$ et dont l'humidité relative est supérieure à 90%. A défaut d'une telle humidité relative, l'échantillon testé pourra, entre deux mesures, être entreposé dans de l'eau maintenue à $20^{\circ} C \pm 1^{\circ} C$.
- Malaxeur normalisé: avec une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (dites lente 140 tr/mn et rapide 285 tr/mn).
- Appareil de VICAT (du nom de l'ingénieur français). L'appareil est composé d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre.
- Balance précise à 0,1 g près.
- Chronomètre précise à 0,1 s près.

II-1-3-4-Conduite de l'essai

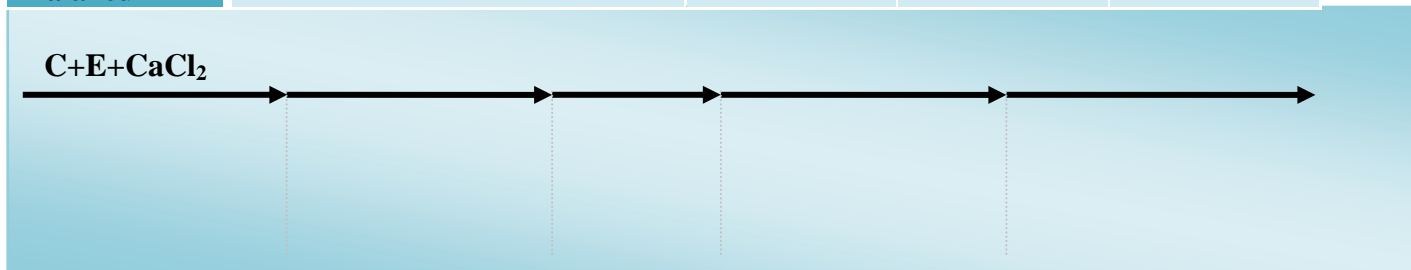
Le mode opératoire de l'essai est fixé par la norme EN 196-3. Il s'agit de confectionner une pâte de consistance normalisée:

On préparera 2 Kg de ciment, une pâte pure de rapport $E/C=0,26$. Ceci permettra de préparer 5 moules. Pour accélérer les phénomènes, on dissolva dans l'eau de gâchée du chlorure de calcium ($CaCl_2$) en prenant comme poids de $CaCl_2$, 2% du poids d'eau calculé pour la gâchée. On versera l'eau avec l'accélérateur de prise dissous dans la cuve du malaxeur, contenant le ciment, on déclenchera les deux chronomètres, (un pour la gâchée, un autre pour base du temps, pour la manipulation).

La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs. Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de vicat.

Tableau 2.1 : Tableau mesure des temps de début et la fin de prise

opérations	Introduction du ciment	Introduction de l'eau	Mettre en route	Mettre en route	Mettre en route
Durée des opérations		5 à 10 s	90 s	15 s	90 s
Etat de malaxeur	Arrête		Vitesse lente	Arrête	Vitesse lente



20 s (introduction) 90 s (vitesse lente) 15 s (raclage) 90 s (vitesse lente)
introduction la pâte dans le moule

et

mesure l'enfoncement

La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs. Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de vicat.

Quatre minutes après le début du malaxage, l'aiguille est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse). L'aiguille alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.

Recommencer l'opération à des intervalles de temps convenablement espacés ($\sim 10-15$ mn) jusqu'à ce que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$.

Cet instant mesuré à 5 mn près est le temps de début de prise pour le ciment concerné (étudié)

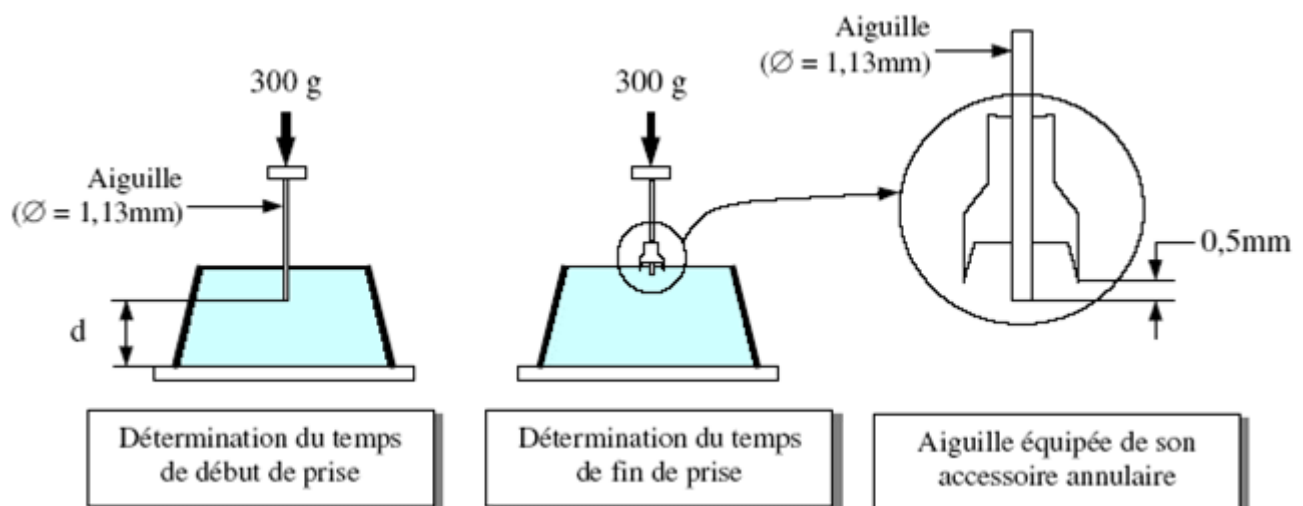


Figure 2.2: Appareil de vicat muni de l'aiguille amovible

II-1-3-Mesure la consistance de la pâte

II-1-4-1-Objectif de l'essai

La consistance de la pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité. Il y a deux types d'essai, qui permettent d'apprécier cette consistance. 1. L'essai de consistance effectué avec l'appareil de Vicat conformément à la norme 196-3. 2. L'essai d'écoulement au cône, conformément à la norme NF P-18-358. La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique, qui évolue au cours de temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres, il faut pouvoir partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées.

L'objectif de cet essai est de définir une telle consistance dite « CONSISTANCE NORMALISEE ».

II-1-4-2-Principe de l'essai

La consistance est évaluée ici en mesurant l'enfoncement dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide. La consistance évaluée de cette manière sera appelée « CONSISTANCE VICAT».

II-1-4-3-Equipement nécessaire

- Un malaxeur avec une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (dites lente 140 tr/mn et rapide 285 tr/mn).
- Un appareil de VICAT. L'appareil est composé d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde 10 mm de diamètre. La partie coulissante a une masse totale de 700 g (y compris la sonde amovible).
- Une balance permettant de peser à 1 g près.
- Une Chronomètre précis à 1 s près.

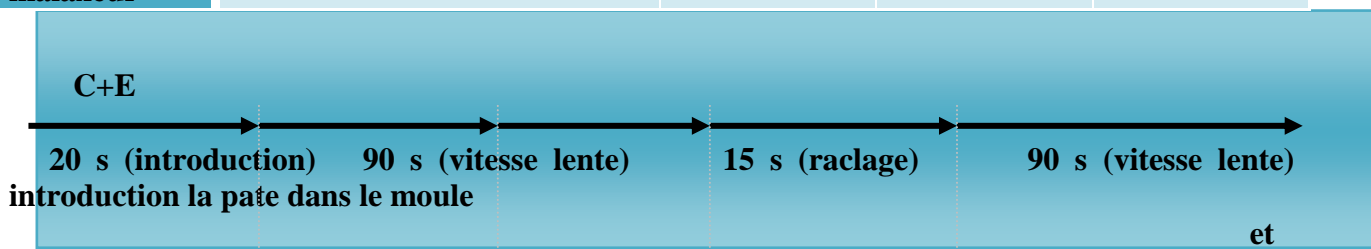
II-1-4-4-Conduite de l'essai

500 g de ciment sont pesés et introduits dans la cuve du malaxeur. La quantité d'eau choisie est ajoutée au ciment en un temps compris entre 5 et 10 secondes.

Mettre immédiatement le malaxeur en route à la vitesse lente pendant 90 s. Arrêter la machine pendant 15 s et ramener, dans la gâchée avec une petite truelle, la pâte adhérant à la cuve et se trouvant au delà de la zone de malaxage. Remettre la machine en route pour une durée de 90s à vitesse lente.

Tableau 2.2 : mesure de la consistance de la pâte

Opérations	Introduction du ciment	Introduction de l'eau	Mettre en route	Raclage de la cuve	Mettre en route
Durée des opérations		5 à 10 s	90 s	15 s	90 s
Etat de malaxeur	Arrête		Vitesse lente	Arrête	Vitesse lente



mesure l'enfoncement

La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs; Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de vicat.

Quatre minutes après le début du malaxage, la sonde est amenée à la surface supérieure de l'échantillon (moule tronconique) et relâchée sans élan. La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), on mesure la distance d séparant l'extrémité de la sonde et de la plaque de base.

Cette distance (d) caractérise la consistance de la pâte étudiée.

- Si (d) = $6\text{mm} \pm 1\text{mm}$, on dit que la consistance de la pâte étudiée est normalisée. (Consistance normalisée).
- Si (d) n'atteint pas cette valeur (c-a-d. $d > 7\text{ mm}$ ou $d < 5\text{mm}$), il convient de refaire l'essai avec une valeur différente du rapport E/C jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la consistance.

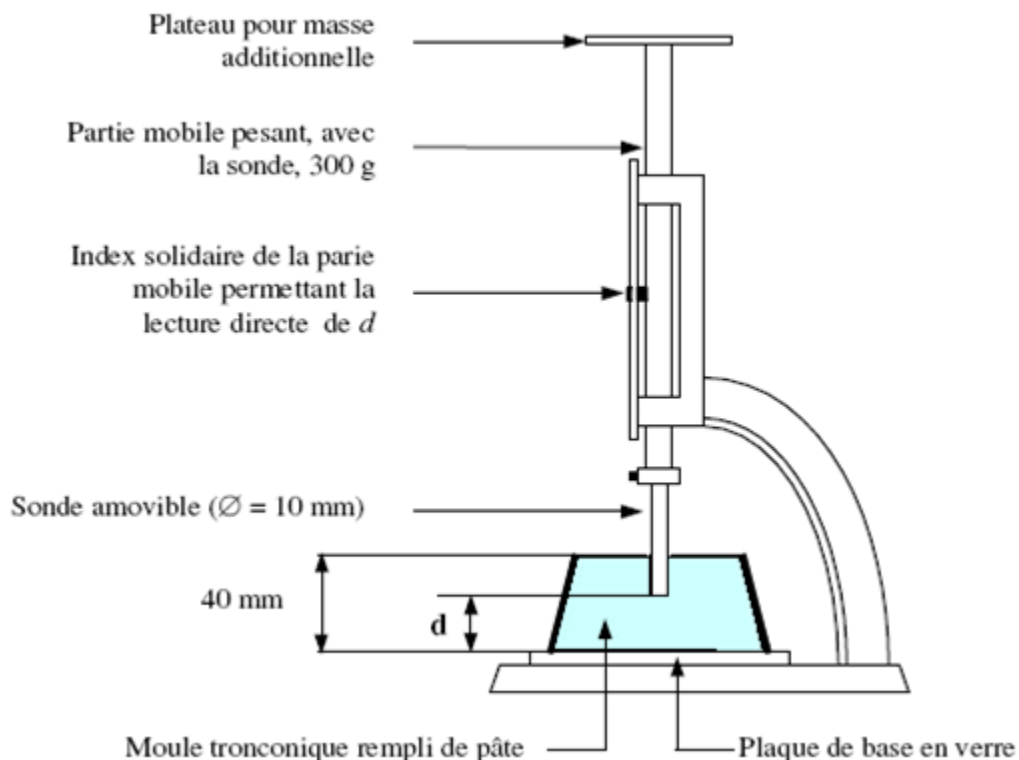


Figure 2.3 Appareil de vicat de la sonde de consistance

II-2- Les granulats :**II-2-1-Echantillonnage au laboratoire :**

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage.

