

CENTRE UNIVERSITAIRE MOHAMED BOUDIAF
M'SILA

INSTITUT DE GENIE-CIVIL

**L'INFLUENCE DES FIBRES METALLIQUES SUR
LE COMPORTEMENT MECANIQUE DU BETON**

Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Magister

En : BETON.

Par : Abdeslam BENYAHIA.

Le, 09.03.2001

CENTRE UNIVERSITAIRE MOHAMED BOUDIAF
M'SILA

INSTITUT DE GENIE-CIVIL

**L'INFLUENCE DES FIBRES METALLIQUES SUR
LE COMPORTEMENT MECANIQUE DU BETON**

Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Magister

En : BETON.

Par : Abdeslam BENYAHIA.

Sous la direction de Mekki BIBI maître de conférences.

Devant le jury composé de :

Tahar AYADAT	Maître de conférences, président de jury.	(C.U..M'sila)
Mekki BIBI	Maître de conférences, rapporteur.	(C.U..M'sila)
Zine El Abidine RAHMOUNI	Maître assistant, chargé de cours, co-rapporteur	(C.U..M'sila)
Abdelkrim KADID	Maître assistant, chargé de cours, examinateur.	(U..Batna)
Abdelghani NACERI	Maître assistant, chargé de cours, examinateur.	(C.U..M'sila)
Ali HAMDOUN	Ph.D en Génie-Civil, examinateur.	(C.U..M'sila)

Le, 09.10.2001

préambule :

L'analyse de la variabilité au point de vue de plusieurs caractères considérés isolément, permet de répondre à une question des plus importantes dans le domaine du génie-civil, est celle de l'indépendance ou de l'interdépendance des caractères. La question reste toujours la même dans d'autres domaines. Dire que deux caractères sont étroitement liés ou interdépendants, c'est qu'une variation définie de l'un entraîne une variation proportionnelle de l'autre. Quand il s'agit d'apprécier un résultat comparatif, la probabilité pour que le résultat soit significatif, dépend de la grandeur du résultat.

Dans la pratique des essais comparatifs, il est rarement possible de disposer de séries d'un nombre élevé de résultats, ce nombre est presque toujours inférieur à 30, il est souvent de 5 à 10, dans ce cas la déviation standard ainsi que l'erreur probable tendent à être plus élevées.

Dans l'étude portant sur l'emploi des fibres métalliques, incorporées dans la masse du béton, pour but d'améliorer certaines caractéristiques de celui-ci, l'emploi des outils statistiques est une opportunité très avantageuse dans l'interprétation, le contrôle et la prise de décision en toute circonstance et pour différents types de bétons en générale, cette approche scientifique, nous permet d'aboutir à des conclusions plus éclairées, sans beaucoup de marges d'erreurs d'appréciation cela d'une part, d'autre part, elle permet l'élaboration d'avants projets de critères et de spécifications, utilisables utilement dans les contrats d'exécution des projets de construction.

Il est de l'avis de beaucoup de spécialistes, que l'emploi des statistiques, constitue la base de toute analyse.

S O M M A I R E

Chapitre I Introduction

1- Les fibres métalliques	1
1.1 - Généralité	
1.2 – Béton de fibres	
1.3 - But de la recherche	2
1.4 - Les matériaux composites	3
1.4.1 - Généralités	
1.4.2 - Les différents types de fibres	
1.4.2.1 - Les fibres métalliques	4
1.4.2.2 - Les fibres de fonte amorphe	
1.4.2.3 - Les fibres de verre	
1.4.2.4 - Les fibres de polypropylènes	
1.4.3 - Propriétés mécaniques des fibres métalliques	
1.4.3.1 - Ténacité du matériau	
1.4.3.1.1 - La méthode ACI	5
1.4.3.1.2 -La méthode japonaise	
1.4.3.1.3 - La méthode Barr	
1.4.3.1.4 - La méthode ASTM	
1.4.4 - Domaines d'application	7
1.4.4.1 -Le domaine du bâtiment	
1.4.4.2 - Le domaine des travaux publics	
1.4.4.3 - Génie-civil autre que le bâtiment et travaux publics	8
1.4. 5 - Recherches et travaux effectuées sur les bétons de fibres	
1.4.6- Comportement à l'effort tranchant	

Chapitre II Essais et expérimentations

2.1 Matériaux et matériels	11
2.1.1 compositions du béton	
2.1.1.1 définitions	
2.2 - ciments	
2.2.1 - classification et qualité du ciment	
2.2.2 - Choix du ciment	
2.2.3 - Stockage du ciment	12

2.3.1- Classification granulométrique	
2.3.2 - Les modules de finesse	
2.3.3 - Spécifications pour les granulats	13
2.3.4 - Granularité	
2.3.5 - Dimension maximale	14
2.3.6 - Propreté	
2.3.7 - Nature et forme	15
2.3.7.1 - Forme	16
2.3.8 - Qualité	
2.3.8.1 - Coefficient granulaire	
2.4 - Eau de gâchage	17
2.5- Dosages	
2.5.1 - dosage du ciment	
2.5.2 - dosage des granulats	
2.5.3 - Dosage de l'eau et plasticité	18
2.6 - Affaisements	
2.7 - Essais de résistance du béton	
2.7.1 - Contrôle	
2.7.2 - information	19
2.7.3 - Prélèvement des échantillons	
2.7.3.1 - Moules des éprouvettes	
2.7.3.2 - Nombre d'éprouvettes	
2.7.3.3 - Confection et conservation des éprouvettes	
2.8 - Processus d'essais	20
2.8.1 - L'âge du béton lors des essais	
2.8.2 - Essais d'écrasement	
2.8.3 - essai de fendage	
2.8.4 - essai de flexion	
2.9 - Etude de composition de béton	21
2.9.1 - L'analyse granulométrique	
2.9.1.1 - Utilité	
2.9.1.2 - Matériel nécessaire pour l'analyse granulométrique	
2.9.1.3 - Choix de l'échantillon	22
2.9.1.4 - Séchage de l'échantillon	
2.9.1.5 - Classement des tamis	
2.9.1.6 - Pesage	
2.9.1.7 - Tracement de la courbe	23
2.10 - Propreté	26
2.10.1 - Propreté des graviers	
2.10.2 - Propreté des sables	
2.10.2.1 - Equipement pour équivalent de sable	
2.10.2.2 - Mode opératoire	
2.10.2.3 - Spécifications	27
2.11 - Essais Los Angeles	

2.11.1 - Principe de l'essai	
2.11.2 - Mode opératoire	28
2.12 - Etude de composition de béton	29
2.12.1 -Fuseau de spécification des mélanges	30
2.12.2 - Calcule des quantités	31
1.12.2.1 - Détermination du dosage en ciment	
2.12.2.2 - Dosage en eau	33
2.12.2.3 - Quantité des granulats	
2.12.2.4 - Quantité de fibres pour	34
2.13 - Essai d'ouvrabilité	
2.13.1 -Matériel	
2.13.2 - Mode opératoire	
2.14 - Confection des éprouvettes et essais	35
2.14. 1 - Préparation des échantillons	
2.14.2 - Essais entrepris	
2.14.2.1 - Essais destructifs	
2.14.2.1.1 - Résistance à la traction	
2.14.2.1.1.1 - Appareil utilisé	38
2.14.2.1.1.2 - Mise à charge	
2.14.2.1.2 - Essais de compression	
2.14.2.1.2.1 - Appareil utilisé	
2.14.2.1.2.2 - Mise à charge	
2.14.2.2 - Essais non destructifs	
2.14.2.2.1 - Essais sclérométriques	39
2.14.2.2.2 - Auscultation dynamique par vitesse du son	40
2.14.2.2.2.1 -Relation vitesse du son, résistance	41
2.14.2.2.2.2-Mode opératoire	42
2.14.2.2.2.3 -Mesures	
2.15 – Méthodes statistiques	43
2.15.1 - Fonctions statistiques	
2.15.2 - Corrélations	48

Chapitre III

Résultats

3.1 résultats	49
---------------	----

CHAPITRE IV

Concept, analyse et interprétation

4.1 – Concept	79
4.2 Données utiles	
4.3 Analyse et interprétation	80
Conclusions	81

Notation et unité de mesure :

- P. Erou.	Poids de l'éprouvette.	g
- d. Erou.	Densité de l'éprouvette	/
- d. Moy.	Densité moyenne	/
- Char. F (X_i)	Charge de flexion	KN
- Char. C	Charge de compression	KN
- Ch. Moy. (\bar{x})	Charge moyenne de flexion	KN
- f ^c comp. (X_i)	Contrainte de compression	Mpa
- f ^c Moy. (\bar{x})	Contrainte moyenne de compression	Mpa
- Sect. Fibres	Section de fibres	cm ²
- df. (X_i)	Densité des fibres	%
- df Moy. (\bar{x})	Densité moyenne des fibres	%
- Is (X_i)	Indice sclérométrique	/
- Is moy. (\bar{x})	Indice sclérométrique moyen	/
- t	Temps de propagation	μs
- Vs (X_i)	Vitesse de propagation du son	m/s
- Vs Moy. (\bar{x})	Vitesse de propagation moyenne du son	m/s
- R	Etendus (T.Flexion – compression)	KN – Mpa
- R moy. (\bar{R})	Etendues moyennes (T.Flexion – compression)	KN – Mpa
- e	Ecart (T.Flexion – compression)	KN – Mpa
- e moy.	Ecart moyen (T.Flexion – compression)	KN – Mpa
- x moy. (\bar{x})	Valeurs moyennes.	
- s	Ecarts type d'échantillons.	
- V	coefficients de variation	%
- σ1	Ecarts types entre essais.	
- V1	Coefficients de variation entre essais	%

Notations d'appréciation des résultats et des essais (voir tableau 2.12 valeurs standards pour le contrôle de béton, chapitre II page 44.

(E)	Qualité excellente.
(B)	Qualité bonne.
(m)	Qualité moyenne.
(M)	Qualité mauvaise.

Bibliographie :

- [1] F GAURISSE « Essai et contrôles des bétons », éditions EYROLLES Paris 1978.
- [2] George Dreux « Nouveau guide du béton » éditions EYROLLES France 1981.
- [3] A KOMAR « Matériaux et éléments de construction » édition mire Moscou 1978.
- [4] Code et manuel d'application pour le calcul et l'exécution du béton armé UNESCO (chapitre 9 exécution des ouvrages paragraphe 9.3 à 9.39.
- [5] Pierre Rossi « Les bétons de fibres métalliques » presses Ponts et Chaussées.
- [6] Daniel Gay « Matériaux composites » 4^{ème} édition HERMES.
- [7] SHINGO SEKI, MINEO MORIMOTO, NOBUTOSHI YAMANE «Recherches expérimentales sur l'amélioration du béton par l'incorporation de sous-produits industriels » Annales n° 436 juillet-Août 1985 série béton 231.
- [8] Encyclopédie biologique Agricole édition 1935
- [9] M. BEDAR, M. BENCHEIKH « contribution à l'étude de la ténacité des bétons de fibres » séminaire National de Génie-civil M'sila 16,17 novembre 1997.
- [10] M. BEDAR, M BENCHEIKH, G. DEBICKI, P. CLASTES, URGC, INSA de Lyon France « Effet de l'incorporation de fibres issues de déchets industriels locaux, sur le comportement du béton » séminaire National de Génie-civil M'sila 16,17 novembre 1997.
- [11] M. BEDAR, M. BENCHEIKH, G. DEBICKI, P. CLASTES, URGC, INSA de Lyon France « Maniabilité et mise en œuvre d'un béton renforcé de fibres issues, de déchets industriels locaux» séminaire National de Génie-civil M'sila 16,17 novembre 1997.
- [12] M. Bibi « Etude de l'endurance du matériau composite » séminaire National de Génie-civil M'sila 16,17 novembre 1997.
- [13] Y. BOUAFIA, A. ADJRAD « Utilisation de fibres de récupération, pour le renforcement du béton » séminaire National de Génie-civil M'sila 16,17 novembre 1997.
- [14] Y. BOUAFIA, B. FOURE, M.S. KACHI « Proposition d'une relation contrainte déformation pour le béton armé de fibres d'aciers » séminaire National de Génie-civil M'sila 16,17 novembre 1997.

- [15] Y. CHERAIT « Optimisation de la composition des bétons renforcés de fibres en fonte amorphe » séminaire National de Génie-civil M'sila 16,17 novembre 1997
- [16] S.Kaci, Y. BOUAFIA, M.S. KACHI « Etude du comportement mécanique du béton armé de fibres métalliques (approche expérimentale) » séminaire National de Génie-civil M'sila 16,17 novembre 1997.
- [17] M.Khneifer, P. MORLIER « Effet de la longueur des fibres sur les propriétés mécaniques des ciments renforcés de fibres cellulosiques » séminaire National de Génie-civil M'sila 16,17 novembre 1997.
- [18] BAEL.
- [19] L. SKUPIN. Construction de mortier aux polymères et leur durabilité
- [20] KHARTCHEFNIKOV V.I. Les polymères- béton en fibres éditions VGO 1976 p. 116.
- [21] KHARTCHEFNIKOV V.I. L'optimum des composantes et la normal des caractéristiques du polymère béton en fibres, éditions VOUZOV- Construction et architecture 1980 N° 08 p. 79/81
- [22] K. AIT TAHAR. A. MEDAHI. Calcul probabiliste de la résistance d'une matrice composite revue Algérie équipements juillet 2001.

REMERCIEMENTS

Pour la poursuite de mon travail dans cet axe de recherche, j'ai rencontré, aides, encouragements et soutiens de la part de tous les collègues enseignants et amis, qui m'ont permis d'arriver dans les meilleures conditions à l'élaboration de ce travail.

L'insistance permanente de monsieur BIBI Mekki, maître de conférences à l'institut de Génie-civil, m'a été d'une grande utilité, m'ayant donné énergie et confiance, mes pensées iront aussi pour messieurs :

- RAHMOUNI Zine El Abidine, directeur adjoint, chargé de la post-graduation et de la recherche scientifique du centre universitaire de M'sila ;
- BENCHEIKH Mohamed maître de conférences à l'institut de Génie-civil ;
- SAFER Smail directeur de la Post-graduation de l'institut de Génie-civil ;
- KHEMISSA Mohamed maître de conférences à l'institut de Génie-civil ;

Une pensée particulière à monsieur AYADAT Tahar président du conseil scientifique de l'institut de Génie-civil pour son aide précieuse et ses encouragements ;

Je tiens à remercier vivement monsieur LAMARA Abdallah pour son soutien permanent et l'apport de son expérience personnelle dans le domaine du contrôle des ouvrages de Génie-civil « contrôle de la qualité des bétons », sans oublier monsieur et madame NOURI Liamine pour leur sympathie, amitié particulière ainsi que leur expérience et savoir, qui m'ont été un précieux outil.