II-2-1-1-Quartage :

L'échantillon est divisé en quatre parties égales, dont on ne retient que la moitié en réunissant deux parties opposées.

- Cette sélection est homogénéisée et un nouveau quartage est effectué, l'opération pouvant se répéter trois ou quatre fois. On obtient ainsi un échantillon représentatif du matériau initial.

II-2-2-Analyse granulométrique par voie sèche (sur le sable)**II-2-2-1- But de l'essai**

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers.

A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

II-2-2-2-Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les un sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

II-2-2-3- Dimension de tamis utilisés

Pour les sables, on utilisera en général les tamis de modules 20, 23, 26, 30, 35, 38. Pour les matériaux plus grossiers, tous les tamis au-delà du module 38 seront utilisés.

II-2-2-4-Matériel nécessaire

Des tamis dont les ouvertures carrées, de dimension normalisée, sont réalisés soit à partir d'un maillage métallique, soit par perçage d'une tôle. Les passoires, qui comportent des trous ronds percés dans une tôle, ne sont plus utilisées actuellement. Pour un travail d'essai aux résultats reproductibles, il est conseillé d'utiliser une machine à tamiser électrique qui comprime un mouvement vibratoire horizontal, ainsi que des secousses verticales, à la colonne de tamis.

La dimension nominale de tamis est donnée par l'ouverture de la maille, c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carrée. Ces dimensions sont telles qu'elles se suivent dans une progression géométrique de raison, depuis le tamis 0.08 mm jusqu'au tamis 80 mm. Pour des ouvertures

inférieures à 0.08 mm, l'analyse granulométrique n'est pas adaptée et l'on peut procéder par sédimentométrie. L'existence antérieure de passoirs (trous ronds) a conduit à une double classification de tamis et des passoirs, tout en conservant pour chaque famille d'appareil la même progression géométrique des ouvertures.



Figure 2.4 Tamiseuse électrique

II-2-2-5-Conduite de l'essai

Cet essai peut s'appliquer pour des granulats non souillés par une fraction argileuse significative. Il est alors impératif de prendre toutes les précautions nécessaires pour que les éléments fins, présents dans l'échantillon, ne soit pas perdus.

Pour les échantillons pollués par une fraction argileuse, il est nécessaire de procéder par voie humide. L'échantillon ainsi préparé est alors séché à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$. Après refroidissement il est pesé jusqu'à masse constante (masse M 2). Le tamisage à sec peut alors être réalisé.

II-2-3- Mesure de la propreté des granulats :

II-2-3-1- Calcul de la teneur en impuretés (NF P18 - 591)

a- Cas des graviers :

L'essai de propreté des graviers consiste à déterminer le pourcentage d'élément de taille inférieure à 0.5 mm. Le principe général consiste à faire débarrasser le gravier de cette classe fine uniquement par un lavage répété. La procédure à suivre est la suivante :

- On prend dans un récipient une certaine quantité représentative de matériau, on la dessèche à l'étuve à 105°C , et on pèse, soit un poids P1.
- On lave à grande eau (au jet), et on maintient cette opération jusqu'à ce que l'eau de lavage devienne totalement claire, on sèche de nouveau le gravier lavé et on pèse, soit un poids P2.

b-Expression des résultats :

Le pourcentage des impuretés se déduit de l'expression suivante :

Pourcentage d'impureté = $(P1/P2P2)$ %.

Ce pourcentage est limité selon la réglementation en vigueur à 2% pour les graviers concassés, on tolère exceptionnellement un pourcentage en fine de 5%.

II-2-4- Essai d'équivalent de sable : (NF P18-597)

La propreté des sables est déduite à partir de l'essai dit l'équivalent de sable (ES), ces essais permettent de mesurer la propreté de matériaux fins. Ils rendent compte de façon globale de la quantité d'éléments fins contenus dans le matériau sans aucune distinction de nature.

II-2-4-1 Définition :

L'équivalent de sable est un rapport conventionnel volumétrique entre les grains fins et les autres, il permet donc de caractériser l'importance des fines par une valeur numérique.

L'équivalent de sable indique le degré de pollution des éléments sableux des granulats. Parmi ses nombreux domaines d'application, les plus utilisés sont :

- Choix et contrôle des sols utilisables en stabilisation mécanique.
- Choix et contrôle des sables à béton.
- Choix et contrôle des granulats pour les enrobés hydrocarbonés les graves-ciment et les graves – laitier.

Actuellement, trois textes réglementaires décrivent cet essai :

- D'équivalent de sable (**NF P 18-598**).
- D'équivalent de sable à 10 % de fines (**NF P 18-597**).
- Evaluation des fines – équivalent de sable (**EN 933-8**).

II-2-4-2 Principe de l'essai :

-l'essai est effectué sur la fraction 0/3 mm du sable.

-l'essai consiste à plonger un échantillon de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution lavante : après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure les hauteurs suivantes :

- H1 : sable propre + élément fins.
- H2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est égale :

L'équivalent de sable virtuels (ESV) est défini par :

$$\text{ESV} (\%) = (H2/H1) \times 100.$$

L'équivalent de sable (ES) est défini par :

$$\text{ES} (\%) = (H2/H1) \times 100$$

II-2-4-3- Equipements utilisés :

Le matériel est décrit dans la norme (NFP 18-598).

On a :

- Eprouvette en plexiglas avec (2) trais repères, et un bouchons.
- Entonnoir pour introduire de sable.
- Bonbonne de 5 litres pour la solution lavante, le typhon et un tube souple de 1.50 m.
- Tube laveur métallique plongeant.
- Machine agitatrice (ou agitation manuelle).
- Règle métallique pour la mesure des hauteurs de sable et flocculat.
- Piston taré à masse coulissante de 1 Kg pour la mesure de ES.

Conduite de l'essai :

Le matériel et le sable lavé étant préparés, on effectuera les opérations suivantes :

- La solution lavante est placée dans la bonbonne de cinq litres située à un mètre au dessus du fond des éprouvettes, le dispositif siphonique est amorcé et il est relié au tube laveur.
- Pour l'étude, on utilisera deux éprouvettes propres et on fera la moyenne des deux résultats.
- Remplir les éprouvettes graduées d'eau.
- Verser la quantité de sable (environ 120 g), et laisser reposer pendant 10 minutes.
- Boucher les éprouvettes et les faire agiter 90 fois aller et retour dans le sens horizontal puis remplacer verticalement.
- Laver le sable avec une solution lavante, et laisser reposer l'ensemble pendant 20 mm.
- Mesurer la hauteur du sable propre (H_2') et la hauteur du sable propre + éléments fins (H_1).
- La mesure de (H_2'), n'est pas toujours aisée, ce qui conduit à faire la mesure la plus précise : [ES].
- Descendre lentement le piston dans l'éprouvette jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, l'immobiliser, mesurer (H_2).

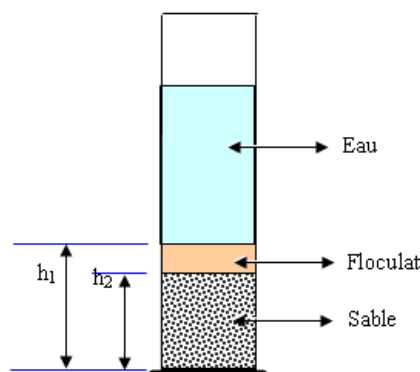


Figure 2.5 Définition de l'équivalent de sable

II-2-4- Détermination de masses volumiques absolues et apparentes des granulats : (NF P 18-555).**II-2-4-1- Masses volumiques :**

La masse volumique d'un corps se définit comme étant le rapport de la masse d'un volume donné. Comme on distingue volume absolue et volume apparent, il faut aussi distinguer de même masse volumique absolue et masse volumique apparente.

II-2-4-2- Détermination de la masse volumique apparente «pp» : (NF P 18-554).**a-Définition :**

On appelle masse volumique apparente, la masse de l'unité de volume du matériau en vrac, c'est-à-dire vides compris.

b-Principe de l'essai :

Il suffit de remplir un récipient, dont on connaît le volume, en prenant de grandes précautions pour éviter tous phénomènes parasites que pourrait provoquer le tassement ; en effet, un tassement trop important ou trop faible donnerait un résultat erroné. Pour limiter ce risque d'erreurs, l'essai se fera sur plusieurs pesées, avec lesquels on fera une moyenne, on pèse ensuite l'échantillon en ayant pris de déduire la masse du récipient.

En fin, la masse de l'échantillon est divisée par le volume du récipient.

c-Matériels utilisés :

- un récipient
- une balance
- une règle pour arasement du récipient

d-Conduit de la mesure :

La mesure consiste au remplissage d'un récipient de volume intérieur connu, et à la pesée du granulat correspondant. L'opération doit être menée comme suit :

1. Après étuvage de l'échantillon, et après quartage : le prendre entre deux mains formant un entonnoir.
2. Placer ces deux mains à 10 cm environ au dessus du récipient, laisser tomber le matériau, ni trop vite, ni trop lentement, en le disposant sans tassement par couche horizontales successives.
3. Verser ainsi le matériau, toujours au centre du récipient jusqu'à ce qu'il déborde tout autour en formant un cône.
4. Araser la couche supérieure du granulat à l'aide d'une réglette.
5. Peser le contenu, soit M' .

L'opération doit être effectuée trois fois pour chaque échantillon, on calcule alors la masse volumique apparente de l'échantillon

Telle que : $\rho_P = (M' - M) / V_r$

Avec :

M' : masse du récipient + échantillon

M : masse du récipient vide

V_r : volume du récipient

II-2-4-4- Détermination de la masse volumique absolue « ρ_s » NF P18 – 555 :

a-Définition :

La masse volumique absolue « ρ_s » est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Exprimée en t/m³, en kg/dm³ ou en g/cm³.

La masse volumique absolue a la même valeur que la densité d'un même matériau, la seule différence étant que la densité n'a pas d'unité.

b-Principe de l'essai :

En partant d'une masse de granulat, et en la plongeant dans un volume d'eau V_1 , on obtiendra sa masse volumique absolue par la division de cette masse par la différence des volumes : $V_2 - V_1$

$$\rho_s = P / (V_2 - V_1) \text{ en g /cm}^3$$

Avec :

ρ_s : masse volumique absolue.

p : masse du matériau étudié (échantillon sec)

V_1 : volume d'eau.

V_2 : volume d'eau après introduction des granulats.

c-Matériels utilisés :

-une éprouvette graduée,

-une balance.

Méthode de l'éprouvette graduée :

Cette méthode est très simple, très rapide, et elle utilise du matériel très courant de laboratoire.

Conduite de la mesure :

1-remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau.

1- Peser un échantillon sec de granulat de masse P (environ 300g), et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.

2- Le liquide monte dans l'éprouvette, lire le nouveau volume V_2 .

4-La masse volumique absolue est alors : $\rho_s = P / (V_2 - V_1)$ en g /cm³

Cet essai est effectué trois fois pour chaque échantillon, et on prendra la moyenne.

II-2-5-Teneur en eau des granulats :

Cette mesure est de grande importance lors de la confection d'un béton ; en effet si les granulats sont mouillés et en particulier le sable, la formulation de béton doit être modifiée pour tenir compte de cet apport d'eau et de manque de granulats.

II-2-5-1- But de l'essai :

Cet essai a pour but de déterminer la masse d'eau interstitielle (eau située entre les grains du granulat), contenue par le granulat par rapport au matériau sec, on appelle cette valeur w .

II-2-5-2- Principe de l'essai :

Après prélèvement d'une masse d'échantillon, celle-ci sera pesée tel que, ensuite elle sera séchée et repesée ; la différence entre la masse humide et la masse sèche, le tout sera multiplié par 100 pour obtenir un %.

II-2-5-3- Matériels utilisés :

- Un four.
- Deux coupelles.
- Une balance.

II-2-5-4- Mesures et résultats :

La méthode de mesure consiste à prélever une quantité donnée de granulats mouillés, de faire évaporer cette eau et de peser la quantité de granulats secs. La différence de ces deux pesés définit la quantité d'eau évaporée ; d'où la teneur en eau.

$W = \text{quantité d'eau} / \text{quantité de granulat sec} \%$

Le séchage peut s'effectuer par dessiccation à l'étuve entre 100 et 110°, et ce jusqu'à masse constant.

II-2-6- Mesure du Coefficient d'aplatissement des granulats**II-2-6-1- But de l'essai**

L'élaboration des bétons de ciment, ainsi que la réalisation des corps de chaussées et des couches de roulement, nécessitent de n'utiliser que des granulats ayant une forme assez ramassée, à l'exclusion des granulats plats. En effet, ceux-ci ne permettent pas de réaliser un béton très compact, et, par ailleurs, en technique routière, ils ne peuvent être utilisés car ils conduisent à des couches de roulement trop glissantes.

La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats.

II-2-6-2- Matériel nécessaire

Le coefficient d'aplatissement s'obtient en faisant une double analyse granulométrique, en utilisant successivement, et pour le même échantillon de granulat.

- Une série de tamis normalisés à mailles (Essai 3.1),
- Une série de tamis à fentes de largeurs normalisées



Figure 2.6 Tamis à fentes

II-2-6-3- Forme d'un granulats et coefficient d'aplatissement

La forme d'un granulats est définie par trois grandeurs géométriques :

- La longueur L, distance minimale de deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulats,
- L'épaisseur E, distance minimale de deux plans parallèles tangents au granulats,
- La grosseur G, dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulats. Le coefficient d'aplatissement A d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifient la relation :

$$\frac{G}{E} > 1,58$$

II-3-Les Mortiers

II-3-1- DEFINITION DU MORTIER NORMAL (EN 196-1)

Le mortier normal est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques d'un ciment et notamment sa résistance. Ce mortier est réalisé conformément à la norme (pour déterminer la consistance de la pâte de ciment).

Le sable utilisé est un sable appelé "sable normalisé CECN EN 196-1", lui-même étant défini par rapport à un "sable de référence CEN". Ce sable est commercialisé en sac plastique de 1350 + 5g.

La composition du mortier à tester est le suivant :

- Sable normalisé = 1350 g 65 g.
- Ciment = 450 g 6 2 g.

- Eau de gâchage = 225 g 6 1 g (le rapport de E/C est donc 0,50).

II-3-2- Mesure des résistances à la compression et à la traction (EN 196-1)

II-3-2-1- Objectif de l'essai

La résistance d'un mortier est directement dépendante du type de ciment donc, il s'agit de définir les qualités de résistance d'un ciment plutôt que d'un mortier.

II-3-2-2- Principe de l'essai

L'essai consiste à étudier les résistances à la traction et à la compression d'éprouvettes de mortier normal. Dans un tel mortier la seule variable est la nature de liant hydraulique; la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment.

II-3-2-3- Equipement nécessaire

L'ensemble est décrit de manière détaillée par la norme EN 196-1. Il est énuméré ci-dessous.

Une salle maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 50 %.

Une chambre ou une armoire humide maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative supérieure à 90 %.

Un malaxeur normalisé

Des moules normalisé permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ et de longueur 16cm (ces éprouvettes sont appelés "éprouvettes $4 \times 4 \times 16$ ").

Un appareil à chocs permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de $15\text{mm} \pm 0,3\text{mm}$ à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s.

Une machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10KN avec une vitesse de mise en charge de $50 \text{ N/s} \pm 10\text{N/s}$. La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion.

Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN (ou plus si les essais l'exigent) avec une vitesse de mise en charge de $2400 \text{ N/s} \pm 200 \text{ N/s}$. Cette machine est équipée d'un dispositif de compression tel que celui schématisé sur la figure.

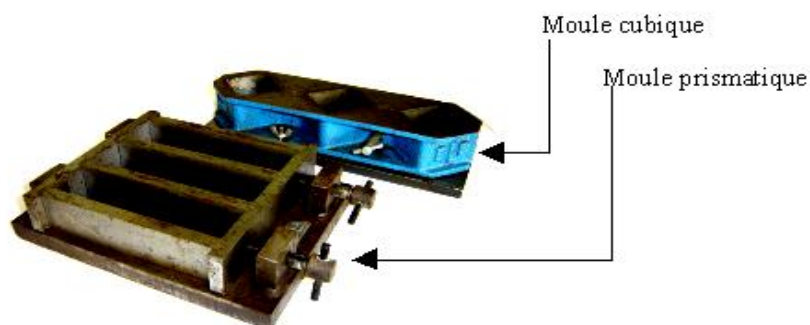


Figure2.7 : Moules pour moulage des éprouvettes de mortier

II-3-2-4- Conduite de l'essai

La norme EN 196-1 décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai.

Avec le mortier normal préparé comme indiqué (à la partie supérieure), on remplit un moule 4 x 4 x 16. Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. Après quoi le moule est arasé, recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans la salle ou l'armoire humide.

Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau à $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ jusqu'au moment de l'essai de rupture.

Au jour prévu, les 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression. Les normes ENV 197-1 et NFP 15-301 définissent les classes de résistance des ciments d'après leur résistance à 2 (ou 7 jours) et 28 jours. Ces âges sont donc impératifs pour vérifier la conformité d'un ciment. Si des essais sont réalisés à d'autres âges, ils devront être réalisés dans les limites de temps indiquées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2.3 : les limites de temps des autres âges.

Age	24h	48h	72h	7j	28j
Précision	$\pm 15\text{min}$	$\pm 30\text{min}$	$\pm 45\text{min}$	$\pm 2\text{h}$	$\pm 8\text{h}$

II -3-4- Mesure du retrait sur éprouvettes de mortier (NF P 15-433)

II-3-4-1- Objectif de l'essai

Il s'agit d'évaluer le retrait, ou le gonflement, que provoque le ciment étudié sur des éprouvettes de mortier normal.

II-3-4-2- Principe de l'essai

On compare, à différents temps t , la variation de longueur d'une éprouvette 4 x 4 x 16 cm, par rapport à sa longueur à un temps t_0 pris pour origine.

II-3-4-3- Equipement nécessaire

Il est décrit dans la norme NF P 15-433.

Une salle maintenue à une température de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à $50\% \pm 5\%$.

Eventuellement deux bains d'eau dont la température est maintenue à $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ et $5\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$.

Un malaxeur normalisé

Des moules équipés de plots de retrait en laiton. Les plots sont vissés au moule au moment de la mise en place du mortier puis désolidarisés du moule avant le démoulage. Après durcissement, les éprouvettes 4 x 4 x 16 sont donc munies à leurs deux extrémités de plots comme indiqué sur la figure .

Un déformètre (tel que celui schématisé sur la figure 5.5.8) équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures avec une exactitude inférieure ou égale à 0,005 mm. Une tige de 160 mm de longueur doit permettre de régler le zéro du déformètre. Cette tige est en Invar de façon à ce que les variations de température qu'elle peut connaître au cours de la manipulation n'entraînent pas de modification appréciable de sa longueur.

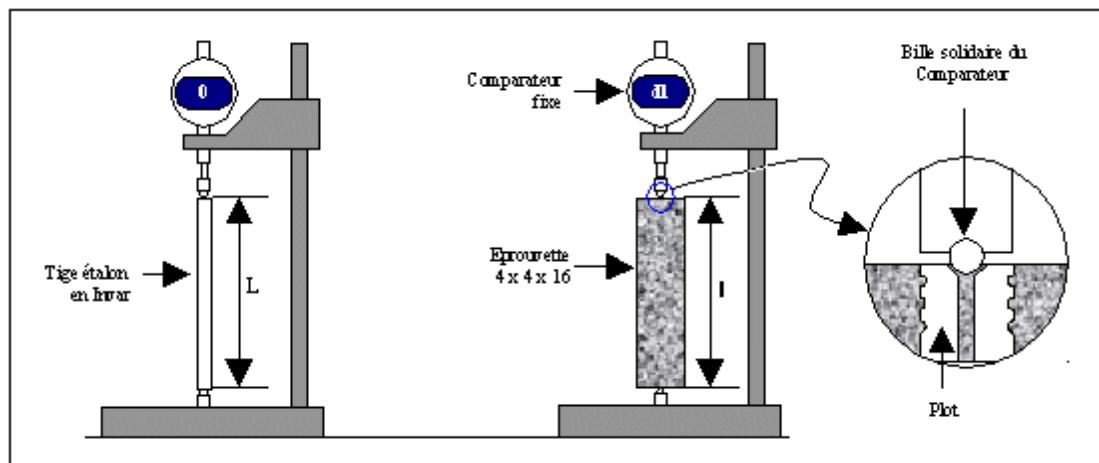


Figure 2.8 Appareillage pour la mesure du retrait

II-3-4-4- Conduite de l'essai

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur $L = 160$ mm. Soit $dl(t)$ la valeur lue sur le comparateur au temps t ; l'éprouvette a une longueur au temps considéré:

$$l = L + dl(t)$$

Soit $l(t_0)$ la longueur de l'éprouvette au temps t_0 choisi d'origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps t sera:

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0)$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par ε et a pour expression:

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L}$$

$\Delta l(t)$ est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air, $\Delta l(t)$ est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau, $\Delta l(t)$ peut être positif: il y a alors gonflement.

II -3-5- Mesure du temps de prise sur mortier (NF P 15-431 et NF 18-356)

Les essais de prise peuvent être effectués sur mortier. Lorsque l'essai a lieu sur mortier normal, il est gouverné par la norme NF P15-431. Lorsqu'il s'agit d'un adjuvant, l'essai obéit à la norme NF P18-356.

L'appareil utilisé est toujours l'appareil de Vicat, (Fig5.3.1), mais surchargé par une masse additionnelle de 700 g. $(300+700) = 1000\text{g}$. L'aiguille de 1,13mm de diamètre qui pénètre le mortier est alors soumise à une charge de 1000g. La procédure d'essai est la même que celle décrite où l'aiguille cesse de s'enfoncer sous l'effet de ce chargement et s'arrête à une distance d du fond du moule de 2,5mm.