Les membres du jury, les correcteurs, les membres du conseil scientifique, monsieur le Directeur du Centre Universitaire de M'sila, trouvent ici tous mes remerciements

A. BENYAHIA

Chapitre I

Introduction

1- Les fibres métalliques

1.1 - Généralité :

Nous savons depuis toujours que le béton présente une bonne résistance à la compression, par contre sa résistance à la traction est très faible, ce qui caractérise sa fragilité sous les effets des efforts de traction, la rupture se produit prématurément se manifestant par l'apparition de fissures, ces efforts de traction sont repris en général par des armatures continues, en dépit de ça, les fissures apparaissent toujours, cette fois-ci sous les effets du retrait et de fluage, dans ce cas, nous pouvons utiliser un renforcement discontinu, réalisé à l'aide de fibres incorporées dans le béton et de veiller au maintien une ouvrabilité suffisante, qui permettra une mise en œuvre sans difficulté majeure. [10]

L'incorporation des fibres de diverses natures dans le béton, provenant de déchets industriels ou autres, sont utilisées pour améliorer certaines propriétés du béton, qui permettent de limiter certaines défauts de celui-ci.

Le béton de fibre, présente de bonnes performances à la flexion, aux sollicitations dynamique et s'oppose bien à l'apparition des fissures en les limitant au maximum. Le béton de fibre trouve de plus en plus d'emploi en pratique, notamment dans la réalisation des chaussées bétonnées des routes et de piste d'atterrissage des aérodomes, dans les éléments préfabriqués, et dans le renforcement des ouvrages dégradés. Cependant des problèmes d'élaboration subsistent encore et exigent des études poussées. L'emploi d'un tel béton nécessite une recherche rigoureuse de l'influence des paramètres tels que, la longueur, le pourcentage des fibres.... Etc. [15]

Les fibres contrôlent le mécanisme de la fissuration. La rupture en traction du béton de fibres d'acier, devient ductile au lieu de fragile. Le mode de renforcement du béton par les fibres, complète les armatures classiques, selon l'élément de structure et le type de sollicitation. A titre d'exemple, nous pouvons citer : les dallages, les éléments minces, les pistes d'atterrissage...etc. les problèmes engendrés par les effets de chocs et d'usure, peuvent aussi être résolus, par utilisation de ce type de renforcement, que nous rencontrons dans les assises de machines, les routes et piste d'atterrissage. [14]

1.2 – Béton de fibres:

De l'ensemble des recherches effectuées, il apparaît, que le rôle principal des fibres d'acier et de mieux contrôler la fissuration du béton en état de service, en réduisant l'ouverture des fissures et de transformer le comportement fragile du béton en un comportement ductile, qui accroît la sécurité lors des états de chargements ultimes. Le cas de béton de fibres d'acier, une partie de la force de traction est transmise à travers les fissure par les fibres qui en assurent la couture.

Plus les fibres sont nombreuses, et mieux elles sont ancrées dans le béton, plus grande sera leur efficacité. Les fibres métalliques ont un module élevé qui est de l'ordre de dix fois celui du béton, il est donc possible de mobiliser la résistance à la traction des fibres et d'améliorer ainsi la ductilité du béton. [10]

1.3 - But de la recherche :

Sur la base de ces considérations et des éléments offerts, qui nous permettent une investigation éclairée, afin d'aboutir à des conclusions appréciables sur la relation qui lie deux caractères (% fibres-résistance et longueur fibres-résistance), qui ont fait l'objet de plusieurs recherches, tant à l'échelle nationale, qu'internationale, cela concerne l'emploi des fibres provenant des déchets industriels ou autres dans la confection du béton, dans l'espoir d'améliorer certaines propriétés de celui-ci, permettant à leur tour de réduire ou de limiter certaines carences et défauts du matériau béton.

Parmi ces propriétés, nous citons :

- La ténacité.
- La résistance à la traction.
- La résistance à la traction par flexion.
- La ductilité.

Dans cette perspective, l'objet de ma recherche, porte sur l'influence du pourcentage des fibres « fils d'attache » ainsi que celle de la longueur, sur la résistance du béton en traction, obtenue par des essais de traction par flexion. Les caractéristiques des fibres utilisées dans l'expérimentation se définissent ainsi :

- Diamètre : 1,2 mm.
- Limite d'élasticité $\sigma_{en} = 2.12 \text{ KN/mm}^2$, $\sigma_r = 2.17 \text{ KN/mm}^2$.

Dans le même sens, j'ai prévu d'entreprendre des essais de compression sur les moitiés des prismes rompus à l'essai de flexion, avant de porter à rupture, les éprouvettes subiront tout d'abord des essais aux ultrasons, puis, seront chargés à environ 40 kN afin de prélever les indices sclérométrique en nombre suffisant, ces opérations portent le nom d'essais non destructifs. Cette démarche, nous permettra de se rendre compte de l'impacte des fibres métalliques sur le contrôle du béton à travers l'enregistrement des données obtenues par les essais non destructifs.

Un autre paramètre, qui me semble intéressant est celui de la densification des fibres métalliques dans la masse du béton, quantifiée sur la section droite de l'éprouvette (Densité des fibres par unité de surface « nbF/cm²) et d'établir la relation qui lie ce paramètre à ceux des résistances, et l'efficacité du malaxage, de confection et de vibration.

Remarque :

On pourrait naïvement penser plus en augmente le pourcentage de fibres métallique dans un béton, plus en augmente leur efficacité vis à vis du comportement à l'échelle du matériau ou à celle de la structure, que ce soit pour les fibres courtes ou longs. [5]

1.4 - Les matériaux composites

1.4.1 - Généralités :

Les matériaux composites, comme leur nom, les indiquent, évoque un matériau différent des matériaux habituellement employés. On appelle de façon courante « matériau composite » des arrangements de fibres continues ou non, d'un matériau résistant (renfort) qui sont noyées dans une matrice, dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice conserve leur disposition géométrique aux fibres et leur transmet les sollicitations auxquelles est soumise la pièce.[6]

Les bétons de fibres métalliques font l'objet, depuis environ 30 ans d'un effort de recherche important. Cet effort ne se traduit malheureusement pas, à l'heure actuelle, par un développement industriel conséquent.[5]

Les fibres font partie des composites, possèdent à la fois une élasticité importante, caractérisée par un module d'élasticité élevé et une grande énergie de rupture, incorporées dans la masse du matériau, confèrent à ce dernier, certaines qualités dont il est incapable de les assurer seul.

Les fibres qui dans le domaine du génie-civil, incorporées dans la masse du béton, constituent des composites qu'on appelle communément les bétons de fibres, leur bénéfice est de pouvoir tirer avantage de leurs propriétés mécaniques appréciables et de réduire certains défauts du matériau béton qui sont entre autres :

- Les micro-fissures.
- Résistance aux chocs.
- Fissure de retrait.... etc.

En dépit des avantages que peuvent offrir les fibres, certaines difficultés s'opposent à l'heure actuelle, à la généralisation de leur emploi dans le domaine du génie-civil, parmi ces difficultés, nous citons à titre d'exemple :

- La définition de cahier de charge sur le plan technique.
- Choix des différents constituants.
- Optimisation de la composition en fonction des caractéristiques mécaniques visées (rapport eau-ciment, pourcentage de fibres, rapport sable-graviers....)
- Caractérisation mécanique complète.
- Comparaison entre caractéristiques mécaniques exigées et celle du béton de fibres métalliques formulé.
- Bilan économique de la solution du béton de fibres métalliques, avec prise en considération de tous les aspects (coût, main d'œuvre, investissements, transport, rapidité d'exécution.....) [5]

1.4.2 - Les différents types de fibres :

Parmi les fibres les plus utilisées dans le domaine du béton, nous citons :

1.4.2.1 - Les fibres métalliques :

Les fibres métalliques caractérisées par un module d'élasticité élevé, par conséquent, offre au béton une meilleure résistance à la traction, au choc et améliore sa ductilité en augmentant son pouvoir de résister aux déformations dues à la rupture, de même donne une ténacité appréciable, leurs formes et leurs dimensions améliorent leur ancrage et leur adhérence (fibres, copeaux, fibres tréfilées, ondulées, déformées aux extrémités, en tête de clou)

1.4.2.2 - Les fibres de fonte amorphe :

Ces types de fibres sont obtenus par refroidissement brusque, d'un alliage métallique à base de fer, sont constituées de petits rubans de 1 à 3 mm de largeur, contribuent à la limitation des fissures sous chocs.]

1.4.2.3 - Les fibres de verre :

Sous leur forme habituelle, sont caractérisées par une très grande fragilité aux chocs, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration, sous la forme de fibres de faible diamètre, le verre perd ce caractère, acquière de bonnes caractéristiques mécaniques, et sont utilisées pour fabriquer des éléments de faibles épaisseurs, avec des matrices de pâte ou mortier ou de micro béton.

1.4.2.4 - Les fibres de polypropylènes :

Les polypropylènes, sont des produits d'origine pétrolifère, découverts en 1954, ce matériau de synthèse a connu une extension croissante dans l'industrie de textile où ils apportent les avantages suivants :

- Disponibilité à prix relativement faible.
- Résistance aux attaques en milieux alcalins et corrosifs.
- Augmentation notable de la résistance de la résistance aux chocs.
- Limite l'ouverture des fissures.

Ces fibres sont fréquemment utilisées dans le bâtiment, en particulier dans réalisation des panneaux décoratifs, revêtement de façades, de tuyaux et pieux.

1.4.3 - Propriétés mécaniques des fibres métalliques :

Les fibres ont une influence importante sur le comportement mécanique du béton fibreux, leur incorporation peut augmenter les résistances, en traction, en flexion et particulièrement au cisaillement en résistant aux efforts de traction. Offrent plus de ductilité et de ténacité.

1.4.3.1 - Ténacité du matériau :

Le concept de l'indice de la ténacité de béton de fibres est dû au besoin de l'identification et de la mesure d'une propriété qui permet de différencier un béton de fibres d'un béton normal [9]

Le comportement fragile de la matrice de béton est énormément modifier par la présence de fibres ductiles, limitant la propagation rapide de la rupture de béton. Avec l'accroissement de la charge, les fibres permettent un transfert de contrainte à travers les lèvres de la fissure, ce qui donne au matériau une résistance de post-fissuration, tout en supportant des déformations importantes que la matrice seule.

Cette grande quantité d'énergie est appelée ténacité et peut être évaluée en effectuant des essais de flexion. Cette évaluation est faite à partir d'un coefficient sans dimension appelée indice de ténacité. [9]

Méthodes d'évaluation de la ténacité : [9]

Généralement, la ténacité est représentée par les aires sous les diagrammes (charge – flèche) ; Plusieurs chercheurs ont entamé ce travail pour quantifier ce concept on peut citer Johnson, Hanager Barr et d'autres. Toutes les méthodes entreprises sont basées sur des essais de flexion.

1.4.3.1.1 - La méthode ACI comité 544 (1978) ; Définit la ténacité par un indice unidimensionnel, calculé à partir de l'aire défini par la courbe charge–flèche d'une éprouvette testée en flexion. Il est égal au rapport entre l'énergie total absorbée par l'obtention d'une flèche au centre de 1,9 cm et l'énergie absorbée jusqu'à l'apparition de la première fissure.

1.4.3.1.2 -La méthode japonaise (JCI) qui définit la ténacité comme l'aire comprise entre la charge –déformation et l'axe horizontal indiquant la déformation jusqu'à une déformation de $L/50$, ou $< L >$ est la portée de la poutre .l'éprouvette utilisée est poutre de (150x150x450)ou bien (100x100x300) ;chargée au milieu .l'indice de ténacité est calculé avec la formule suivante :

$$\sigma_b = \frac{T_b \cdot l}{\delta_t \cdot b \cdot h} \quad (1.1)$$

où σ_b indice de ténacité (N/mm²)

T_b la ténacité par flexion (j)

δ_t déformation correspondant avec $L/50$

Remarque : Dans cette méthode la longueur de fibre utilisée doit être

< 40 mm pour les éprouvettes 100 x100x300mm

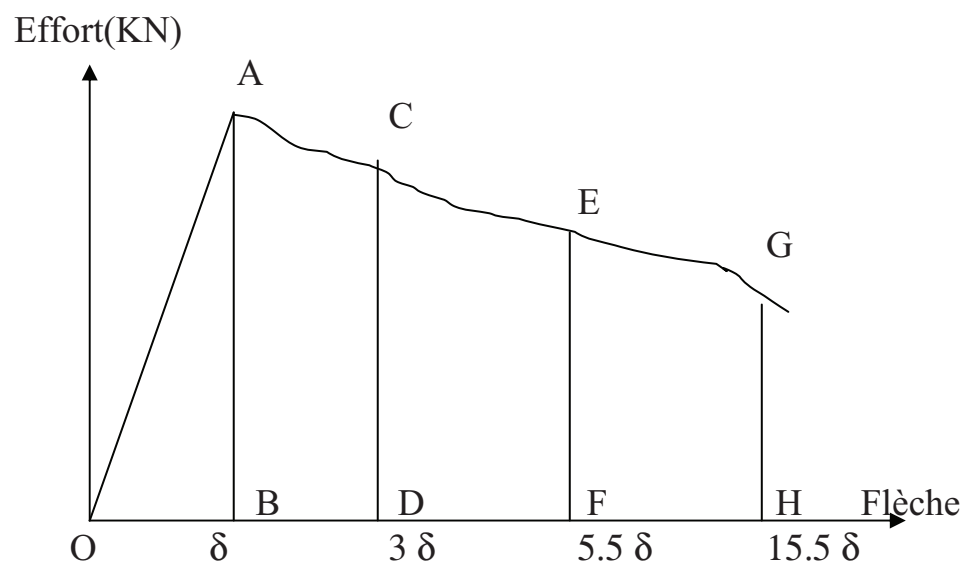
➤ 40 mm pour les éprouvettes 150 x 150 x450 mm

1.4.3.1.3 - La méthode Barr et al (U.K, 1982) définit l'indice de ténacité comme le Rapport entre l'aire OAB et l'aire OACD (figure1) dans cette méthode les éprouvettes Sont double tranchant, soumises à une force excentrée de compression.