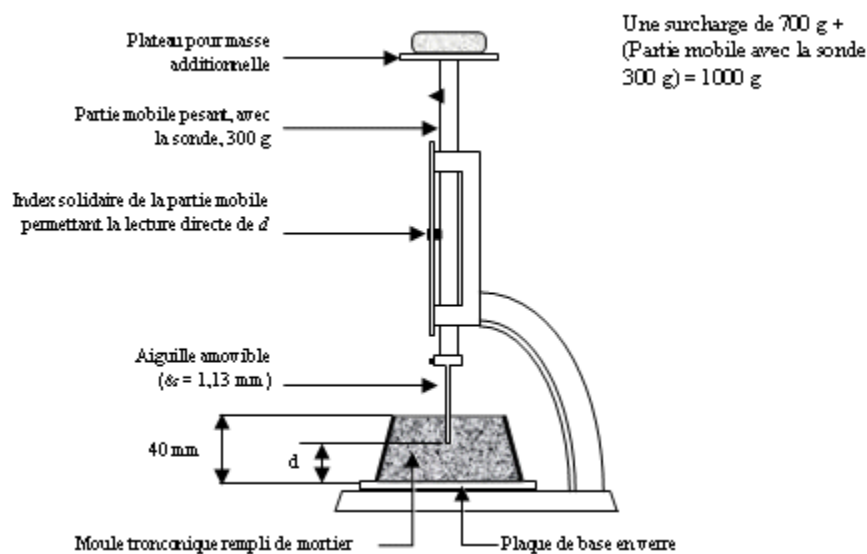


Figure 2.9 : Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge

Chapitre III

Essais sur le béton

Chapitre III : Essais sur le béton

III.1 Essais sur le béton frais

III.1.1 L'essai sur béton témoin:

On a effectué l'essai sur le béton témoin, et on a obtenu un affaissement de 13 cm



Figure 3.1 : L'affaissement d'un béton témoin.

On a effectué l'essai sur le béton fibré -Formulation 01-, et on a obtenu un affaissement de 12 cm.

Et sur le béton fibré -Formulation 02-, on a obtenu un affaissement de 11 cm.

- L'affaissement est entre 10 et 15 cm donc notre béton est très plastique.

III.2 ESSAIS SUR BETON DURCI

III .2.1 Essai de compression

Cet essai nous permis de déterminer la résistance à la compression du béton durci c'est-à-dire à 07 jours (grâce à l'utilisation d'un accélérateur de prise).

Le principe de cet essai est de chargé les éprouvettes jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression conforme à l'EN 12390-4. La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée.

III .2.2 Essai de traction (Essai brésilien):

On applique un effort le long des deux génératrices diamétralement opposées.

Norme : NF P 18-408.

Cet essai est réalisé sur une éprouvette cylindrique grâce à deux plateaux, La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en traction calculée.

III.3 Essai d'élément sur table-Flow test (ISO 9812)

Cet essai est particulièrement adapté au béton très fluide, fortement dosé en super plastifiant. Le diamètre du plus gros granulats ne doit pas dépasser 40 mm.

III.3.1 Principe de l'essai

La consistance est appréciée dans cet essai par l'étalement que connaît un cône de béton soumis à son propre poids et à une série de secousses. Plus l'étalement est grand et plus le béton est réputé fluide.

III.3.2 Matériel nécessaire et principe de l'essai

Le matériel nécessaire est décrit dans la norme ISO 9812 (norme expérimentale) et schématisé sur la figure 3.2 Il consiste en :

- un plateau carré de 70 cm de côté permettant d'imprimer des secousses au béton qui sera moulé dans son centre ; le plateau de bois est recouvert d'une feuille métallique de 2 mm d'épaisseur. Il est articulé sur un de ses côtés ;
- un moule tronconique de 20 cm de haut, de 20 cm de diamètre à sa base et de 13 cm à sa partie supérieure ;
- un pilon en bois de section carré 4 cm × 4 cm.

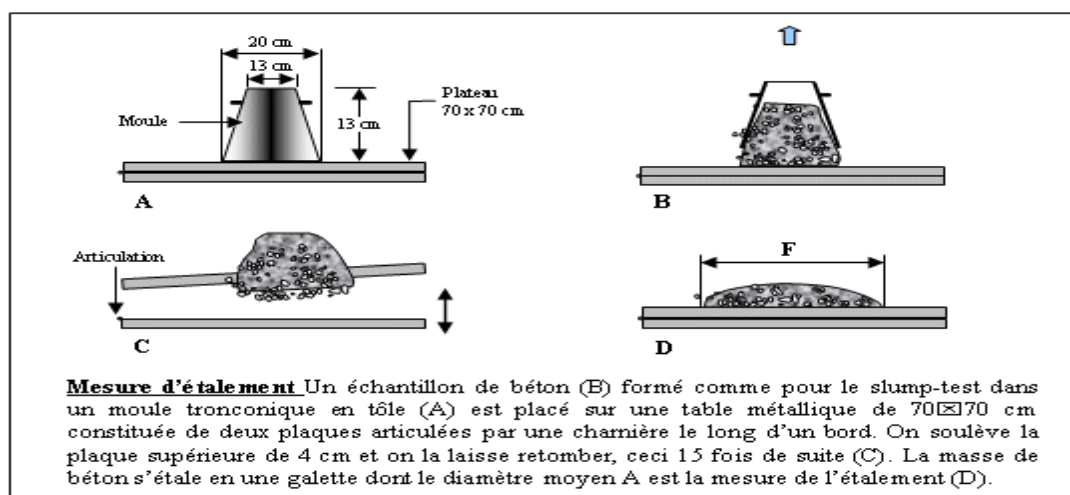


Figure 3.2 : Essai d'étalement sur table.

III.3.3 Conduite de l'essai

L'essai consiste à remplir avec le béton étudié le moule tronconique placé au centre du plateau carré. Le béton est mis en place en 2 couches et compacté par 10 coups au moyen du pilon. Après avoir arasé le béton avec une truelle, le moule est retiré verticalement. Le plateau est alors soulevé de 4 cm par un côté (le côté opposé étant maintenu par l'articulation) et relâché en chute libre 15 fois de suite en 30 secondes. Si le béton forme une galette approximativement circulaire et sans ségrégation, l'essai est valable.

La moyenne des mesures du diamètre de la galette dans deux directions parallèles au côté du plateau définit la consistance mesurée sur la table à secousse. Elle est arrondie au cm le plus proche.

III.3.4 Classe d'étalement sur table

La norme ENV 206 définit 4 classes d'étalement sur table :

Tableau 3.1 : Classe d'étalement sur table

Classe d'étalement	F1	F2	F3	F4
Diamètre en (cm)	≤34	35 à 41	42 à 48	49 à 60

III.4 Essai Vébé (ISO 4110)

Cet essai est particulièrement utile pour tester les bétons de faible ouvrabilité. La dimension maximale des granulats ne doit pas dépasser 40 mm.

III.4.1 Principe de l'essai

Dans cet essai, la consistance est définie par le temps que met un cône de béton à remplir un volume connu sous l'effet d'une vibration donnée. Plus ce temps est court et plus le béton sera considéré comme fluide.

III.4.2 Matériel nécessaire

L'appareillage est entièrement décrit dans la norme ISO 4110. Il est constitué d'un consistomètre schématisé sur la figure 3.3 et comportant les éléments suivants:

- un récipient cylindrique de 24 cm de diamètre et de 20 cm de hauteur;
- un cône d'Abrams;
- un disque horizontal transparent de 23 cm de diamètre;
- une table vibrante équipée d'un vibreur fonctionnant à la fréquence de 3000 vibrations par minute et conférant à la table des mouvements d'une amplitude verticale de ± 0.5 mm environ;
- une tige de piquage.

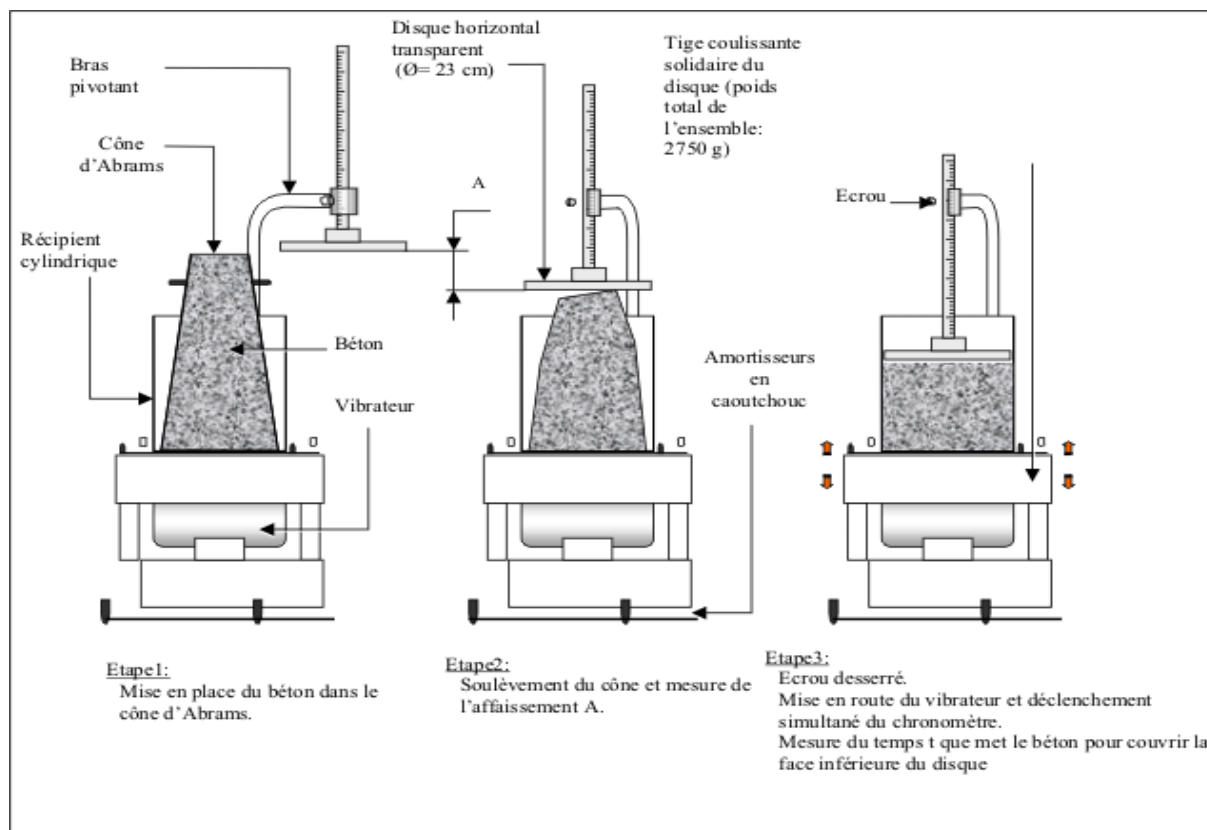


Figure3.3 : Essai de Vébé.

III.4.3 Conduite de l'essai

Le cône d'Abrams est fixé à l'intérieur du récipient cylindrique (cf. figure 6.8.1). Le béton est mis en place dans ce cône. Le cône d'Abrams est alors soulevé et, à ce stade de l'essai, il est donc possible de mesurer l'affaissement au cône comme indiqué précédemment. L'essai se poursuit ensuite par la mise en vibration de la table durant un temps t tel que la face supérieure du béton soit entièrement aplanie et au contact du disque transparent qui accompagne la descente du béton pendant le compactage.

III.4.4 Classe de consistance Vébé

Le temps t exprimé en secondes définit la consistance Vébé. 5 classes de consistance Vébé sont définies par la norme ENV 206 en fonction du temps t:

Tableau 3.2 : Classe de consistance Vébé

Classe vébé	V0	V1	V2	V3	V4
Temps à l'essai vébé	≥ 31 s	30 s à 21 s	20 s à 11 s	10 s à 5 s	≤ 4 s

III.5 Essais de consistance

III.5.1 Maniabilité des bétons

Avant d'être un matériau présentant les qualités mécaniques d'un solide, le béton a été mis en place dans des coffrages. Cette opération doit pouvoir se faire avec le maximum de facilité.

D'abord, pour raccourcir le temps de travail nécessaire à la mise en place; ensuite, pour éviter de découvrir au moment du coffrage, des désordres difficilement réparables voire irréparables, conséquences de la faible maniabilité du matériau. On dira qu'un béton est d'autant plus maniable (ou ouvrable) qu'il est d'autant plus aisé à mettre en place dans les coffrages.

III.5.2 Objectif des essais de consistance

Le problème est de quantifier cette maniabilité (ou cette ouvrabilité) qui est une qualité, évolutive dans le temps, du béton avant prise. C'est le but des essais de consistance qui classent les bétons suivant une échelle de fluidité croissante: ferme, plastique, fluide. Ces essais sont très divers. Nous ne décrirons ici que ceux qui sont les plus utilisés.

Quatre des essais décrits ci-dessous sont cités par la norme ENV 206 qui définit pour chacun d'eux des classes de consistance numérotée de 0 ou 1 jusqu'à 4 (du béton le plus ferme au plus fluide). Les classes de consistance ne sont pas directement liées entre elles (la classe S3 de l'essai d'affaissement n'est pas forcément équivalente à la classe V3 de l'essai Vébé).

III.6 Essai d'affaissement au cône d'Abrams slump test (NF P 18-451)

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40 mm.

III.6.1 Principe de l'essai

Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids. Plus cet affaissement sera grand et plus le béton sera réputé fluide.

III.6.2 Matériel nécessaire

L'appareillage est complètement décrit dans la norme NF P 18-451 et est schématisé sur la figure 3.4 ; il se compose de 4 éléments:

- un moule tronconique sans fond de 30 cm de haut, de 20 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10 cm de diamètre en sa partie supérieure;
- une plaque d'appui
- une tige de piquage
- un portique de mesure.

III.6.3 Conduite de l'essai

La plaque d'appui est légèrement humidifiée et le moule légèrement huilé y est fixé. Le béton est introduit dans le moule en 3 couches d'égales hauteurs qui seront mises en place au moyen de la tige de piquage actionnée 25 fois par couche (la tige doit pénétrer la couche immédiatement inférieure). Après avoir arasé en roulant la tige de piquage sur le bord supérieure du moule, le démoulage s'opère en soulevant le moule avec précaution. Le béton n'étant plus maintenu s'affaisse plus ou moins suivant sa consistance. Celle-ci est caractérisée par cet affaissement, noté A, mesuré grâce au portique et arrondi au centimètre le plus proche. La mesure doit être effectuée sur le point le plus haut du béton et dans la minute qui suit le démoulage

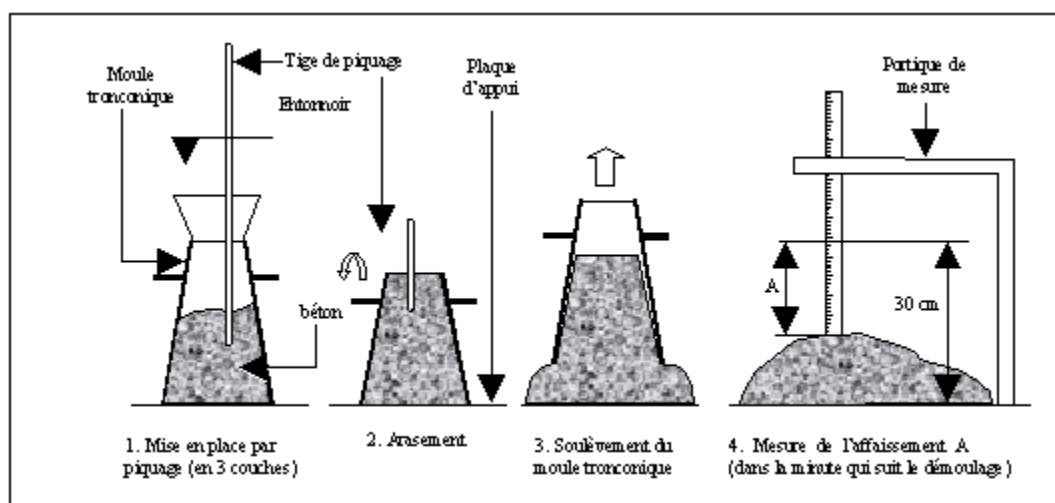


Figure 3.4 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.

III.6.4 Classe d'affaissement

La norme ENV 206 définit 4 classes de consistance, en fonction de l'affaissement mesuré. Elles sont indiquées sur la figure 6.7.2. Sur cette figure, les rectangles blancs représentent la variation possible d'affaissement correspondant à la classe considérée. Les classes sont notées S1, S2, S3, S4, et appelée classes d'affaissement. S rappelle ici l'initiale du nom de l'essai en anglais: slump test. La norme NF P 18 – 305 définit les mêmes classes d'affaissement, mais les note F, P, TP et FI (Ferme, Plastique, Très Plastique et Fluide).

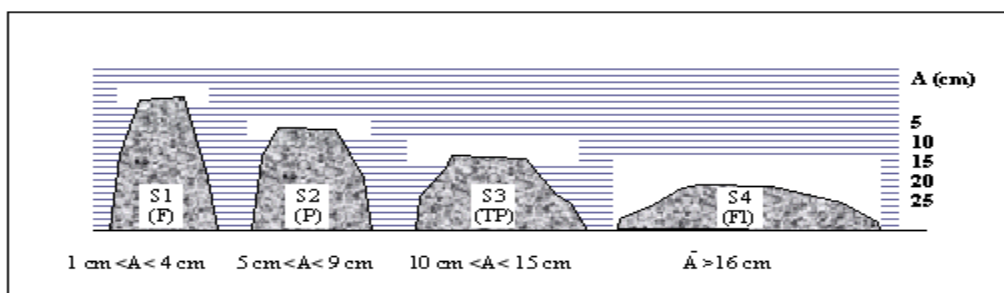


Figure 3.5 : Classes de consistance mesurée au cône d'Abrams.

III.6.5 Limites d'information de l'essai d'affaissement

Grâce aux super plastifiants, on peut réaliser aujourd'hui des bétons très fluides dont l'affaissement au cône dépasse les 25 cm. Le cône ne permet pas de caractériser de manière satisfaisante de telle consistance. Dans ce cas, il serait préférable d'utiliser l'essai d'étalement sur table.

D'autre part, l'affaissement ne dit pas tout. Supposons deux bétons dont la fluidité serait obtenue pour le premier par un dosage en eau important et pour le second par un dosage élevé de superplastifiant. Ces deux bétons peuvent présenter un même affaissement de 25 cm au cône comme représenté sur la figure 3.6 ; mais le premier présentera une forte ségrégabilité, alors que le second, grâce à son faible dosage en eau, gardera sa cohésion tout en ayant une grande fluidité. On pourra dire de ce béton qu'il présente une très bonne maniabilité; ce qui ne sera pas le cas du premier qui ne pourra pas être mis en place correctement.

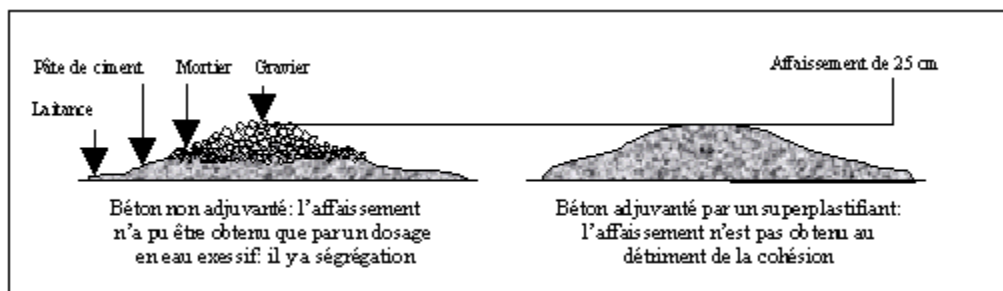


Figure 3.6 : Exemple d'un même affaissement ne signifiant pas la même maniabilité

D'une manière générale, il paraît difficile d'obtenir un affaissement supérieur de 15 cm avec des bétons non adjuvantés sans rencontrer des problèmes de ségrégation.

D'autre part, il n'est pas possible d'attribuer le même comportement à un béton non adjuvanté présentant un affaissement au cône de 10 cm et un béton très dosé en superplastifiant présentant un affaissement équivalent. Le premier béton sera facile à mettre en place, on dira qu'il est maniable, alors que le béton adjuvanté sera très visqueux et d'un maniement difficile. C'est pourquoi, pour des bétons très fortement dosés en superplastifiant, il paraît souhaitable de travailler avec des affaissement au moins égaux à 15 cm.

De tout cela il ressort que la consistance mesurée par l'essai d'affaissement au cône ne suffit pas pour caractériser la maniabilité d'un béton et qu'il faut toujours préciser la manière dont cet affaissement a été obtenu: notamment le dosage superplastifiant.

III.7 Essai de compactage (ISO 4111)

Dans cet essai, la dimension maximale des granulats ne doit pas dépasser 40 mm.

III.7.1 Principe de l'essai

La consistance est appréciée ici par le rapport entre un volume donné de béton avant compactage et après compactage. Ce rapport est d'autant plus faible que le béton est plus fluide.

III.7.2 Matériel nécessaire

Il est écrit dans la norme ISO 4111. Il se compose

- d'un récipient parallélépipédique : 20 cm × 20cm × 40cm (cf. figure 3.7)
- d'une truelle rectangulaire.
- d'un moyen de compactage qui est une aiguille vibrante, de 40mm de diamètre maximal ou une table vibrante.

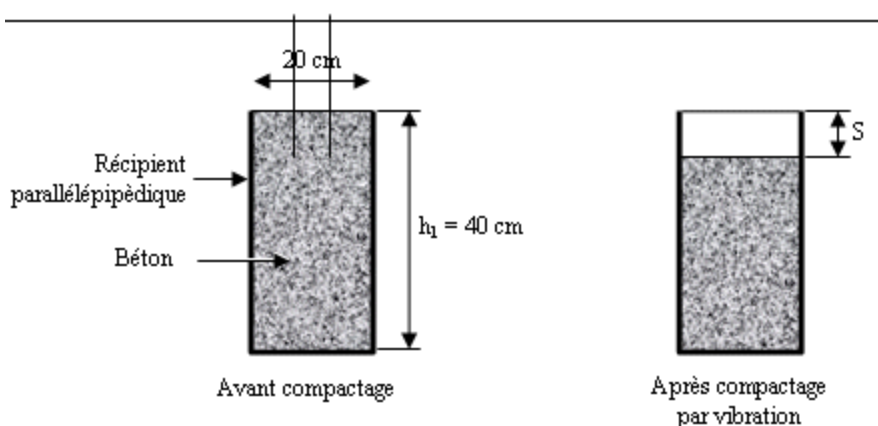


Figure 3.7 : Mesure du degré de compactage.

III.7.3 Conduite de l'essai

La mode opératoire est défini par la norme ISO 4111.

L'essai consiste à remplir le récipient de béton. Le remplissage s'effectue avec la truelle en laissant tomber le béton alternativement de chacun des quatre bords supérieurs du récipient. Après avoir été arasé, le béton est compacté, soit au moyen de l'aiguille vibrante, soit au moyen de la table vibrante, jusqu'à ce qu'on ne puisse plus déceler de diminution de volume. Soit s l'affaissement du béton dans le moule mesuré aux quatre coins du récipient.

Le degré de compactibilité est exprimé par le rapport :

$$\frac{h_1}{h_1 - s}$$

III -7 -4 Classe de compactage

La norme ENV 206 définit 4 classes de compactage en fonction du degré de compactibilité :

Tableau 3.3 : Classes de compactage

Classe de compactage	C0	C1	C2	C3
$\frac{h_1}{h_1 - s}$	$\geq 1,46$	1,45 à 1,26	1,25 à 1,11	1,10 à 1,04

III.8 Résistance

III.8.1 Confection des éprouvettes

III.8.1.1 Dimension des moules (NFP 18-400)

Les résistances sont mesurées sur des éprouvettes cylindriques ou prismatiques dont les moules ont des caractéristiques définies par la norme NFP 18-400 pour laquelle les moules plus fréquemment utilisés sont les moules cylindriques. Leurs dimensions sont indiquées ci-dessous ; elles doivent être choisies en fonction du diamètre maximal des granulats (D) entrant dans la composition du béton.