1.4.3.1.4 - La méthode ASTM (1984) est développée depuis 1982 et basée sur le principe de ACI 544 Elle définit les indices appelés de ductilité (515,110,130) , égaux aux rapport des énergies absorbée jusqu'à la première fissuration (flèche est à \square).ce tableau indique les indices pour un matériau idéal élasto-plastique .

Tab. 1.1 Indices de ténacité

Indice de ténacité	Critère de déformation	Rapport des surfaces	Valeurs de l'indice de ténacité		
			Béton normal	Matériaux élasto -plastique	Valeurs observées pour béton de fibres
15	3δ	OACD/OAB	1	5	1-6
110	5.5δ	OAEF/OAB	1	10	1-12
130	15.5δ	OAGH/OAB	1	30	1-40

**Fig. 1.1** courbe de calcul de l'indice de ténacité

1.4.4 - Domaines d'application : [béton de fibre Pierre Rossi]

Par ses propres caractéristiques (renforcement homogène du béton, économie de la main d'œuvre, simplicité de mise en œuvre, comportement lors de la fissuration, sa ductilité), les bétons de fibres trouvent leur application dans plusieurs domaines. Parmi ces domaines on cite :

- Bâtiment
- Travaux publics
- Génie-civil autre que le bâtiment et travaux publics
- En dehors du génie-civil
- Cas particulier des bétons à ultra-hautes performances fibrés

1.4.4.1 -Le domaine du bâtiment :

Les utilisations actuelles des bétons de fibres métalliques dans le domaine du bâtiment concernent, principalement :

- Les dallages industriels en béton de fibres métalliques ; Paraît plus intéressant que le dallage non armé, car l'ajout de fibres permet de diminuer l'épaisseur et le nombre de joints du dallage.
- Les pieux forés à la tarière creuse ; Il est difficile d'introduire, sur une grande profondeur, une cage d'armature, souvent, les armatures touchent le sol à la périphérie du pieu, devant cette difficulté technique, les fibres métalliques se sont naturellement imposées, car étant, mises en place en même temps que le béton .
- les bétons projetés de réparation ; La corrosion des armatures de béton armé, peut conduire à l'éclatement de l'enrobage , ce qui augmente l'accélération de la corrosion des armatures qui ne sont plus protégées . Pour reconstituer le béton d'enrobage consiste à utiliser du béton projeté, le béton de fibres métalliques est alors une solution intéressante.
les voiles extérieurs de bâtiment en béton banché
les poutres et planchers en béton de fibres métalliques
les panneaux de façades et plus généralement les éléments minces
les dalles alvéolées.

1.4.4.2 - Le domaine des travaux publics

Les surfaçages des chaussées et des pistes aéroportuaires en béton
Les revêtements définitifs de tunnel en béton de fibres métalliques.
Les parois clouées
Les dalles de pont mixte.
Le renforcement des buses métalliques corrodées

1.4.4.3 - Génie-civil autre que le bâtiment et travaux publics

-Une application mise en œuvre in situ, pourrait être intéressante, de développer dans les années à venir : Il s'agit des aéro - réfrigérants de centrale nucléaire.

- préfabrication :

- L'utilisation des bétons de fibres métalliques dans les tuyaux d'assainissement, repose sur les raisons suivantes :rapidité de fabrication, diminuer l'épaisseur des tuyaux, éviter les investissements importants

- En dehors du génie-civil

Les fosses toutes eaux

Les séparateurs hydrocarbure

- Des bétons à ultra-hautes performances fibrés.

1.4. 5 - Recherches et travaux effectuées sur les bétons de fibres

Plusieurs chercheurs de différent pays effectuent des travaux dans le but d'atteindre des résistances performantes en incorporant des fibres dans la masse du béton afin d'améliorer certaines propriétés du béton faisant défauts et de promouvoir ce type de matériaux qui est le béton de fibres.

En cite parmi ces chercheurs :

Johanson. Hanager Barr .Pierre rossi. Casanova. Harrouch.

Porter(1910).Graham.Greiffith(1920).davidov A(1940).G Cconstantinesco(1943).

Au centre universitaire de M'sila

Des travaux de recherches ont été entrepris au niveau du centre universitaire de M'sila, ayant porté sur les comportements des bétons de fibres. Parmi ces travaux nous citons ceux de:

1. - Dr bibi Mekki.
2. – Dr Mohamed Bencheikh .
3. - Dr Miloud Beddar.
4. – Dr Tahar ayadat.
5. – Dr Larbi Belagraa.

1.4.6- Comportement à l'effort tranchant :

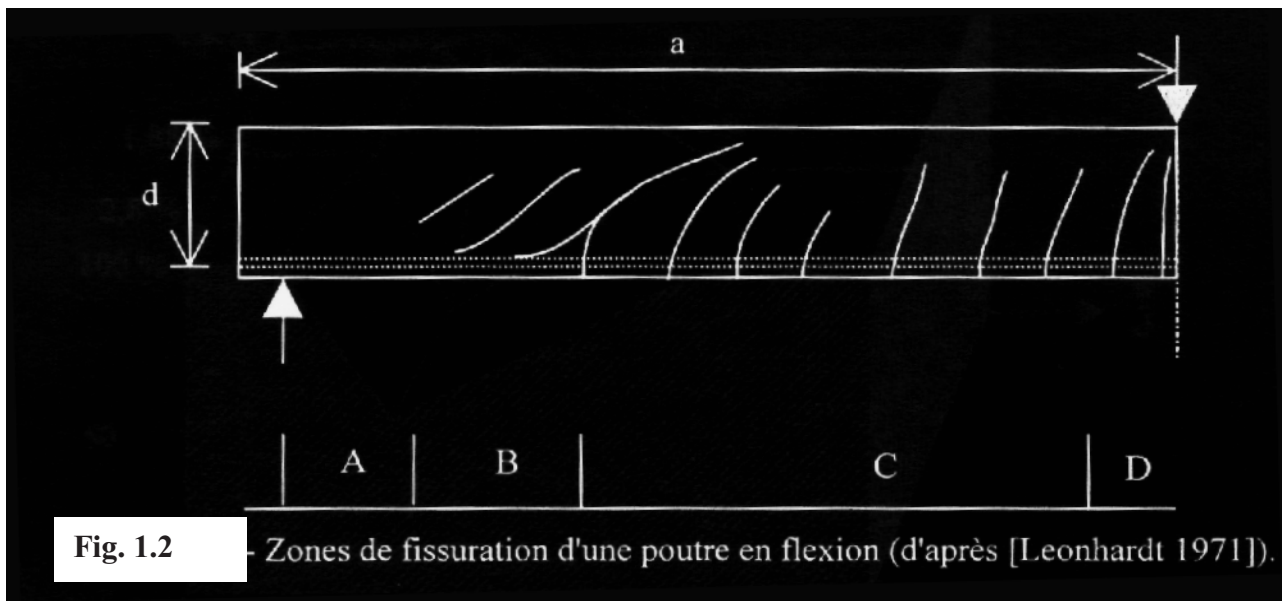
Afin de bien comprendre les mécanismes intervenant dans le comportement de l'effort tranchant, et de connaître le rôle et l'importance des fibres dans l'amélioration du béton vis à vis de certains défauts de celui-ci, nous nous pencherons avec intérêt sur les points de vues expérimentaux que nous jugeons intéressantes proposées par les chercheurs suivants :

Leonhardt 1971 :

Selon lui, il y a 4 zones distinctives :

- **Zone A** : au voisinage des appuis d'about ou, dans le cas hyperstatique aux environs du point de moment nul. Dans cette zone aucune fissures n'a été constatée jusqu'à rupture pour $a/d > 2.5$.
- **Zone B** : le moment est faible, et des fissure d'effort tranchant peuvent prendre naissance lorsque la contrainte principale de traction dépasse la résistance du béton. Leur inclinaison est comprise entre 20 et 30°. On observe rarement une rupture, sauf si le taux de ferrailage transversal est très faible.
- **Zone C** : les fissures se développent à partir des fissures de flexion avec une inclinaison comprise entre 40 et 70°. La rupture intervient en flexion par compression ou par plastification des armatures longitudinales.
- **Zone D** : moments élevés et efforts tranchants relativement faibles, il n'y a aucun danger de rupture par effort tranchant pour $a/d > 7$.

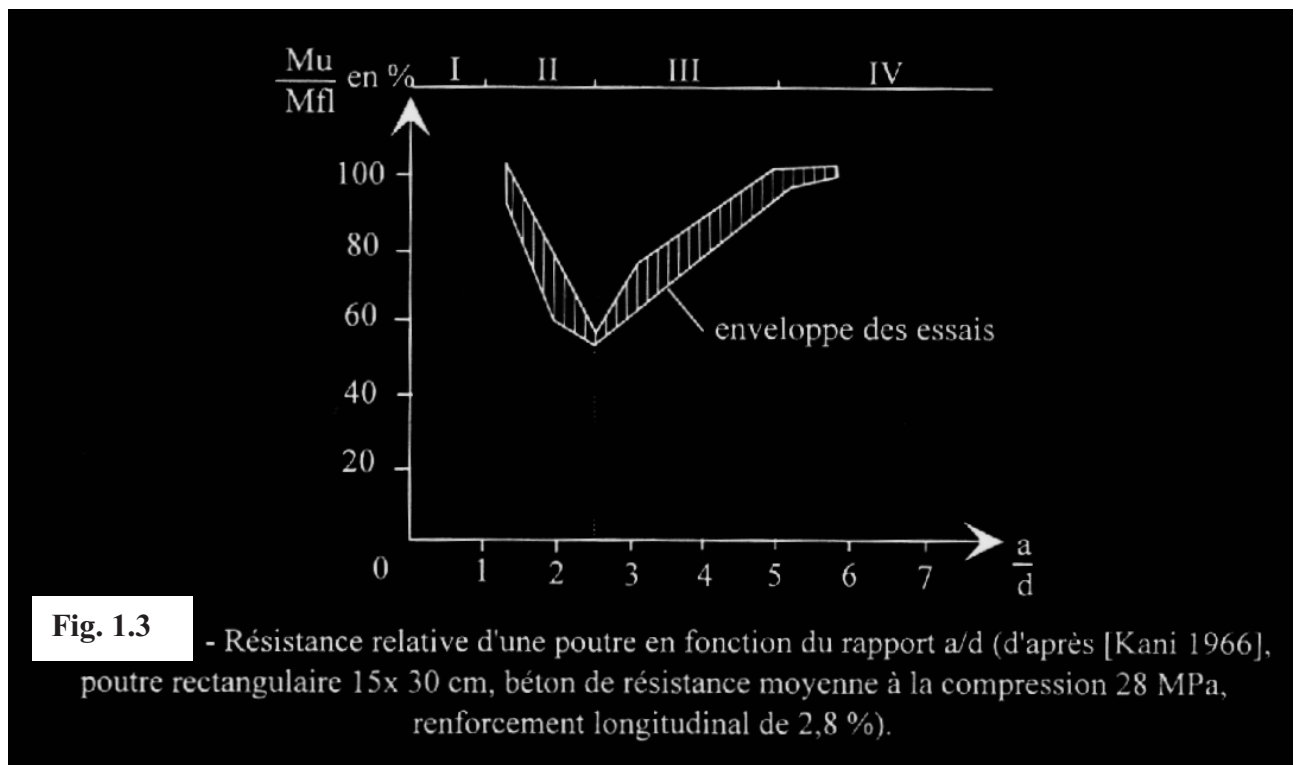
Les zones **B** et **C** sont délimitées par la résistance du béton en traction par flexion.



Kani 1966 :

A montré la pertinence de la description du comportement des poutre sans armature transversales sous l'action de l'effort tranchant représenté par un diagramme appelé « la vallée de Kani » (M_u/M_{fl})- (a/d) selon lequel il définit 4 zones en fonction du type de rupture :

- **Zone I** cisaillement « direct » (rupture par fendage transversal du point d'appui au point de chargement).
- **Zone II** et **III** ruptures par effort tranchant.
- **Zone IV** ruptures par flexion.



Chapitre II

Essais et expérimentations

2.1 Matériaux et matériels

2.1.1 compositions du béton :

2.1.1.1 définitions :

Le béton est constitué par un mélange intime de matériaux inertes, appelés « granulats » (sables, graviers etc....) avec du ciment et de l'eau, grâce à l'action du ciment le mélange ainsi obtenu, appelé « béton frais » commence à durcir après quelques heures et acquiert progressivement ses caractères de résistance.

2.2 - ciments

2.2.1 - classification et qualité du ciment :

Le ciment utilisé est généralement de classe Portland, avec ou sans constituants secondaires. La qualité du ciment doit être définie par indication de la résistance à la compression obtenue à 28 jours sur mortier normal, est exprimée en kgf/cm² ou en Mpa, cette résistance est appelée communément «résistance vraie du ciment », et est obtenue par essais de compression à 28 jours d'âge, sur des éprouvettes cubiques de dimensions de 5x5x5 avec un mortier de sable, avec un sable dit normal, confectionnées et conservées dans les conditions normales du laboratoire. La connaissance de la résistance vraie du ciment, nous permet de connaître la résistance sur laquelle nous pouvons compter (résistance désirée), cette dernière, permettra dans une certaine mesure de répondre à l'exigence du client.

On distingue généralement :

- Les ciments « portland » sans constituants secondaires.
- Les ciments « portland » avec constituants secondaires, tels que les laitiers, les cendres, pouzzolanes etc.
- Les ciments spéciaux tels que les ciments sur sulfatés ou alumineux.

Les qualités des divers ciments sont variables ; les résistances obtenues à la compression sur éprouvettes de mortier normal à 28 jours, présentent en moyenne les ordres de grandeur suivants :

- Ciment Portland à haute résistance initiale..... 400 kgf/cm².
- Ciment Portland normal avec ou sans constituants secondaires:
 - à haute résistance.....325 kgf/cm².
 - Ordinaire.....250 kgf/cm².
- ciment sur sulfaté
 - à haute résistance 325 kgf/cm².
 - A durcissement rapide...575 kgf/cm².

2.2.2 - Choix du ciment :

La classe et la qualité du ciment doivent être choisies en fonction de la nature de l'ouvrage à construire, de ses caractères structurels, de sa destination et des diverses qualités requises, compte tenu notamment des circonstances climatiques et locales : temps chaud, temps froid, présence d'eau agressive etc.....

2.2.3 - Stockage du ciment :

Le ciment peut être stocké, soit en sacs, soit en vrac dans des silos. Le stockage doit être effectué à l'abri des intempéries et notamment de l'humidité. L'emmagasiner des sacs doit être systématiquement organisé, de manière à éviter que certains sacs soient consommés avec un retard excessif et ne subissent ainsi un vieillissement exagéré..