Tableau 3.4 : Le format et la dimension des moules Mise

Format (cm)	Dimension (mm)		Section (cm ²) par un plan		D (mm) des granulats
	Diamètre (d)	Hauteur (h)	orthogonal	diamétral	
Cylindre 11× 22	112.8	220	100	248	≤16
Cylindre 16× 32	159.6	320	200	511	≤40
Cylindre 25× 50	252.5	500	500	1262	≤80

Mise en place et conservation du béton pour les essais d'étude, de convenance ou de contrôle (NF P 18-404) La mise en place dans les moules a lieu par vibration ou par piquage, en fonction des résultats de l'essai d'affaissement et conformément aux normes NF P 18-421, 422, 423.

Les moules ayant été munis d'un dispositif s'opposant à l'évaporation, les éprouvettes doivent être conservées sans être déplacées pendant 24 h ±1 h dans un local maintenu à 20°C ±2°C. Après démoulage, les éprouvettes doivent être conservées à même température, dans l'eau ou dans une chambre humide (d'humidité relative supérieure ou égale à 95 %).

III-8-1-2 Essai d'information (NF P 18-405)

Le béton mis en place dans un ouvrage subit un autre mode de conservation que celui des éprouvettes conservées dans la chambre humide. La température et l'humidité relative de l'air sont généralement différentes. Les caractéristiques du béton d'ouvrage ne seront donc pas les mêmes que celles des éprouvettes réalisées lors des essais d'étude, de convenance ou de contrôle. Les essais

d'information ont pour but d'évaluer les caractéristiques du béton utilisé pour la confection des éléments d'un ouvrage. Le prélèvement de l'échantillon de béton et sa conservation sont décrits par la norme NF P 18-405. Le principe consiste à réaliser des éprouvettes en approchant au plus près les conditions de mise en place dans l'ouvrage. La conservation doit reproduire également les conditions de conservation de l'ouvrage : même date de démoulage, même exposition au vent, à la pluie ou au soleil, etc.

Les éprouvettes peuvent également être obtenues par carottage du béton durci : il s'agit de prélever sur l'ouvrage lui-même, avec un outil adapté (le carottier), un échantillon de béton ayant la forme d'une éprouvette (la carotte). Le transport au laboratoire doit être effectué la veille du jour de l'essai.

III-8-2 Essais de compression (NF P 18-406)

III-8-2-1 Objectif de l'essai

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression du béton, qui peut être mesurée en laboratoire sur des éprouvettes.

III-8-2-2 Principe de l'essai

Les éprouvettes étudiées sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

III-8-2-3 Equipement nécessaire

- Une machine d'essai qui est une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester et répondant aux prescriptions des norme NF P 18-411 et NF P 18-412.
- Un moyen pour rectifier les extrémités des éprouvettes : surfaçage au soufre, ou disque diamanté.

III-8-2-4 Rectification des extrémités des éprouvettes

Conformément à la norme NF P 18-406, l'essai de compression est effectué sur des éprouvettes cylindriques dont les extrémités ont été préalablement rectifiées. En effet, si les éprouvettes étaient placées telles quelles sur les plateaux de la presse, on ne serait pas assuré de la planéité des surfaces au contact et de leur perpendicularité aux génératrices de l'éprouvette. La rectification consiste donc à rendre ces surfaces planes et perpendiculaires aux génératrices de l'éprouvette. Pour parvenir à ce résultat deux méthodes peuvent être employées : le surfaçage au soufre et la rectification par usinage des extrémités.

Le surfaçage au soufre est décrit dans la norme NF P 18-416. Il consiste à munir chaque extrémité de l'éprouvette d'une galette à base de soufre respectant les deux exigences : planéité et perpendicularité aux génératrices. La planéité est assurée de la façon suivante : le mélange soufre, porté à une température de $125^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, est liquéfié et versé sur une platine dont le fond a été rectifié (figure 6.5.1). La perpendicularité est obtenue grâce à un dispositif de guidage qui maintient les génératrices de l'éprouvette perpendiculaires au fond rectifié du moule.

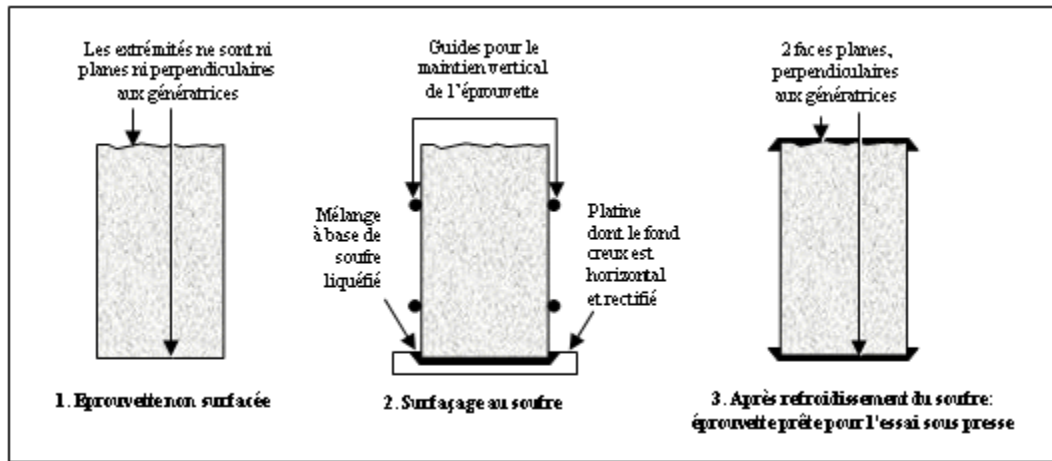


Figure 3.8: Principe du surfaçage au soufre.

L'éprouvette maintenue par le dispositif de guidage est descendue sur le soufre liquéfié. Quand, après refroidissement, le soufre s'est solidifié, l'éprouvette (à laquelle adhère alors la galette de soufre) est désolidarisée de la platine et il a procédé au surfaçage de la deuxième extrémité. Pour les éprouvettes dont la résistance à la compression ne dépasse pas 50Mpa, le surfaçage peut se faire avec un mélange de 60% (en masse) de fleur de soufre et 40% de sable fin de granularité inférieure à 0,5mm.

Au-delà, et jusqu'à 80 Mpa, il faudra utiliser un mélange soufré spécialement conçu pour les Bétons Hautes Performances.

Pour des bétons dont la résistance est supérieure, la rectification exigera des moyens matériels plus important : une rectifieuse équipée d'une meule diamantée. L'éprouvette est alors usinée de manière à rendre les extrémités parfaitement perpendiculaires aux génératrices.

III.8.2.5 Conduite de l'essai de rupture

L'éprouvette, une fois rectifiée, doit être centrée sur la presse d'essai avec une erreur inférieure à 1% de son diamètre. Pour des éprouvettes 11×22 ou 16×32, cela signifie une précision millimétrique qui ne pourra pas être obtenue sans l'emploi d'un gabarit de centrage prenant appui sur l'éprouvette (et non sur le produit de surfaçage), comme indiqué sur la figure 6.5.2.

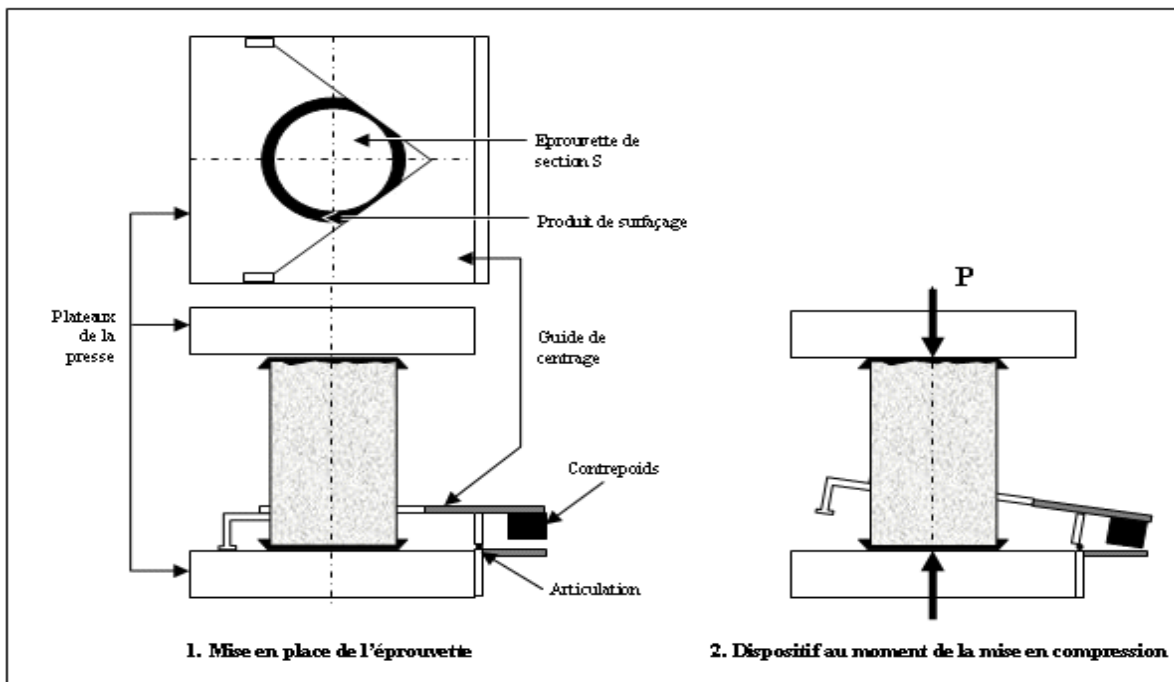


Figure 3.9: Exemple de dispositif de centrage de l'éprouvette sur la presse

La mise en charge doit être effectuée à raison de 0,5 Mpa/s avec une tolérance de 0,2 MPa/s. Pour des éprouvettes 11×12 cela signifie une montée en charge de 5KN/s±2KN/s et pour des éprouvettes 16 × 32 de 10 KN/s ±4 KN/s.

La charge de rupture, P, est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. Soit S la section orthogonale de l'éprouvette ; la résistance, Fc, est exprimée en Mpa à 0,5Mpa près et a pour expression :

$$f_c = \frac{P}{S}$$

Dans la relation ci-dessus Fc est directement obtenue en Mpa si P est exprimée en méganewton (MN) et S en m²

III-8-2.6 Particularités de la rupture en compression

Pour des résistances supérieures à 60Mpa, et suivant la presse utilisée, la rupture peut être brutale et il est bon d'équiper la presse d'un système de protection pour se protéger des éclats éventuels. En général l'éprouvette rompt de la manière indiquée sur la figure 2.9

Dans ce type de rupture, deux cônes apparaissent aux extrémités de l'éprouvette rompue. En effet, la pression exercée par les plateaux de la presse à la jonction avec l'éprouvette gêne les déformations transversales dans cette zone. Dans la partie centrale, la formation transversale est libre ; elle résulte des contraintes de traction (symbolisées par les flèches notées t sur la figure 3.10) perpendiculaires à la compression (et à la fissuration). Ce sont ces contraintes de traction qui aboutissent dans la zone

centrale à la fissuration longitudinale de l'éprouvette, puis à sa ruine. Les zones extrêmes, protégées par le frettage créé par les plateaux, ne sont pas détruites

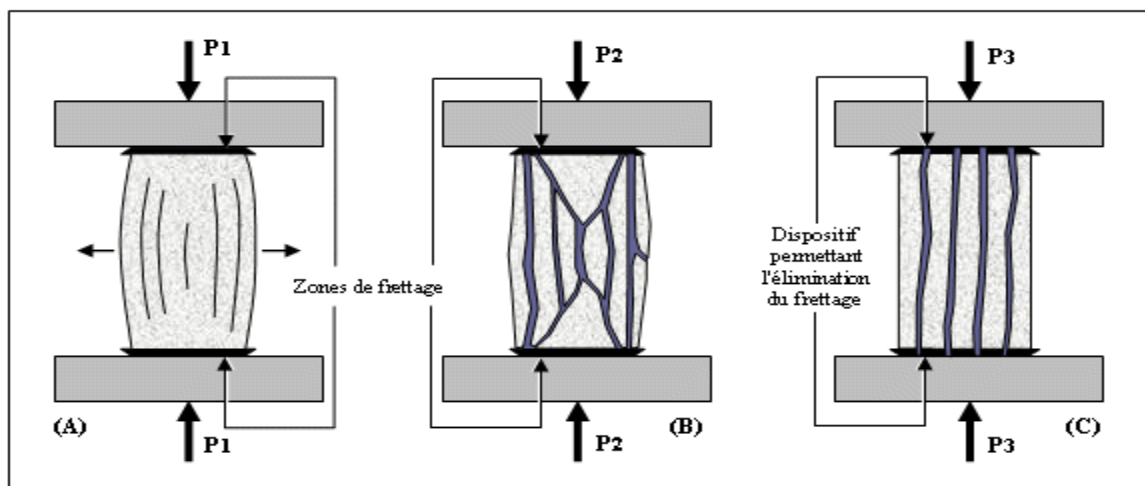


Figure 3.10 : Mode de rupture des éprouvettes cylindriques en compression

Le frettage peut être limité en graissant les zones de jonction plateaux/éprouvettes ou en y interposant des appuis en téflon. La rupture est alors du type de celle indiquée sur la figure 3.10. Elle se produit pour une charge (P3) habituellement plus faible que celle obtenue dans le cas général (P2) : en protégeant ses extrémités de l'éclatement, le frettage permet à l'éprouvette d'encaisser des chargements légèrement plus importants.

III.9 Mesure la résistance à la traction (NF P 18-408)

III.9.1 Objectif de l'essai

Le but de l'essai est de connaître la résistance à la traction du béton de l'éprouvette cylindrique.

III.9.2 Principe de l'essai

On procède généralement par essai de fendage sur éprouvette cylindrique conformément à la norme NF P 18-408. Dans cet essai, on applique à l'éprouvette un effort de compression induit des contraintes de traction dans le plan passant par ces deux génératrices. La rupture, due à ces contraintes de traction, se produit dans ce plan (figure 6.6.1). Le calcul permet de définir la contrainte de traction correspondant à cette rupture.

III-9-3 Equipement nécessaire

- Une presse de force appropriée conforme aux normes NF P 18-411 et NF P 18- 412.
- Des bandes de chargement en contreplaqué neuf ayant une section dont les dimensions sont indiquées sur la figure 3.11 et une longueur au moins égale à celle de l'éprouvette.
- Des moules cylindriques, pour la confection des éprouvettes, qui ne doivent pas être en carton car de tels moules ne garantissent pas avec suffisamment de précision la rectitude des génératrices.

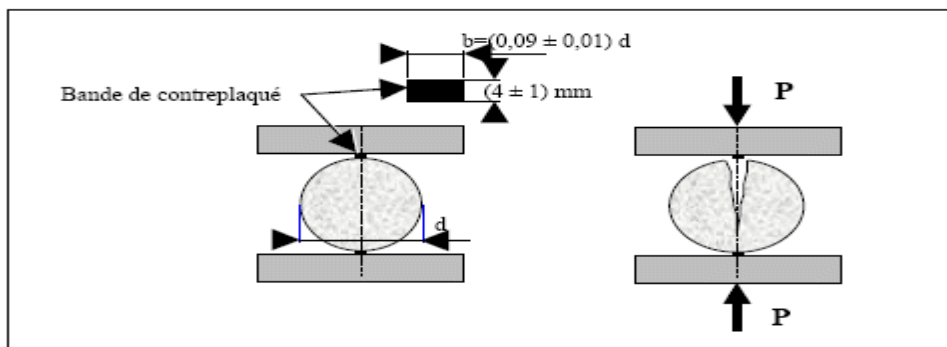


Figure 3.11 : Dispositif pour l'essai de rupture par fondage.

Conduite de l'essai

L'éprouvette est placée entre les deux plateaux de la presse comme indiqué sur la figure 6.6.1, le contact entre les plateaux et l'éprouvette se faisant par l'intermédiaire des deux bandes de contreplaqué. Le centrage de l'éprouvette doit se faire à 0,5mm près à l'aide d'un gabarit de centrage. La vitesse de chargement doit être constante pendant toute la durée de l'essai et égale à 1,94 kN/s \pm 0,39kN/s pour les cylindres 11 \times 22 et 4,01 kN/s \pm 0,80 kN/s pour les cylindres 16 \times 32 (ce qui correspond à un accroissement de la contrainte de traction de 0,05MPa/s avec une tolérance de +20%). Si h est la hauteur de l'éprouvette, d son diamètre et P la charge appliquée, la contrainte de rupture vaut :

$$f_t = 0,637 \frac{P}{dh}$$

Dans la relation ci-dessus f_t est directement obtenue en MPa si P est exprimée en méga newtons (MN) et d et h en mètres (m). Cette contrainte doit être exprimée à 0,1 MPa.

CHATRE IV

Résultats et interprétation

CHATRE IV : Résultats et interprétation**IV.1 Béton fibré****IV.2 Essai sur le béton fibré****IV.2.1 Essai de compression (calcul de résistance à la compression):**

Cet essai nous permis de déterminer la résistance à la compression du béton durci c'est-à-dire à 07 jours (grâce à l'utilisation d'un accélérateur de prise).

Le principe de cet essai est de chargé les éprouvettes jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression conforme à l'EN 12390-4. La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La contrainte de résistance a la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

La résistance a la compression est donnée par l'équation suivante : $FC = F/AC$ avec :

FC : Resistance en compression,

F : Charge maximale, exprimée en Newtons ;

AC : Aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée.



Figure 4.1 : Appareil de compression



Figure 4.2: Epreuve avant écrasement



Figure 4.3: Epreuve après écrasement

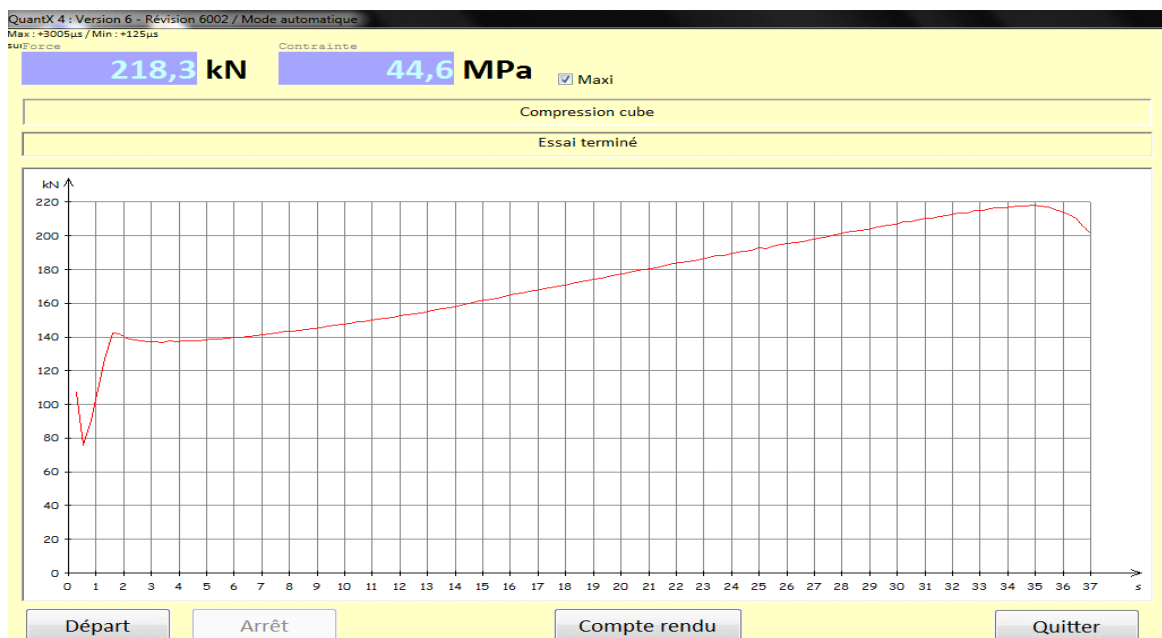


Figure 4.4 : Le graphe de la résistance à la compression

IV.2.2 Essai de flexion (calcul de résistance à la traction):

Pour évaluer la résistance de traction par flexion on a utilise des éprouvettes prismatiques normalisées, de dimensions 7 x 7 x 7 cm (Figure II.9) conforme a la norme EN 12390-1.

La presse qui répond aux normes est, munie d'un banc de flexion 3 points. Cet essai permet de déterminer la résistance a la traction par flexion du béton étudié, l'essai le plus couramment utilise.

Il consiste a rompre en flexion une éprouvette prismatique de cote a et de longueur 4a (7 x 7 x 7).

Le module de flexion détermine a partir de la portion linéaire de la courbe force déformation et la résistance de traction par flexion est égale :

$$\sigma = \frac{F}{b \cdot h}$$

Avec :

t : Contrainte de traction en (N/mm²)

F : charge totale appliquée a la rupture en flexion exprime en N.

L : la portée en mm, b et h sont la largeur et la hauteur de l'éprouvette exprimées en mm

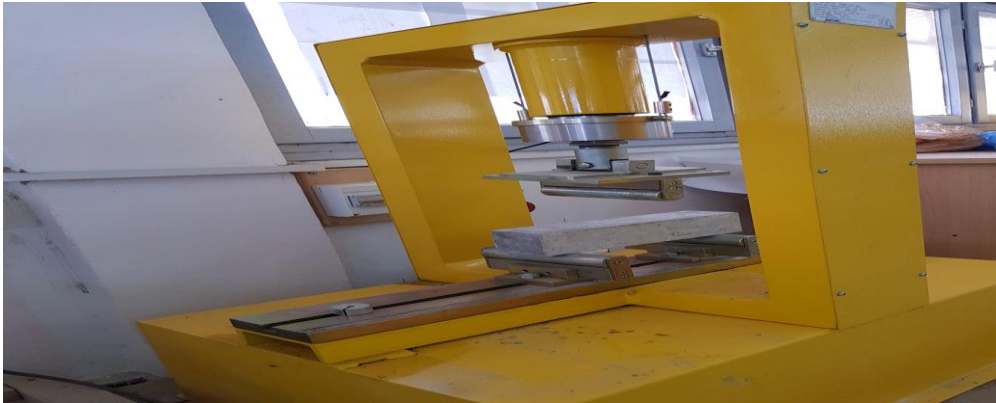
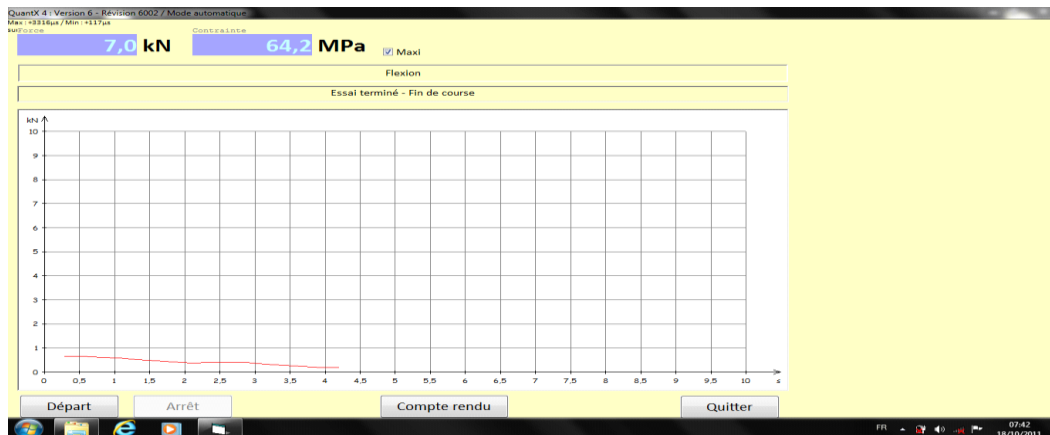


Figure4.5:Machin de traction



Figure4.6:Eprouvette après écrasement



Les résistances à la flexion

La valeur de résistance résiduelle:

Les fibres dans le béton apportent une meilleure résistance aux déformations en flexion des ouvrages de béton soumis à des charges. C'est lorsque apparaît la première fissure que les fibres sont sollicitées et qu'il est possible de déterminer une valeur de résistance résiduelle. Effectivement, les fibres apportent une meilleure cohésion et résistance intrinsèque de la matrice et augmentent ainsi la résistance à la propagation et à l'augmentation de la fissuration. Les fibres permettent une reprise de charge en post-fissuration.