2.3 - Granulats :

2.3.1- Classification granulométrique :

La classe granulométrique d'un granulat (sables, graviers), est définie par deux dimensions d et D qui correspondent respectivement au plus petit et au plus gros des grains constituant ce granulat.

Les granulats peuvent être subdivisés d'après les catégories suivantes :

- Fines (farines ou fillers)<0.08 mm.

Sables

- Fins.....0.08 à 0.315 mm
- Moyens.....0.315 à 1.25 mm
- Gros.....1.25 à 5 mm

Graviers

- Petits.....5 à 8 mm
- Moyens.....8 à 12.5 mm
- Gros.....12.5 à 20 mm

Cailloux

- Petits.....20 à 31.5 mm
- Moyens.....31.5 à 63 mm
- Gros.....63 à 100mm

2.3.2 - Les modules de finesse :

Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100 de la somme des refus exprimés en pourcentage, sur les tamis de la série suivante :

$$0.080 - 0.160 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.50 - 5 - 10 - 20 - 40 - 80.$$

Le calcul du module de finesse, est plus souvent utilisé pour les sables, c'est une caractéristique importante dans le proportionnement du béton.

Le module de finesse des sables utilisables se présente comme suit ;

A..... de 2.20 à 2.80 sables préférentiels.

B..... de 1.80 à 2.20 sables un peu trop fins.

C..... de 2.80 à 3.20 sables un peu trop grossiers.

La zone A est la des sables préférentiels, pour la quelle on peut conférer au béton , une meilleure résistance et une bonne maniabilité .

La zone B est la zone des sables un peu trop fins conférant au béton une bonne maniabilité au détriment de la résistance.

La zone C est la zone des sables un peu trop grossiers, engendrent des difficultés de mise en œuvre, qui peuvent provoquer des chutes de résistance, par apparition de ségrégations profondes

2.3.3 - Spécifications pour les granulats :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Refus sur le tamis de maille } D \\ \text{Tamisât sur le tamis de maille } d \end{array} \right\} \begin{array}{l} \leq 15 \quad \% \quad \text{si } D \leq 1.56 \quad d \\ \leq 20 \quad \% \quad \text{si } D > 1.56 \quad d \end{array}$$

Le refus sur le tamis, de $1.56d = 0$

$$\text{Le tamisât sous tamis, de maille } 0.63 : \left\{ \begin{array}{l} - < 3\% \text{ si } D > 5\text{mm.} \\ - \leq 5\% \text{ si } D \leq 5\text{mm.} \end{array} \right.$$

Si $d < 0.5 \text{ mm}$ le granulat est dit 0/D.

2.3.4 - Granularité :

La granularité du granulat, est définie par sa courbe granulométrique, déterminée par analyse au moyen de tamisages successifs, cette courbe doit être intérieure à un fuseau fixé a priori et définissant la granularité admissible du granulat.

Sable :

Tab 2.1 Fuseaux de spécification des sables

Ouverture des tamis (mm)	Branche inférieure (%)	Branche supérieure (%)
0.08	0	4
0.160	2	10
0.315	9	29
0.63	28	60
1.25	48	80
2.50	70	92
5.00	96	100

Tab 2.2 Fuseaux de spécification Gravier 6.3/25

Ouverture des tamis (mm)	Branche inférieure (%)	Branche supérieure (%)
6.3	0	0
10	6	49
20	40	95
25	100	100

Tab 2.3 Fuseaux de spécification Gravier 10 à 16 mm

Ouverture des tamis (mm)	Branche inférieure (%)	Branche supérieure (%)
6.30	0	0
10	28	49
16	32	88
20	80	95
25	100	100

2.3.5 - Dimension maximale :

La dimension maximale D des granulats, doit rester inférieure, d'une part à l'espace libre horizontal entre deux armatures (ou entre une armature et le coffrage), d'autre part au quart (1/4) de l'épaisseur de la pièce à bétonner.

Il y a toujours intérêt à utiliser des granulats de dimension maximale élevée, compte tenu des dimensions de la pièce à bétonner, des formes des coffrages, de la densité des ferrillages, etc.

2.3.6 - Propreté :

Les granulats employés, doivent être propres, exempts de toutes matières étrangères, telles que : scories, charbon, gypse, débris de bois, feuilles mortes, matières organiques etc.

Les graviers et cailloux doivent être exempts de gangues argileuses, ou terreuse adhérente. Les sables doivent être exempts de fines argileuses et satisfaire à l'essai dit « Equivalent de sable : ES. La valeur optimale souhaitable dans le cas d'une mesure visuelle de l'Equivalent de sable est : $75 \leq ES \leq 85$.

On agite dans une éprouvette une certaine quantité de sable dans une solution lavant à base de chlorure de calcium ; glycérine et formaldéhyde, on laisse reposer 20 minutes et l'on mesure à la règle la hauteur du niveau supérieur du flocculat (eau trouble) et celle du dépôt du sable h2.

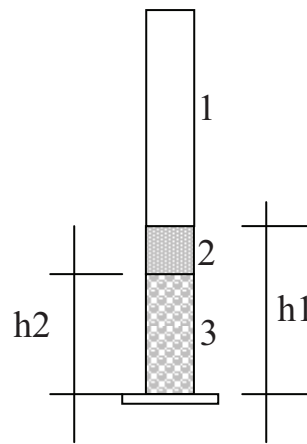


fig. 2.1 essais d'équivalent de sable

1 _ Eau claire.

2 - Floculat (eau trouble)

3 – Sable.

On a $ES = 100 \frac{h2}{h1}$ à vue.

Tab 2.4 Propreté des sables :

ES	Commentaire
$ES < 60$	Sable argileux risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour les bétons de qualité.
$65 \leq ES < 75$	Sable légèrement argileux, de propreté admissible pour les bétons de qualité courante, à moins de craindre particulièrement le retrait.
$75 \leq ES < 85$	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses, convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité, valeur optimale à vue 75.
$ES > 85$	Sable très propre l'absence presque totale des fines argileuses, risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton, qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

2.3.7 - Nature et forme :

Comme granulat, on doit utiliser, soit des sables, graviers et cailloux naturels, soit des produits de concassage de roches appropriées. Il faut éviter notamment d'employer des roches trop friables ou trop tendres (comme certains calcaires) ou se décomposant à l'air (comme certains porphyres) ou par hydratation (comme certains schistes). Par contre on peut utiliser après concassage, certains laitiers de hauts fourneaux.

Pour ce qui est de la forme géométrique, il faut éviter d'employer des graviers en forme de « plats » ou « d'aiguille ».

Dans le choix de la nature des granulats, on doit s'efforcer, dans la mesure du possible d'obtenir d'une part une dureté satisfaisante (qui conditionne celle du béton) ; d'autre part une adhésivité suffisante de la pâte du ciment (qui est également indispensable à la résistance). En effet la rupture du béton est due généralement ; soit, à la rupture du granulat, soit à la rupture de l'adhérence de la pâte de ciment au granulat.

2.3.7.1 - Forme :

La forme géométrique des granulats présente également une grande importance, ils peuvent être concassés (obtenus par concassage et criblage de roches en morceaux) ou roulés (obtenus par simple criblage de matériaux alluvionnaires naturels).

Les matériaux concassés présentent parfois des formes défectueuses (plats et aiguilles), ils doivent alors être évités, car ils conduisent à des bétons peu maniables, manquant de compacité et présentant souvent au décoffrage des surfaces défectueuses.

On définit le coefficient de forme d'un granulat comme le rapport entre la somme des volumes V des grains et la somme des volumes des sphères circonscrite à chaque grain.

$$\frac{\sum V}{\frac{\pi}{6} \sum d^3} \quad (2.1)$$

Une valeur courante de ce coefficient est de 0.20, il est recommandé de ne jamais descendre au-dessous de 0.15.

2.3.8 - Qualité :

2.3.8.1 - Coefficient granulaire :

Le coefficient granulaire nous renseigne sur la qualité des granulats du point de vue résistance, à savoir, que le béton tire une grande partie de sa résistance des granulats ; en particulier de la part des plus gros.

Le coefficient granulaire est exprimé par la formule suivante :

$$G = 0.045 \sqrt[3]{R_c \frac{\omega^2}{M_a^2}} + 0.126 \quad (2.2)$$

Où :

- R_c , est la pression en kg/cm^2 atteint au maximum, lors de l'enfoncement de 20 mm en 135 secondes, d'un piston dans un cylindre de 100 cm^2 de section et 10 cm de hauteur, rempli de granulats, on prend la moyenne de trois essais, après avoir vérifié que la masse des granulats nécessaire pour remplir le cylindre, ne varie pas plus de 5 %, il est à noter, que dans les recommandations allemandes, le temps d'enfoncement est de l'ordre de 100 secondes.

R_c varie : De 40 à 70 kg/cm^2 pour les granulats légers.

De 45 à 550 kg/cm^2 pour granulats ordinaires.

- ω est la masse spécifique du granulat sec

- M_a est la masse volumique apparente en vrac du granulat.

Tab 2.5 Valeurs approximatives du coefficient granulaire « G »

Qualité des granulats	Dimensions des granulats		
	Fins $D \leq 16$ mm	Moyens $25\text{mm} \leq D \leq 40$ mm	gros $D \geq 63$ mm
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

2.4 - Eau de gâchage :

L'eau de gâchage doit être propre et ne pas contenir plus de 5 g par litre de matière en suspension (vases, limons etc.) ni plus de 35 g par litre de matières et de sels solubles, sous réserve que les sels dissous ne risquent pas de nuire à la conservation des bétons (acides, sulfates, sels corrosifs, matières organiques).

2.5- Dosages :

2.5.1 - dosage du ciment :

Sauf justification spéciale et accord du maître de l'œuvre, le dosage en ciment doit être compris entre 250 et 450 kg par mètre cube de béton en œuvre. Pour les ouvrages courants de béton armé, le dosage de ciment doit atteindre 350 kg/m³. Pour les ouvrages de béton armé nécessitant des qualités particulières d'étanchéité, de compacité, ainsi que pour les ouvrages de béton précontraint, ce dosage doit atteindre 450 kg/m³.

Le dosage d'un béton peut être étudié par l'une des nombreuses méthodes théoriques ou expérimentales ; une telle étude aboutit à une formule qui fixe dans chaque cas, les quantités de chacun des constituants (y compris l'eau) devant entrer dans la composition d'un mètre -cube de béton en œuvre.

Le dosage est dit « volumétrique » si les quantités sont indiquées en volume et « pondéral » si les quantités sont indiquées en poids, ce qui est préférable.

2.5.2 - dosage des granulats :

Le dosage des granulats est défini par proportions en volume ou, de préférence, en poids des différents granulats entrant dans la composition d'un mètre-cube de béton mis en œuvre. La détermination de ces proportions doit faire l'objet d'une étude expérimentale particulière, à moins que le constructeur en dispose, pour des matériaux analogues utilisés dans des conditions identiques, de règles pratiques sûres et confirmées par une longue expérience de ces matériaux.

La proportion relative de sable et de gravier, doit être telle que le béton présente une homogénéité satisfaisante, sans aucun risque de ségrégation.

2.5.3 - Dosage de l'eau et plasticité :

Le dosage en eau (eau totale) est fixé pour les granulats secs et pour un mètre-cube de béton en œuvre. Si les granulats employés contiennent une certaine quantité d'eau, cette quantité, eau d'apport doit être évaluée et déduite de l'eau totale prévue ; on obtient ainsi l'eau à ajouter lors du malaxage. Le dosage en eau doit être suffisant pour que le béton présente la plasticité compatible avec une bonne ouvrabilité, mais il ne doit pas être excessif car les résistances du béton diminuent quand le dosage en eau augmente, on ne doit jamais, à la sortie du malaxeur, rajouter de l'eau jugé trop sec.

La plasticité désirée peut être définie par la mesure au cône d'Abrams (« slump test »). Le dosage en eau d'un béton peut et ne doit être défini qu'en fonction de la plasticité désirée. Il n'y a aucune théorie qui, ayant permis de calculer a priori le dosage théorique de l'eau.

2.6 - Affaissements :

0 à 2 cm béton ferme.
3 à 7 cm béton plastique.
8 à 15 cm béton mou.

La quantité d'eau totale étant ainsi définie, on doit tenir compte, lors de l'exécution, de l'eau d'apport des granulats et de la déduire de l'eau totale pour trouver la quantité d'eau à ajouter au malaxeur, la quantité d'eau d'apport peut être importante dans certains cas ; par exemple à titre indicatif ; on obtient dans les cas de granulats Silico-calcaire.

Tab 2.6 Teneurs en eau apparente dans les granulats

Degré apparent d'humidité	Eau d'apport en l/m ³			
	Sable 0/5	Gravillon 5/16	Gravier 16/25	Gravier 5/27
Apparence				
Sèche	10-20	5	Négligeable	Négligeable
Humide	30-60	20-30	5-15	10-20
Très humide	80-120	40-60	20-40	30-50
Saturée	120-150	70-90	50-60	60-75

2.7 - Essais de résistance du béton :

Les essais ont pour but d'évaluer et de contrôler la résistance en compression et la résistance en traction du béton., ces essais peuvent avoir deux buts distincts :

2.7.1 - Contrôle :

Les essais de contrôle, ont pour but de contrôler la résistance intrinsèque du béton à sa fabrication, indépendamment des conditions ultérieures de transport, de mise en œuvre, de vibration, de cure et de conservation.

Les essais de contrôle sont réalisés sur des éprouvettes prélevées au malaxeur, et conservées dans les conditions normalisées, ils permettent notamment de vérifier les caractères intrinsèques.

2.7.2 - information :

Les essais d'information ont pour but d'évaluer, avec la meilleure approximation possible la résistance du béton de l'ouvrage pour des raisons pratiques, telle que la durée de décoffrage.

2.7.3 - Prélèvement des échantillons :

Le prélèvement doit permettre d'obtenir des échantillons fidèlement représentatifs du béton.

1 - Pour les essais de contrôle, il doit être réalisé à la sortie du malaxeur, au milieu du déchargement de la gâchée.

2 - pour les essais d'information, il doit être réalisé sur le lieu de mise en place, au moment du déchargement du béton, et constitué au minimum par trois prises, en des points distincts, loin des bords de la masse qui peuvent être particulièrement ségrégués.

Les prélèvements de béton doivent représenter au moins une fois et demie le volume du béton fabriqué, les prélèvements peuvent être remalaxés, si nécessaire, sur une surface non absorbante, de façon à assurer l'homogénéité du béton prélevé. Le prélèvement doit être protégé avec soin de la pluie et du soleil.

2.7.3.1 - Moules des éprouvettes :

Les moules pour éprouvettes d'essais doivent être fabriqués en matière non absorbante et doivent être suffisamment rigides pour ne subir aucune déformation durant la confection des éprouvettes. Le fond et le bord supérieur de ces moules ne doivent s'écarter de plus de 0.05 mm d'un plan de contact. L'angle formé par leur fond et leurs parois ne doit pas présenter un écart de plus de 0.5° par rapport à l'angle droit. Les assemblages doivent être étanches et être enduits légèrement d'huile minérale.

2.7.3.2 - Nombre d'éprouvettes :

Chaque prélèvement de contrôle, doit comporter six éprouvettes cylindriques, dont trois doivent subir l'essai d'écrasement pour la mesure de la résistance à la compression et trois pour l'essai de fendage pour la mesure de la traction, le nombre et la cadence des prélèvements de contrôle doivent être fixés par le maître de l'œuvre ; compte tenu du volume de l'ouvrage, de la cadence du bétonnage, des caractères exigés pour le béton. A titre indicatif six éprouvettes et 200m³.

2.7.3.3 - Confection et conservation des éprouvettes :

S'il s'agit d'essais de contrôle, les éprouvettes fabriquées avec du béton prélevé au malaxeur doivent être conservées 24 heures dans leurs moules munis d'un couvercle, et dans une enceinte à la température de $20^{\circ} \pm 4^{\circ}\text{C}$. après démoulage elles doivent être conservées dans de l'eau à une température de $20^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ou à défaut dans l'air à une température de $20^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et à un degré hygrométrique de 95 % au moins.

S'il s'agit d'information le béton doit être prélevé en son lieu d'emploi, et les éprouvettes conservées dans les conditions aussi proche que possible que celle de l'ouvrage.

Dans les deux cas le serrage du béton en une ou plusieurs couches doit être réalisé par piquage, damage ou vibration selon le mode utilisé pour l'ouvrage lui-même.

2.8 - Processus d'essais :

Les essais doivent être réalisés sur une machine d'essai, dûment vérifiée et étalonnée, de manière continue et sans choc, l'erreur sur les charges dans l'intervalle de chargement ne doit dépasser $\pm 1\%$. La machine d'essai doit être équipée d'un plateau à rotule sphérique dont le centre doit coïncider approximativement avec le centre de chargement supérieur de l'éprouvette.

2.8.1 - L'âge du béton lors des essais :

Pour les essais de contrôle l'âge du béton lors des essais est fixé à 28 jours, pour les essais d'information, l'âge sera celui auquel on désire connaître la résistance atteinte.

2.8.2 - Essais d'écrasement :

(mesure de la résistance du béton à la compression)

Les faces de chargement des éprouvettes qui s'écartent de plus de 0.05 mm d'un plan de contact doivent être surfacées ou rectifiées de manière à présenter une surface plane normale à l'axe à moins de 0.5° L'éprouvette doit être centrée entre les plateaux de la presse et la mise en charge doit s'effectuer à vitesse constante, de telle manière que l'accroissement de la charge provoque une augmentation de contrainte de $6 \pm 4 \text{ kgf/cm}^2/\text{seconde}$.

2.8.3 - essai de fendage :

(mesure de la résistance du béton à la traction)

Les éprouvettes sont placées entre les plateaux de la presse, le long de deux génératrices opposées (vitesse de chargement $< 0.5 \text{ kgf/s}$).

2.8.4 - essai de flexion :

(mesure de la résistance à la traction par flexion)

Les éprouvettes prismatiques sont essayées avec une portée égale à trois fois le côté de leur section carrée, elles sont placées de préférence dans une position transverse par rapport à celle qu'elles avaient dans le moule lors de leur coulage. La charge peut être appliquée suivant le même processus que pour l'essai de fendage.

2.9 - Etude de composition de béton.

2.9.1 - L'analyse granulométrique :

2.9.1.1 - Utilité :

L'analyse granulométrique est une opération qui nous permet d'identifier un matériau.

L'analyse granulométrique permet aussi, de déterminer la grosseur minimale «d» et la grosseur maximale «D» des matériaux entrant dans la composition du béton.

La connaissance de la grosseur de grains de granulats dans la composition du béton, est nécessaire, pour pouvoir les combiner dans les meilleures conditions.

L'allure de la courbe granulométrique, permet de faire apparaître certaines propriétés des matériaux, utiles pour l'analyse.

Les CPS et CPC dans la partie fourniture, précisent, les caractéristiques des matériaux à prévoir dans le mélange du béton pour l'exécution des travaux. En général ces dernières sont définies relativement à la granulométrie, par une courbe granulométrique «minimale» et par une courbe granulométrique «maximale», qu'on nomme communément branche inférieure et branche supérieure, qui délimitent ainsi un fuseau qu'on appelle fuseau de spécification.

L'opérateur ou l'utilisateur, devra vérifier que les matériaux, qu'il utilise sont bien conformes aux spécifications et normes en vigueur.

L'analyse permet aussi de calculer le module de finesse du matériau, en particulier celui du sable, qui est un facteur important dans une étude de composition de béton.

2.9.1.2 - Matériel nécessaire pour l'analyse granulométrique :

- Une balance de 15 à 30 kg de portée, pesant à 5 gr près.
- Une balance de 2 ou 5 kg de portée, pesant à 1 gr près.
- Des bacs et plateaux, pour recueillir les matériaux.
- Un appareil pour sécher les matériaux (étuve ou brûleur à gaz).
- Une série de tamis ou passoires.
- Echantillonneur.

NB :

Pour un tamis, le module est égal au module algébrique arrondi + 1.

Pour la passoire, le module est égal au module algébrique arrondi.

Le module algébrique arrondi : c'est le produit par 10, arrondi à l'entier le plus proche du logarithme décimal de la dimension exprimée en micromètre.

Exemple :

Tamis ou p étapes à entreprendre pour assoire de 2 mm

$$2 \text{ mm} = 2000$$

$$\log(2000) = 3,30103$$

$$10\log(2000) = 3.30103 \times 10 = 33.0103, \text{ arrondi à } 33 \text{ (module passoire) pour le module tamis : } 33+1 = 34$$

les séries de tamis, utilisés dans l'opération de tamisage sont les suivants:

$$0.080 - 0.160 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.50 - 5 - 10 - 20 - 40 - 80.$$

2.9.1.3 - Choix de l'échantillon :

L'échantillon, prélevé doit être représentatif, on procèdera à l'échantillonnage à l'aide d'un échantillonneur, sur des prélèvements issus du tas, soit :

10 kg en bas du tas.

10 kg au sommet du tas.

20 kg dans la masse du tas.

En mélange le tout, et on constituera par opération de quartage successifs, de telle façon à obtenir des échantillons pour essais :

Sable 2000 g.

Gravillons 3000 g.

Graviers 5000 g.

2.9.1.4 - Séchage de l'échantillon :

Le séchage s'effectue à l'étuve, pendant 12 à 24 heures à température constante soit (80 °c) jusqu'à ce que le poids de l'échantillon ne varie plus, ensuite, le peser soit Ps le poids de l'échantillon sec.

2.9.1.5 - Classement des tamis :

On classe les tamis par ordre de dimension d'ouverture de tamis croissante, on inscrit la série de tamis sur une feuille d'essai ; le matériau est versé à la partie supérieur de la colonne, on agite l'ensemble pour faire passer, le matériau à travers les tamis ainsi empilés sur une tamiseuse jusqu'à ce qui ne passe plus d'éléments à travers les différents tamis.

2.9.1.6 - Pesage :

Les matériaux retenus sur chaque tamis, sont les refus successifs en poids, le pesage se fait par cumul, c'est à dire ; on pèse le premier refus à partir du plus grand tamis, le deuxième refus sera rajouté au premier, et ainsi de suite jusqu'à atteindre le poids total de l'échantillon. Dans la feuille d'essai, on porte :

- 1- Les refus cumulés en pourcentage.
- 2- Les passants cumulés en pourcentage.

Tab 2.7 Feuille d'essai

Tamis Mm	Sable 0/5		Gravier 3/8		Gravier 8/15	
	Refus %	Tamisât %	Refus %	Tamisât %	Refus %	Tamisât %
20.00					0.00	100.00
16.00					0.65	99.35
12.50			0.00	100.00	6.60	93.40
10.00			1.00	99.00	61.40	38.60
5.00	0.00	100.00	40.00	60.00	98.00	2.00
2.50	1.01	98.99	92.20	7.80	99.00	1.00
1.25	7.12	92.88	100.00	0.00	100.00	0.00
0.63	14.18	85.82				
0.315	50.68	49.32				
0.160	96.55	3.45				
0.080	100.00	0.00				

Module de finesse du sable : $M_f = 1.70$

2.9.1.7 - Tracement de la courbe :

Pour le tracement de la courbe on se sert des passants cumulés, sur l'axe des abscisse on porte les dimensions des ouvertures des tamis, sur l'axe des ordonnées le pourcentage des tamisât.

- les refus cumulés nous permettrons de déterminer les modules de finesse des granulats, plus particulièrement ceux des sables, dans notre cas le module de finesse du sable est de 1,70.

Fig. 2.2 ANALYSE GRANULOMETRIQUE "Courbe partielle du sable"

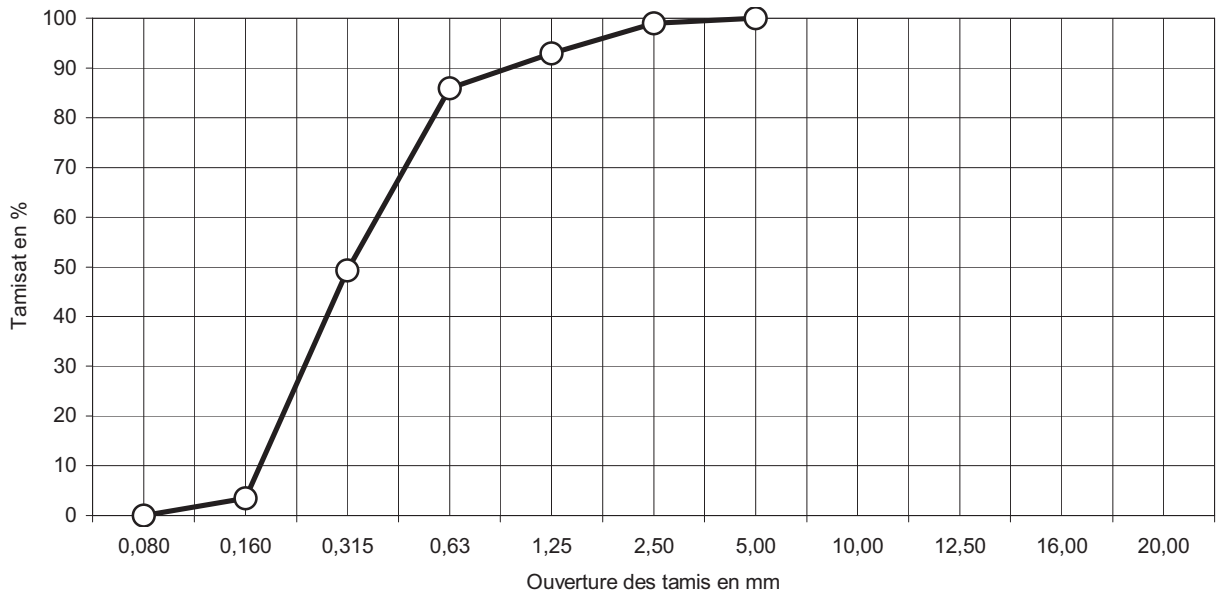
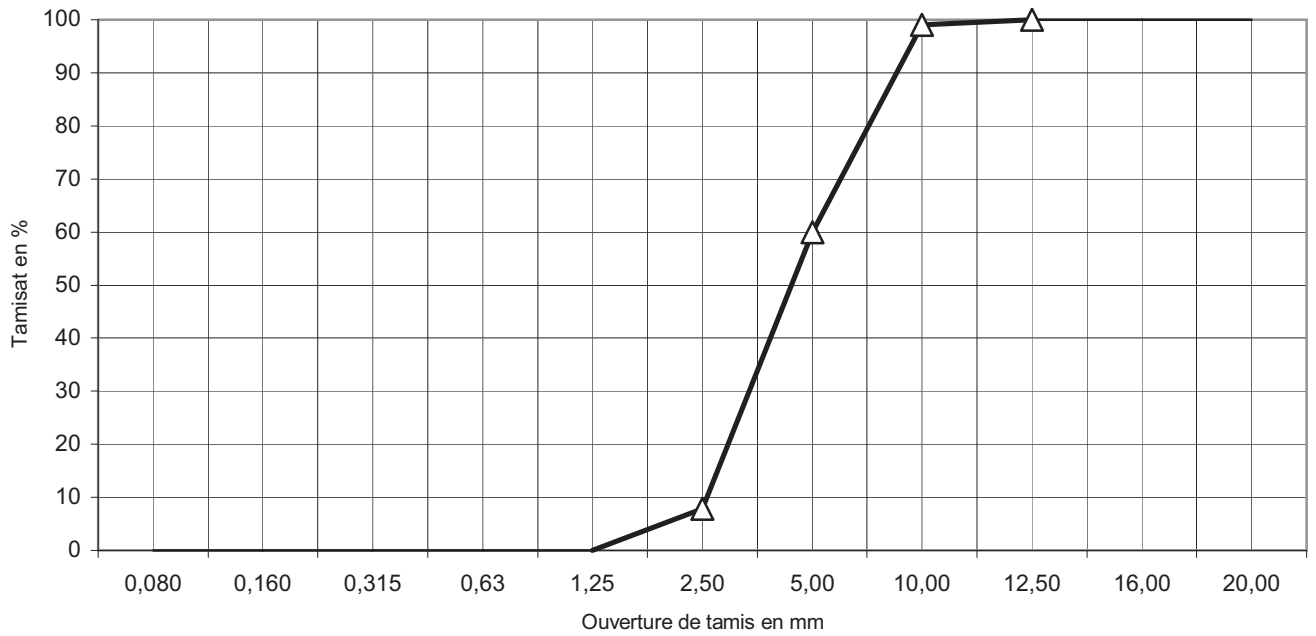


Fig. 2.3 ANALYSE GRANULOMETRIQUE " Courbe partielle du gravier 3/8"