Avantages du béton fibré

Les avantages de l'utilisation des fibres dans le béton sont présentés selon l'aspect technique et économique

Aspect technique.

L'utilisation d'un béton fibré est avantageuse principalement au niveau du contrôle de la fissuration ainsi que du support de charge, tout dépendamment du type de fibres et du dosage utilisé.

Les principaux avantages techniques sont :

- un renforcement tridimensionnel uniformément distribué à travers le béton ;
- une augmentation de la ténacité grâce au comportement en post-fissuration (résistance résiduelle)
- une énergie d'absorption élevée ;
- une résistance aux impacts élevée ;
- une résistance à la fatigue élevée ;
- une augmentation de la résistance en cisaillement.

Aspect économique

Les principaux avantages économiques des bétons fibrés sont :

- une réduction des intervenants sur le chantier, ce qui implique une réduction du coût de mise en place et du temps de construction ;
- une optimisation du dimensionnement.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

En général, une étude expérimentale sur les BFM requière la maîtrise parfaite des connaissances, la fiabilité des instruments de mesure, la qualité des granulats utilisés dans la formulation et des fibres de meilleures nuances. Cette étude nous a conduits à découvrir le sens de la recherche scientifique pour atteindre le meilleur résultat possible. Ainsi, la consultation des références bibliographiques nous a enrichi de connaissances et nous a donné idée comment récolter et développer des informations. Après avoir réalisé cette étude nous avons conclu que l'utilisation des fibres aux bétons améliore d'une manière acceptable sa résistance à la traction. Nous avons conclu aussi que plus on utilise des fibres plus minces nous atteindrons des résultats plus probants. Et pour cela, nous invitons les promotions avenir à effectuer des expériences sur des fibres plus minces que celles que nous avons utilisé.

Annexe



FIBERTEK A

FIBRES STRUCTURELLES EN ACIER AVEC UNE ADHÉRENCE AMÉLIORÉE POUR BÉTON FIBRO-ARMÉ

DESCRIPTION

Les fibres **FIBERTEK A** sont obtenues par étirage à froid de fil d'acier de haute résistance avec mise en forme spéciale pour obtenir le meilleur ancrage sur toute leur longueur.

Les fibres **FIBERTEK A** sont destinées pour le renforcement structurel.

Les caractéristiques du fil d'acier, à partir duquel les fibres **FIBERTEK A** sont formées, répondent aux normes de référence relatives au type d'utilisation et peuvent également être fournies dans le type galvanisé.

CARACTERISTIQUES

FIBERTEK A, réalisé en acier haute résistance, permet d'obtenir un béton et de mortier à haute résistance aux :

- Chocs et vibrations.
- Charges concentrées.

La distribution uniforme des fibres dans le mélange rend l'utilisation du **FIBERTEK A** possible pour remplacer l'armature secondaire et le confinement de la propagation des fissures.

Les fibres **FIBERTEK A** sont disponibles (sur demande) en différents diamètres et longueurs selon les exigences d'utilisation.

DOMAINES D'APPLICATION

Les fibres **FIBERTEK A** sont utilisées pour réaliser une armure de renfort diffuse dans les structures en béton soumises aux sollicitations particulièrement élevées, les chocs, le trafic lourd, vibrations.

En particulier, ils trouvent une utilisation dans :

- Sols industriels, comme alternative au renforcement traditionnel avec maille électro-soudé.
- Tabliers et aires de stationnement.
- Joints bordures de la route.

- Béton projeté (spritz béton) de tunnels, murs, pentes.

- Réparations structurelles.
- Revêtement des tuyaux de métal.
- Éléments préfabriqués.
- Déversoirs, évacuateurs de crues, barrages hydrauliques.
- Bunkers, voûtes, coffres-forts.
- Plaques de fondation.
- Renforcement d'effort au cisaillement dans des éléments précontraints.

AVANTAGES

- Les fibres **FIBERTEK A** améliorent les propriétés mécaniques du béton et des matériaux, tels que la ductilité, la résistance, l'absorption d'énergie, la durabilité et la dureté.

- Cette fibre permet en particulier de contrôler le retrait plastique et fissuration du béton et aide à la réduction ou à l'élimination du besoin d'armature traditionnelle.

- Répartition plus homogène de l'armure dans toute la pâte de ciment.
- Renfort structurel.
- Propriétés mécaniques améliorées pendant la phase après-fissure.
- Augmentation de ductilité du béton.
- Augmentation de la résistance aux chocs.
- Meilleure facilité et rapidité de mise en œuvre.



Siège & Usine :

B.P. 203 Zone Industrielle de Sidi-Bel-Abbes
Tél. : + 213 (0) 48 70 34 63
Fax : + 213 (0) 48 70 34 62
E-mail : info@teknachem.com
WWW.TEKNAHEM.COM

Antenne d'Alger :

Rue de la Soummam lot N° 06 Z.I. Oued Smar Alger
Tél./Fax : + 213 (0) 23 92 05 62

Antenne de Sétif :

Zone d'Activité Artisanale 6^{ème} Tranche - Sétif
Tél. : + 213 (0) 36 93 90 10 - Fax : + 213 (0) 36 93 90 60

Les informations contenues dans la présente fiche technique, bien que représentant le stade le plus avancé de la connaissance, ne dispensent pas l'utilisateur de procéder à des tests préliminaires dans ses propres conditions d'emploi ou à faire appel à l'assistance technique de la société. Par conséquent **TEKNACHEM ALGERIE SARL** décline toutes responsabilités pour l'emploi inapproprié du produit.



CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES



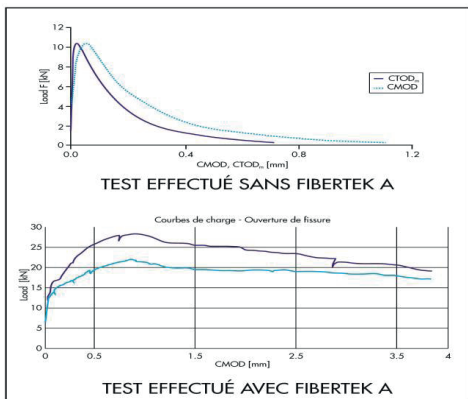
Longueur (mm) :(L) $50 \pm 10\%$
 Diamètre fil (mm) :(de) $1 \pm 10\%$
 Rapport d'aspect :(L/de) 50
 Format :à crochet
 Section transversale :circulaire
 Tension à la rupture à la traction (N/mm²): 1100-2700
 Allongement à la rupture :< 4%

DOSAGE

Les fibres doivent être introduites dans le mélange en même temps que l'introduction des agrégats et sont dosées dans un rapport de 20/40 Kg/m³ de béton, selon le projet et les demandes.

Effet de FIBERTEK A sur la résistance du béton :

- 25 Kg/m³ pour 1,5 N/mm² à CMOD = 0,5 mm
- 25 Kg/m³ pour 1 N/mm² à CMOD = 3,5 mm



STOCKAGE

Protéger de la pluie et autres intempéries.

Ne pas empiler les palettes.

EMBALLAGE

Sac de 20 Kilogrammes.

NORMES DE RÉFÉRENCE

- EN 14889-1 - Fibres for concrete Part 1 : Steel fibres Definition, specifications and conformity.
- EN 14845-2 - Méthodes d'essai de fibres pour le béton - Partie 2 : Effet sur le béton.
- EN 14651 - Méthode d'essai pour béton avec fibres métallique - Mesure de la résistance à la traction pour la flexion [limite de proportionnalité (LOP), résistance résiduelle]
- UNI 11037- Les fibres d'acier à être utilisés dans le béton renforcé.
- UNI 11039 - Béton renforcé avec fibres d'acier - Partie I. Définitions, classification et la désignation; Partie II. Méthode d'essai pour la détermination des résistances à la première fissuration et indices de ductilité.
- ASTM A820 - « Standard Specification for Steel Fibers for Fiber » - Reinforced Concrete.
- CNR - DT 204- Instructions pour la planification, l'exécution et le contrôle des structures FRC (Béton Fibre-renforcé).
- RILEM - « Test and design methods for steel fibre reinforced : uniaxial tension test for steel fibre reinforced concrete », RILEM TC 162-TDF recommendations, materials and Structures.

Références bibliographiques

- [1]: **G. BERNIER**: Formulation des bétons. Techniques de l'ingénieur, Paris, 2004, C2210.
- [1']: **N.MAKHLOUF**: Caractérisation en statique du comportement en traction directe du béton armé de fibres en copeaux, Thèse de magister 2010. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.
- [2]: **F. GABRYSIK**: Matériaux-Les Bétons, chapitre 04, Strasbourg, 2005.
- [3]: **P.K. MEHTA**: " Concrete: structure, properties, and materials ", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986, 450p. [4]: **E.N. ANTOINE**, Fibre reinforced for concrete, Concrete International design and Construction, Michigan, 1985, Vol 7, N° 3, pp.21-25.
- [5]: **ACI COMMITTEE**: State of the art report on fibre reinforced concrete, American Concrete Institute. , Philadelphia, 1984, pp.140-146.
- [6]: **M. BRAUN & A. MAJDIC**: Reinforcing castables with stainless steel fibres , Intercera, 1980, Vol 129, pp.113-118..
- [7]: **H.F. PORTER**: Preparation of concrete from selection of materials to final disposition. American Concrete Institute. 1910, Vol. 6, 296p.
- [8]: **D.R. LANKARD & H.D. SHEETS**: Use of steel wire fibres in refractory castables .Am. Cer. Soc, 1971, Vol. 63, No.7.
- [9]: **Pascal Casanova**: Bétons renforcées de fibres métalliques : Ecole nationale de ponts et chaussées, Paris, 1995.
- [10]: **SACI. R**: Prise en compte de l'orientation des fibres dans une poutre continue à matrice de béton, mémoire de magistère, Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2004.
- [11]: **Planet-TP**: http://www.planete-tp.com/IMG/pdf/cone-abrams_cle61ea17.pdf ; [10/06/2016]. [b]: **SIGMA-BETON**; <http://www.sigma-beton.fr/betons-durcis> ; [10/06/2016].
- [12]: **SIGMA-BETON**: <http://www.sigma-beton.fr/betons-durcis> ; [10/06/2016].