Courbe 4.3 ANALYSE GRANULOMETRIQUE "Courbe partielle du gravier 8/15

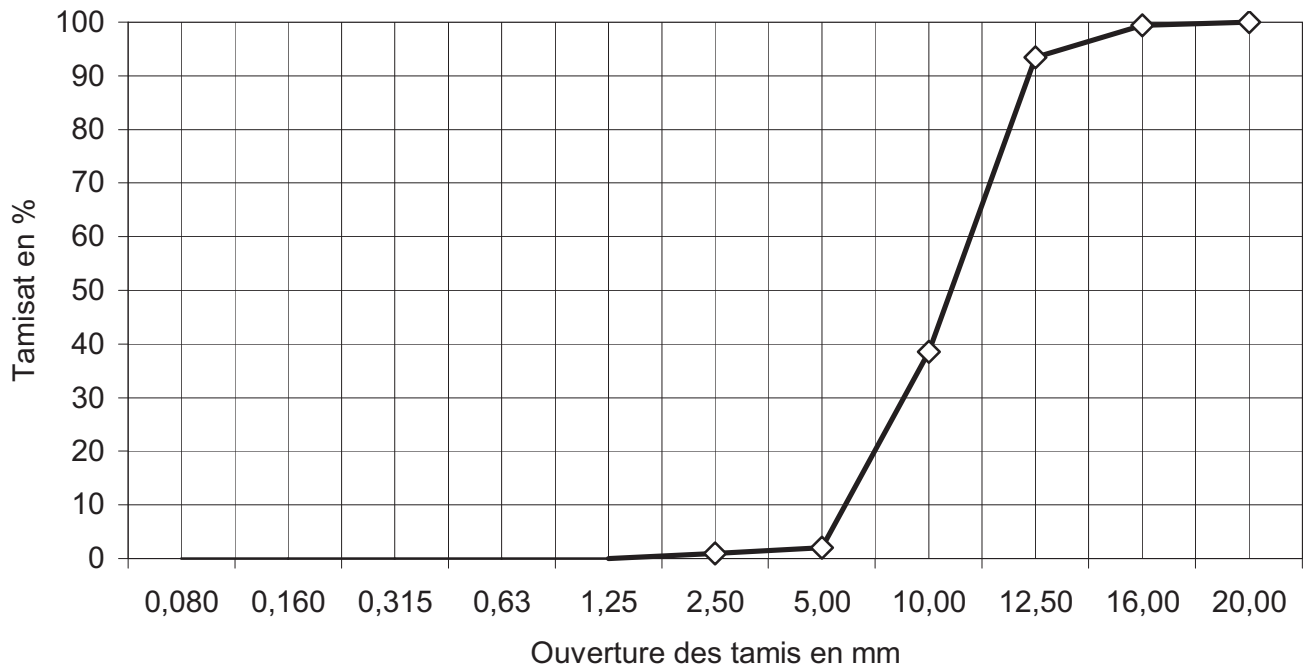
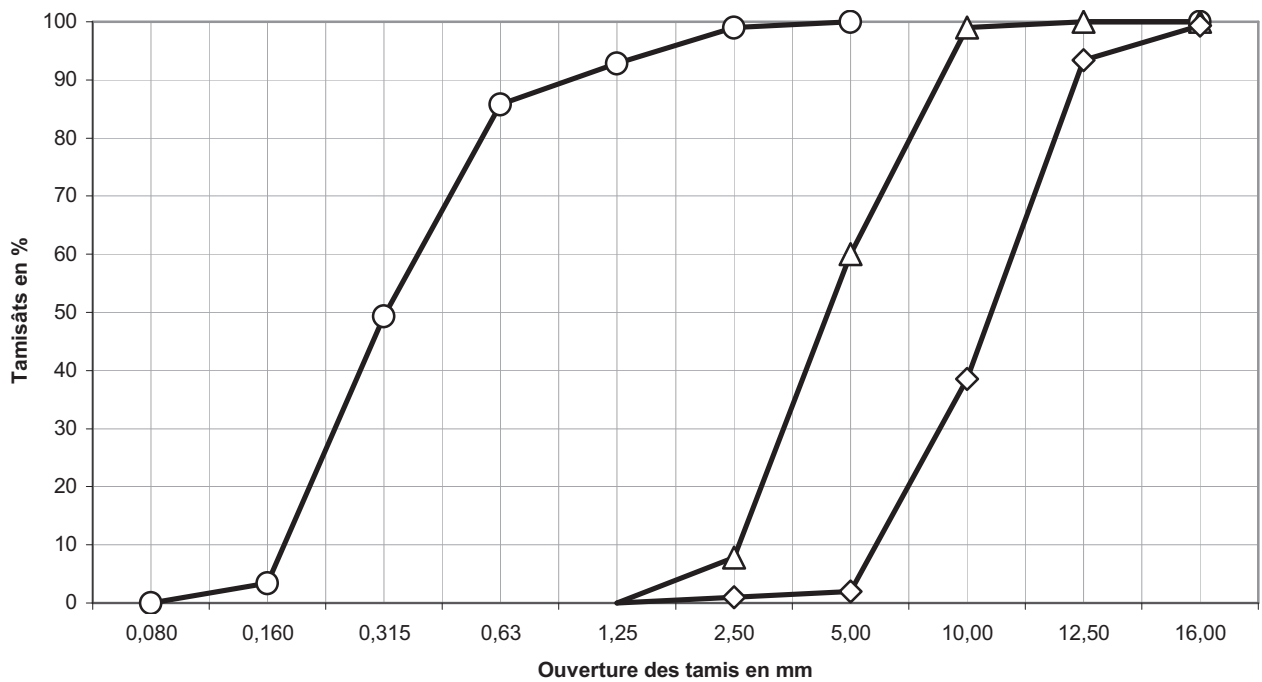


Fig. 2.5 Courbes partielles regroupées



2.10 - Propreté : NF P.18-301

2.10.1 - Propreté des graviers :

L'essai de propreté des graviers s'effectue de la façon suivante :

- on prend dans un récipient une certaine quantité de matériau, non lavé, on le dessèche et on le pèse ; soit P1 par exemple, puis on le lave à grand eau, dans le même récipient (en frottant les grains les un contre les autres), les impuretés sont éliminées par trop-plein d'eau on arrête lorsque l'eau sera claire, on égoutte, on dessèche à nouveau, on repèse soit P2 le poids de l'échantillon après lavage.
- La masse des impuretés est alors :

$$P = P1 - P2 \quad (2.3)$$

Soit en, pourcentage d'impureté :

$$\frac{P1 - P2}{P2} = \frac{P}{P2} \% \quad (2.4)$$

2.10.2 - Propreté des sables :

L'essai qui permet de déterminer la propreté des sables, porte le nom d'équivalent de sable (ES)

2.10.2.1 - Equipement pour équivalent de sable :

- Eprouvettes en plastiques portant deux repères(un repère inférieur et un repère supérieur).
- Récipients pour mesure de l'échantillon à tester.
- Tamis de 5 mm d'ouverture.
- Récipient de 10 litres pour contenir la solution lavante, muni d'un tuyau et pipettes de lavage.
- Bouchon en caoutchouc.
- Règle métallique graduée.
- Petit maillet en matière plastique souple pour éliminer les bulles d'air.
- Entonnoir.
- Agitateur électrique.
- Piston muni d'un contre poids.

2.10.2.2 - Mode opératoire :

- 1 – on remplit l'éprouvette de solution lavante jusqu'au trait inférieur.
- 2 – A l'aide du récipient de mesure, on introduit le prélèvement dans l'éprouvette par l'intermédiaire de l'entonnoir, on laisse pendant dix minutes, la solution lavante agir .
- 3 – Ensuite on agite l'éprouvette à l'aide de l'agitateur électrique à raison de 90 cycles, après avoir fermé avec le bouchon en caoutchouc.
- 3 – Laver le sable et le bouchon avec précaution jusqu'à atteindre le trait supérieur.
- 4 – Laisser reposer pendant 20 mn.
- 5 – mesure à vue la hauteur h1 (sable + flocculat), h2 (hauteur du sable propre).

Cadence des essais : au nombre de 3.

Tab 2.8 Résultats des équivalents de sable

ES à vue			ES piston		
h1 en cm	h2 en cm	ES %	h1 en cm	h2 en cm	ES %
11.70	9.00	76.90	11.70	8.60	73.50
12.00	9.50	79.00	12.00	8.90	74.20
11.90	9.30	78.00	11.90	8.00	67.20
ES moyen à vue		78.00%	ES moyen piston		71.60%

2.10.2.3 - Spécifications :

- Equivalent de sable :

* à vue ES = 78 %.

* au piston ES = 72 %. (Sable propre convenant bien pour des bétons de qualité).

Sable :

- module de finesse MF = 1,70 : sable trop fin.

Gravier 3/8 :

Refus sur tamis de 8 mm : 8% (aucun excès)

Passant sur tamis de 3 mm : 30% (excès de 15% d'éléments inférieurs à 3 mm)

Gravier 8/15 :

Refus sur tamis de 15 mm : 3% (aucun excès)

Passant sur tamis de 8 mm : 28% (excès de 13% d'éléments inférieurs à 8 mm)

2.11 - Essais Los Angeles : NFP.18 - 573

Le but de cet essai est de mesurer la résistance à la fragmentation d'un échantillon de granulat.

2.11.1 - Principe de l'essai :

Le principe consiste à mesurer la quantité d'éléments passant à travers un tamis de 1.6 mm, produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés, dans la machine « Los Angeles », le matériau testé appartient à la classe granulaire 10/14 mm dans ce cas le nombre de boulets et leur masse sont respectivement 11 et 445 g soit environ une masse totale des boulets égale à 4840 g

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par chocs s'exprime par la quantité :

$$100 \frac{m}{M} \quad (2.5)$$

Cette quantité sans dimension est appelée par définition coefficient Los Angeles du matériau.

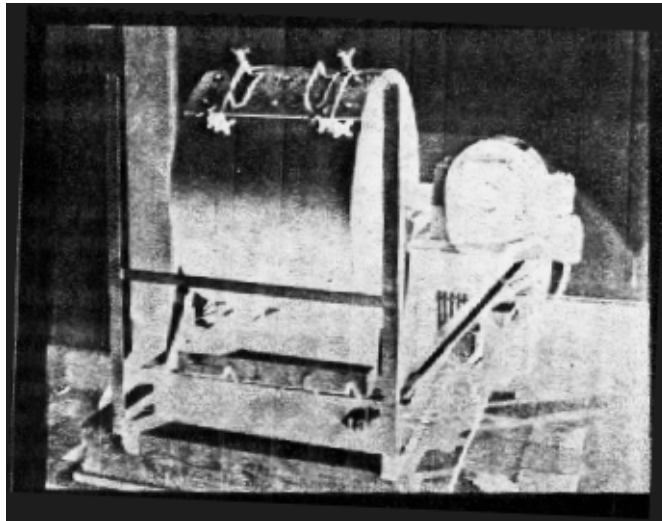


Fig. 2.6 Appareil Los Angeles

2.11.2 - Mode opératoire :

- Tamisage de l'échantillon à sec.
- Lavage de du matériau et son séchage à l'étuve à 105 °c jusqu'à masse constante.
- La masse de la prise d'échantillon pour essai est de 5000 g.
- Introduction avec précaution la charge de boulets au nombre de 11, puis l'échantillon.
- Faire effectuer à la machine 500 rotations à vitesse régulière (30 tr /mn)
- Recueillir le granulat
- Tamiser le matériau sur le tamis de 1,6 mm.
- Laver le refus au tamis de 1,6 mm égoutter et sécher à l'étuve à 105 °c jusqu'à masse constante, soit, m' le résultat de la pesée.

Où :

$$m = 5000 - m' \quad (2.6)$$

Pour le matériau utilisé, le coefficient Los Angeles est de l'ordre de : 24,80 %
Valeurs recommandées pour les granulats destinés pour les bétons de génie-civil doivent être inférieures à 35. [6]

2.12 - Etude de composition de béton :

Méthode fuller pour la détermination des proportions de granulats adoptée dans l'étude « méthode analytique ».

Sur un graphique dont les abscisses sont graduées selon une échelle logarithmique (graphique normalisé) ; les ordonnées comporteront les pourcentages des tamisats cumulés, sur le même graphique figure un fuseau, dans lequel les grains de granulats doivent entrer à l'intérieur pour 95 % au moins.

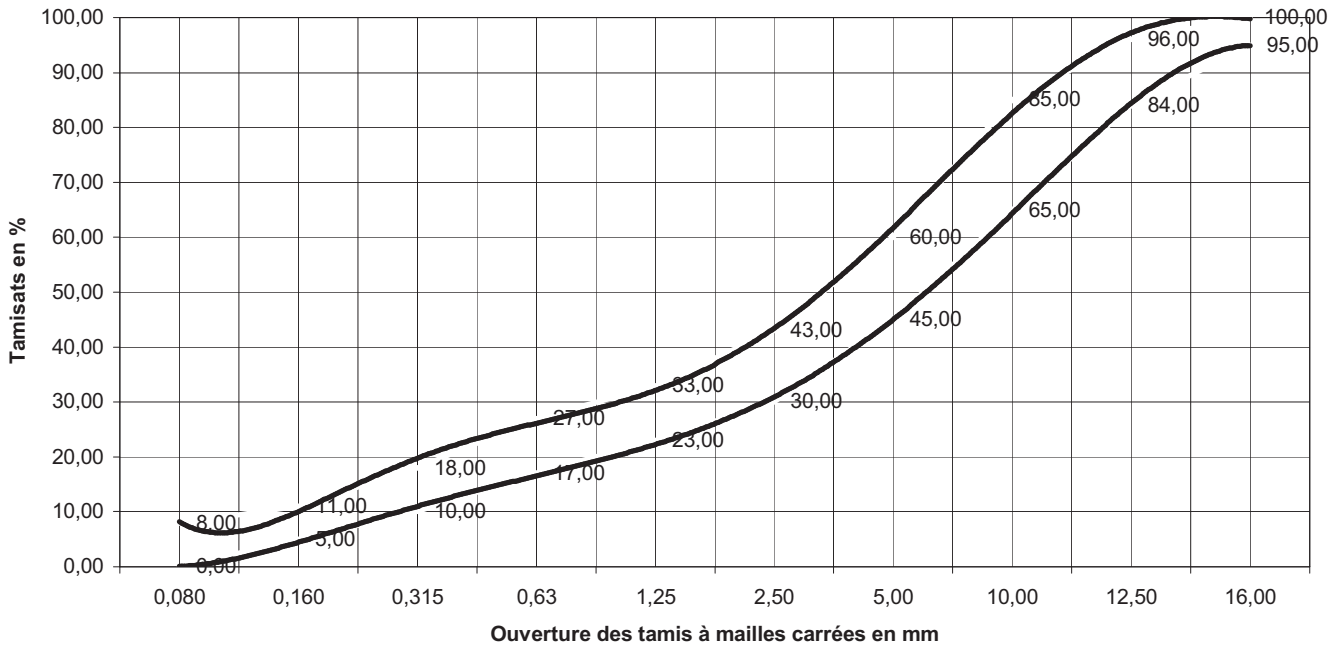
Le choix des proportions de chaque matériaux, devant entrer dans le mélange du béton, se réalise par rapprochement, d'une part en se basant sur l'expérience en observant particulièrement le sable, par analyse de son module de finesse, sachant que ce dernier conditionne en grande partie la qualité du béton pour ce qui est la résistance et de l'ouvrabilité, d'autre part, sur l'allure des courbes partielles des fgranulats (voir spécifications des granulats chapitre III).

Le module de finesse, nous renseigne, sur l'ouvrabilité que pourra avoir le béton :

- Un sable de tendance fine « sable un peu trop fin », implique une bonne ouvrabilité du béton au détriment de la résistance, dans ce cas là on aura intérêt de baisser le pourcentage de sable sans toute fois aller en dessous de 15%.
- Un sable de tendance grosse « sable un peu trop grossier » confère au béton une perte d'ouvrabilité et des résistances élevées, avec en général des risques de ségrégations, dans ce cas là on augmente le pourcentage du sable afin de relever la courbe, toute fois sans excéder 45%.
- La valeur moyenne de la proportion de sable, pour un module de finesse préférentiel peut aller de 25 à 35 %.

2.12.1 -Fuseau de spécification des mélanges

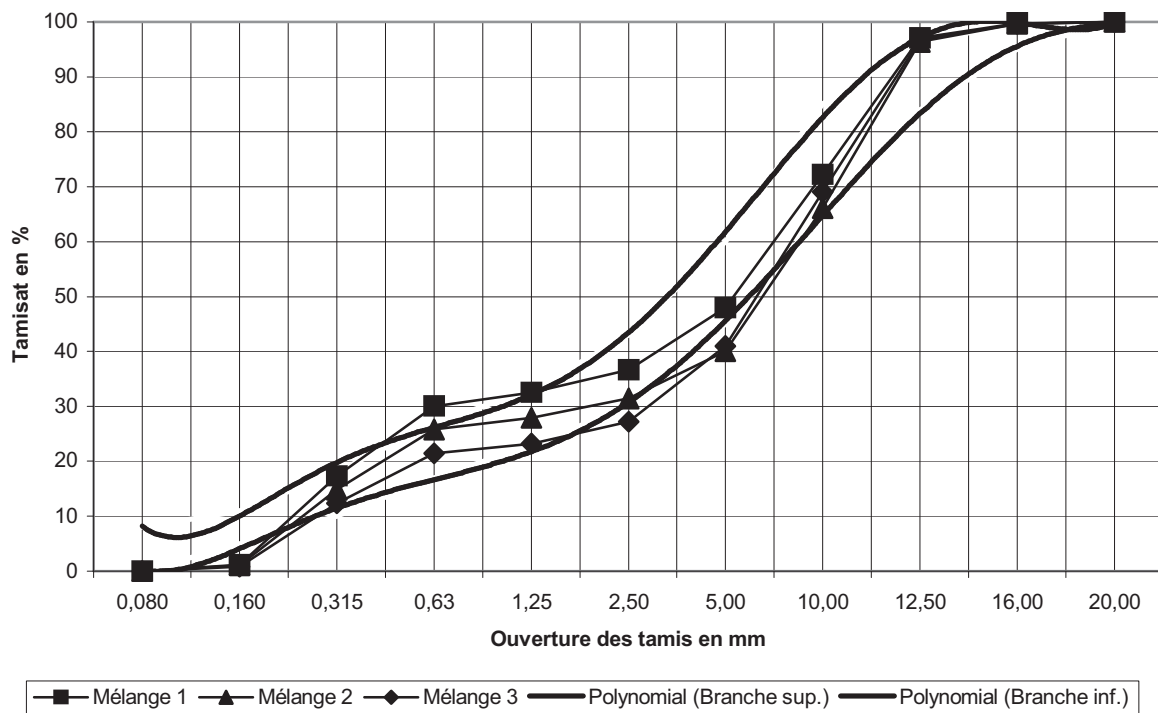
Fig. 2.7 ANALYSE GRANULOMETRIQUE "Fuseau de spécification pour Dmax 16 mm"



Tab 2.9 Feuille de détermination des proportions des mélanges.

Tamis mm	Tamisâts			mélange 1				mélange 2				mélange 3			
	sable 0/5	gravier 3/8	gravier 8/15	35%	20%	45%	100%	30%	15%	55%	100%	25%	25%	50%	100%
0,080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,160	3,45	0,00	0,00	1,21	0,00	0,00	1,21	1,04	0,00	0,00	1,04	0,86	0,00	0,00	0,86
0,315	49,32	0,00	0,00	17,26	0,00	0,00	17,26	14,80	0,00	0,00	14,80	12,33	0,00	0,00	12,33
0,63	85,82	0,00	0,00	30,04	0,00	0,00	30,04	25,75	0,00	0,00	25,75	21,46	0,00	0,00	21,46
1,25	92,88	0,00	0,00	32,51	0,00	0,00	32,51	27,86	0,00	0,00	27,86	23,22	0,00	0,00	23,22
2,50	98,99	7,80	1,00	34,65	1,56	0,45	36,66	29,70	1,17	0,55	31,42	24,75	1,95	0,50	27,20
5,00	100,00	60,00	2,00	35,00	12,00	0,90	47,90	30,00	9,00	1,10	40,10	25,00	15,00	1,00	41,00
10,00	100,00	99,00	38,60	35,00	19,80	17,37	72,17	30,00	14,85	21,23	66,08	25,00	24,75	19,30	69,05
12,50	100,00	100,00	93,40	35,00	20,00	42,03	97,03	30,00	15,00	51,37	96,37	25,00	25,00	46,70	96,70
16,00	100,00	100,00	99,35	35,00	20,00	44,71	99,71	30,00	15,00	54,64	99,64	25,00	25,00	49,68	99,68
20,00	100,00	100,00	100,00	35,00	20,00	45,00	100,00	30,00	15,00	55,00	100,00	25,00	25,00	50,00	100,00

Fig. 2.8 ANALYSE GRNULOMETRIQUE "Mélange"



Pourcentages retenus (correspondant au mélange 1): voir tableau ci-dessus

Sable 0/5 : 35%.

Gravier 3/8 : 20%.

Gravier 8/15 : 45%.

2.12.2 - Calcule des quantités :

1.12.2.1 - Détermination du dosage en ciment :

$f^c = 270 \text{ kgf/cm}^2 = 27 \text{ MPA}$ (résistance spécifiée).

$f_{cr} = 270(1+0,15) = 310 \text{ kgf/cm}^2 = 31 \text{ MPA}$ (résistance désirée).

0,15 - représente le coefficient de variation attendu pour une probabilité de 80%.

$$f_{cr} = G \cdot \sigma_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad (2.7)$$

(Formule de Bolomey)

$G = 0.55$ (coefficient granulaire, voir chapitre III)

$\sigma'_c = 450$, classe de résistance de ciment utilisée comme résistance vraie.

Rapport C/E :

$$\frac{C}{E} = \frac{fcr}{G\sigma'_c} + 0.50 \quad (2.8)$$

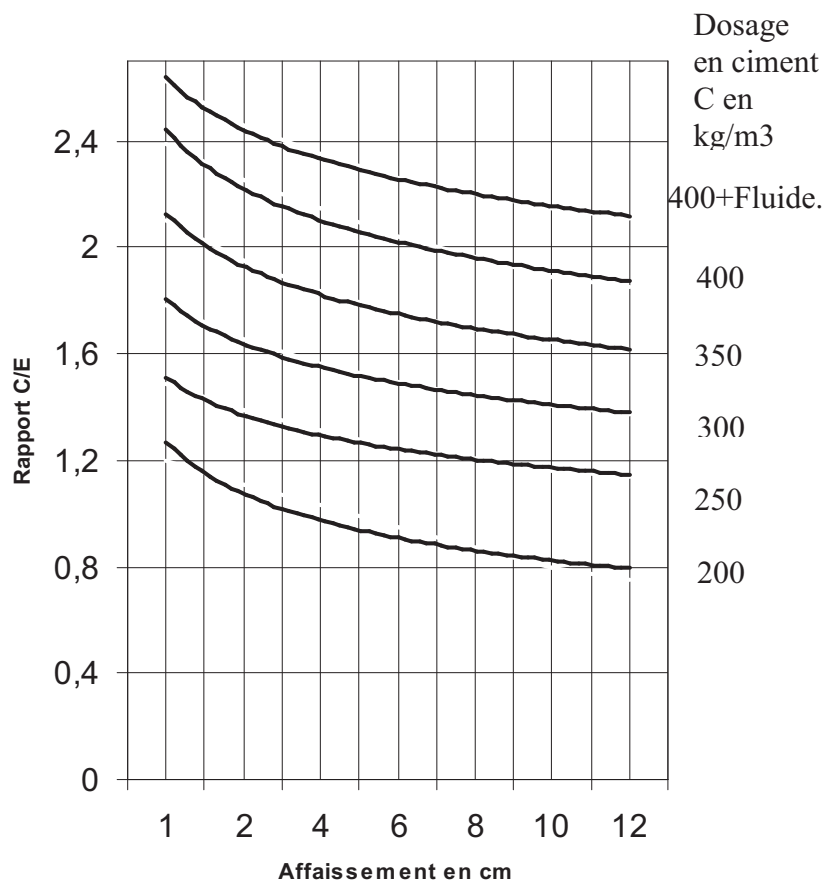
$$C/E = 1.75$$

Affaissement théorique choisi : 8 ± 1 cm.

Quantité de ciment :

La quantité de ciment est déterminée en fonction de l'affaissement théorique choisi et le rapport C/E selon l'abaque ci-dessous :

Fig. 2.9 Abaque permettant d'évaluer le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée



La quantité de ciment est environ 360 kg/m³ de béton en œuvre.

2.12.2.2 - Dosage en eau :

$E=C/(C/E) = 360/1.75 = 206$ l/m³ de béton en œuvre.

2.12.2.3 - Quantité des granulats :

$V_t = V_g + V_c + V_e + V_v = 1.000$ litres.

Nous supposons, que le volume des vides est négligeable.

$V_g = 1000 - (P_c/\gamma_c + P_e/\gamma_e)$.

D'où $V_g = 678$ l (volume absolu des granulats).

Avec :

$\gamma_c = 3,1$ poids spécifique du ciment.

$\gamma_e = 1$ poids spécifique de l'eau.

$\gamma_g = \gamma_s = 2.65$ poids spécifique des graviers et sables.

Poids total des granulats :

$P_g = 678 \times 2.65 = 1797$ kg.

Quantités pour un m³ de béton en œuvre :

Sable	1797 x 35%	= 629 kg
Gravier 3/8.....	1797 x 20%	= 360 kg
Gravier 8/15.....	1797 x 45%	= 809 kg
Ciment.....		= 360 kg
Eau.....		= 206 L

Densité théorique du béton : $\Delta_0 = 2,364$.

Quantité pour une gâché en fonction de la capacité du malaxeur (40 litres) :

Sables	25,16 kg
Gravier 3/8.....	14,40 kg
Gravier 8/15.....	32,36 kg
Ciment.....	14,40 kg
Eau.....	8,24 litres

NB : ce mélange nous a permis de confectionner 24 éprouvettes de dimension de 7x7x28.

2.12.2.4 - Quantité de fibres pour :

- 1% = 780 g.
- 2% = 1560 g.
- 3% = 2340 g.

2.13 - Essai d'ouvrabilité (NF P.18-451)

L'essai le plus simple et le plus utilisé, est l'essai au cône d'Abrams ou slump test.

2.13.1 - Matériel :

- Cône de 20/10/30 cm.
- Embase métallique.
- Portique.
- Tige de piquage de 16 mm de diamètre.
- Entonnoir de remplissage.
- Règle métallique graduée.
- Règle à araser.

2.13.2 - Mode opératoire :

Le remplissage se fait en quatre couches, tassées avec la tige de piquage, à raison de 25 coups par couche, on arase, on soulève ensuite le moule conique avec précaution et on mesure l'affaissement au moyen de la règle graduée.

Tab 2.10 Résultats d'affaissement.

1 ^{er} mélange	2e mélange	3e mélange	4e mélange
6.50 cm	8.00 cm	7.00 cm	7.30 cm

2.14 - Confection des éprouvettes et essais

2.14.1 - Préparation des échantillons :


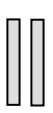


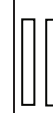

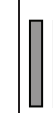




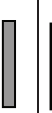






























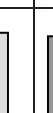





Nous avons préparé quatre mélanges de béton, chaque mélange fut divisé en quatre parties égale (4 quartiles) par opération de quartage.

De chaque quartile d'un mélange, nous avons confectionné des éprouvettes prismatiques (7X7X28) au nombre de six (06), dosées respectivement à : 0% (béton témoin), 1%, 2% et 3% de fibres, soit 24 éprouvettes par mélange (6X4=24).

Chaque quartile, a permis d'obtenir une série de deux éprouvettes pour les âges : 7, 14 et 28 jours.

L'ensemble des mélanges, nous ont donné des éprouvettes au nombre de 96, soit 24 éprouvettes par type de béton ou encore huit (08) éprouvettes par type et âge de béton.

Tab 2.11 Préparation et organisation des éprouvettes pour essais

Age du béton	Mélange 1				Mélange 2				Mélange 3				Mélange 4			
	T	1%	2%	3%	T	1%	2%	3%	T	1%	2%	3%	T	1%	2%	3%
7 j																
14 j																
28j																

De la totalité des mélanges, nous avons préparé des séries d'éprouvettes, chacune des séries, comporte deux prélèvements que nous définissons comme un essai.

2.14.2 - Essais entrepris :

2.14.2.1 - Essais destructifs :

2.14.2.1.1 - Résistance à la traction :

Dreux-Gorisse, Paragraphe 3.12, chap.2 « composants et propriétés des bétons », page 86 à 88

Notation : la résistance à la traction à 28 jours est désignée par ft_{28} , plusieurs essais peuvent être réalisés.

- a) En traction directe, la mesure se fait par mise en traction de cylindres identiques à ceux utilisés pour la compression, mais l'essai est assez délicat car il nécessite, après sciage des extrémités, le collage des têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite.

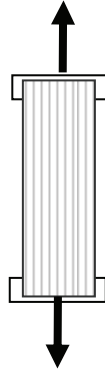


Fig. 2.10 Traction directe

- b) En traction par fendage, l'essai consiste à écraser un cylindre en béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse ; cet essai est souvent appelé essai brésilien.

Si P est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre, par mise en traction du plan radial vertical, la résistance en traction sera

$$f_{tj} = 2 \frac{P}{\pi DL}$$

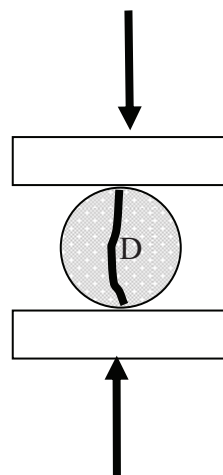


Fig. 2.11 Essai brésilien

- c) En traction par flexion, c'est l'essai le plus couramment utilisé, il consiste à rompre en flexion une éprouvette prismatique de côté a et de longueur $4a$, pour une charge totale P , le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est :

$$M = \frac{Pa}{2} \quad (2.9)$$

la section a pour module d'inertie :

$$\frac{I}{v} = \frac{a^3}{6} \quad (2.10)$$

et la contrainte de traction correspondante est :

$$ft_j = \frac{Mv}{I} = \frac{6M}{a} \quad (2.11)$$

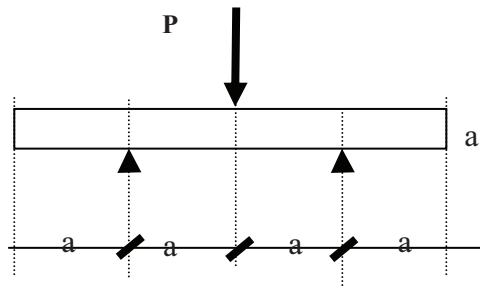


Fig. 2.12 Traction par flexion

Toute fois, la comparaison des résistances obtenues en traction-flexion avec les résistance mesurées en traction directe ou par fendage, montre, que ces dernières sont en général et en moyenne inférieures de 40% environ par rapport aux premières, ceci peut s'expliquer par la plastification du béton dans la phase de pré-rupture; Ne sont plus valables les lois de l'élasticité qui donnent:

$$(2.12) \quad ft_j = \frac{6M}{a} \quad (\text{Proportionnalité des contraintes et des déformations})$$

on affecte donc d'un coefficient de 0,60 les valeurs trouvées en traction-flexion et le calcul se fait dans ce cas par la formule suivante :

$$ft_j = \frac{3,6M}{a} \quad (2.13)$$

l'essai utilisé pour la détermination des contraintes de traction est l'essai de « traction par flexion »,

2.14.2.1.1.1 - Appareil utilisé :

L'appareil ayant servi pour l'essai de traction par flexion, se compose de :

- 1- Un cadran sur lequel figurent 3 échelles de charge (12, 120 et 12000 KN) précisions 0,002 – 0,02 – 0,2 KN.
- 2- Régulateur de vitesse (vitesse recommandée 1.6 bars/s)
- 3- Manette d'admission d'huile hydraulique.

2.14.2.1.1.2 - Mise à charge :

- 1 - Les éprouvettes sont tout d'abord retirées de leur conservation, et séchées pendant une heure à l'air.
- 2 – pesées.
- 3 – l'éprouvette étant placée sur deux points d'appuis distant de 14 cm « 2a » et chargée en son milieu par une charge concentrée « P » jusqu'à rupture, avec une vitesse de chargement constante égale à 1.6 bars par seconde.

2.14.2.1.2 - Essais de compression :

Les moitiés des éprouvettes issues de l'essai de traction par flexion, nous ont servi pour l'obtention des résistances à la compression aux différents âges et avec les différents dosages de fibres.

Cette opération nous permet de connaître la résistance du béton à la compression qui corrélée avec les essais non destructifs « indices sclérométriques, ultrason » pour information et exploitation.

2.14.2.1.2.1 - Appareil utilisé :

Presse hydraulique se composant de :

- 1 – cadran de mesure (portée 1500 KN).
- 2 – régulateur de vitesse (3 KN/s).
- 3 – Manette d'admission d'huile.

2.14.2.1.2.2 - Mise à charge :

La moitié de chaque éprouvette subit tout d'abord une charge de 40 KN maintenue à ce niveau pour prise d'impact des indices sclérométriques « essais non destructifs » en nombre suffisant, ensuite le chargement étant poursuivi jusqu'à rupture.

2.14.2.2 - Essais non destructifs :

Les précédés non destructifs permettent de contrôler les bétons en évitant d'avoir recours aux carottages longs et coûteux, et pas toujours réalisables, de même dans certaines circonstances,

lorsque les éprouvettes font défauts. Il est intéressant de pouvoir ausculter directement l'ouvrage, afin de ne pas être gêné par le problème de la représentativité des éprouvettes. [1].

2.14.2.2.1 - Essais sclérométriques : NF P.18-417

Le scléromètre, est le plus connu des appareils pour un contrôle rapide du béton. Appliqué sur une face de la partie de l'élément à ausculter par une pression de la main, il permet à une petite masse mobile de rebondir en fonction de la dureté superficielle du béton. Un repère gradué indique la valeur de rebondissement. Une relation assez nette existe entre cette dureté superficielle et la résistance du béton.

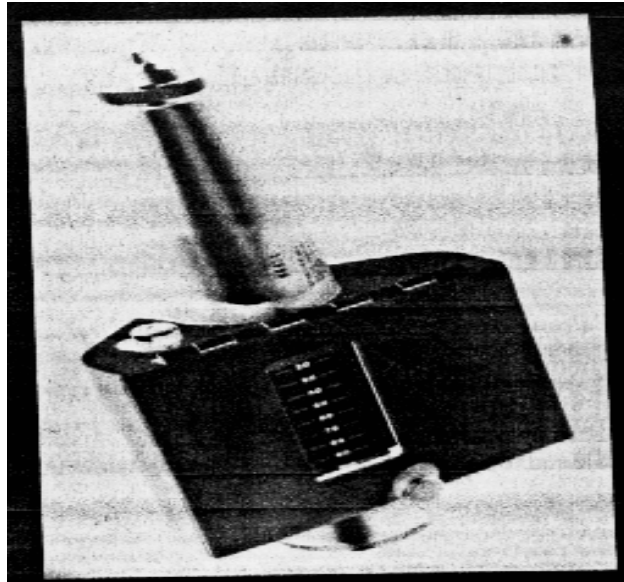


Fig. 2.13
Scléromètre

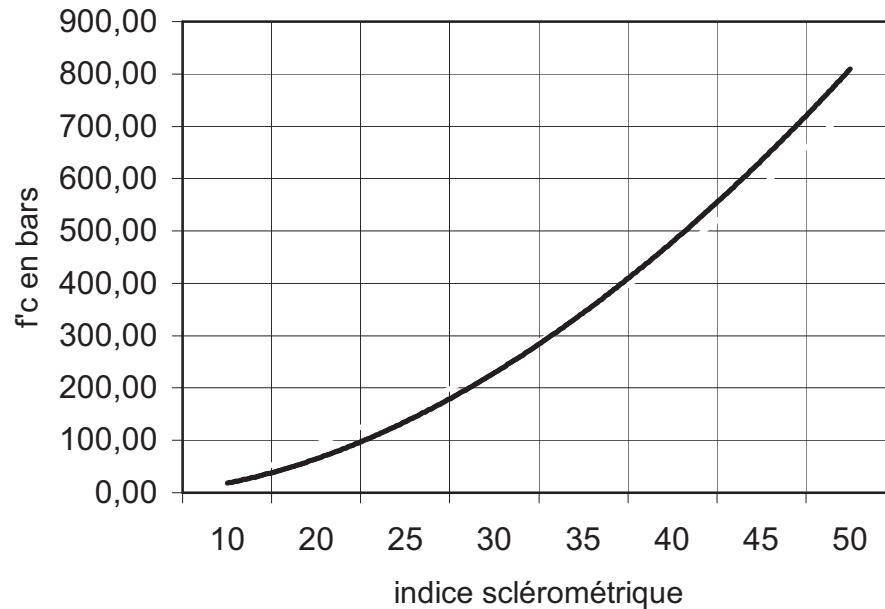
Relation

$$f^c = I^2/3 - 2I \quad (2.14)$$

Avec :

f^c résistance à l'écrasement.
I indice sclérométrique.

Fig. 2,14 relation entre indice sclérométrique et résistances du béton



règles à observer :

- Réglage régulier de l'appareil par étalonnage.
- Opérer avec un nombre de points mesure suffisant.
- Eliminer les valeurs aberrantes.
- Poncer la surface du béton à tester.
- Noter l'état d'humidité du béton.
- Se servir de l'appareil dans sa position horizontale.
- Bien noter les épaisseurs auscultées (phénomène de résilience pour les faibles épaisseurs)
- Réalisation d'un étalonnage préalable de l'appareil avec le type de béton à réaliser.

2.14.2.2.2 - Auscultation dynamique par vitesse du son :

Le principe utilisé est celui de la mesure du temps de propagation t des ondes longitudinales dans le béton, émises par un ébranlement. Connaissant la distance d parcourue par les ondes on en déduit une vitesse égale :

$$V = \frac{1}{t}d \quad (2.15)$$

Cette vitesse étant souvent exprimée en m/s avec une précision de 10^{-6} seconde.

Comme une certaine corrélation existe entre la vitesse du son et la résistance, on peut apprécier la valeur de la résistance du béton, avec des étalonnages préalables.

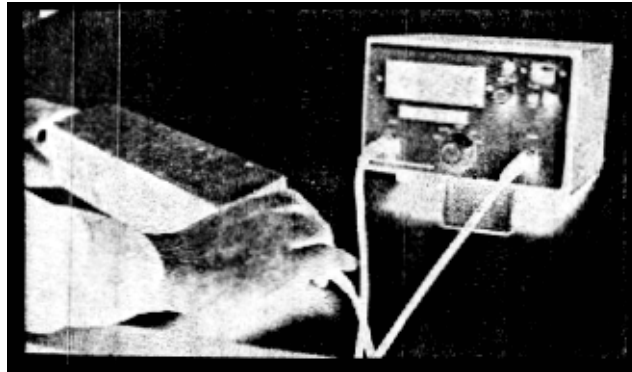


Fig. 2.15 Appareil ultrasonique

2.14.2.2.2.1 -Relation vitesse du son, résistance :

D'une façon générale, la résistance augmente avec la vitesse du son, il n'existe pas de relation unique valable pour tous les bétons comme pour le scléromètre, pour les hautes résistances, la vitesse de son ne croît pratiquement plus au delà de 350 bars environ, car elle est principalement fonction de la compacité du béton.

La vitesse de son est fonction également de la nature des granulats employés. Mais c'est à nouveau une question de compacité.

Nous citons cependant deux relations parmi toutes celles proposées :

$$a) \quad f'c = 16,7 \exp \frac{Ed}{122500} \quad (2.16)$$

Ed est le module d'élasticité dynamique qui est fonction de la vitesse du son :

$$Ed = V^2 \frac{\varpi}{g} \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (2.17)$$

avec :

V vitesse du son.

ϖ Densité du béton.

g Accélération de l'apesanteur (9.81 m/s²).

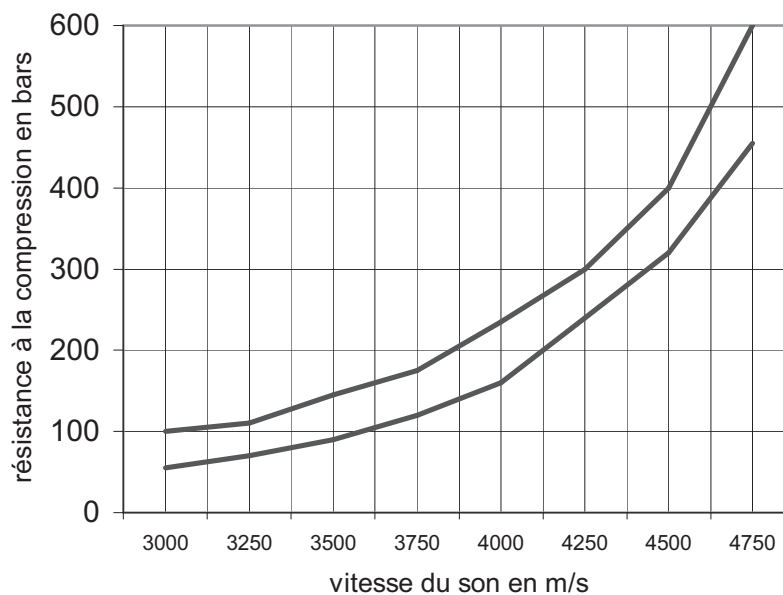
ν Coefficient de poisson dynamique souvent compris entre 0,22 et 0,28.

$$f_c = K \frac{\bar{\omega}}{g} V^4 \quad (2.18)$$

b)

K est un coefficient d'étalonnage propre à chaque type de béton.

Fig. 2,16 relation moyenne vitesse-résistance pour des béton de granulats silico-calcaires



2.14.2.2.2.2-Mode opératoire :

Les capteurs sont placés sur la surface du béton enduite d'une fine couche de vaseline, cette couche permettra d'éviter les ondes parasites. Les mesures sont notées sur écran digital au moment de leur stabilisation, les éprouvettes ont subi chacune les essais en deux endroits distincts.

2.14.2.2.2.3 -Mesures :

Il existe deux types de mesure :

- 1 – mesures en transparence, utilisées dans le cas des éprouvettes, le capteur est placé face à l'émetteur.
- 2 – mesures en surface, utilisées sur toutes les partie de structure et éprouvettes, mais plus particulièrement sur les dalles. L'émetteur est maintenu en un point fixe ; le capteur est déplacé successivement à des distances marquées à l'avance.

Le type d'essai entrepris est celui de la mesure par transparence sur les éprouvettes prismatiques avant qu'elles ne subissent les essais de traction par flexion.

2.15 – Méthodes statistiques.

2.15.1 - Fonctions statistiques : ACI Recommendation practice for évaluation of compression tests results of field concret (ACI 214-65)

Moyenne arithmétique :

La moyenne arithmétique, est égale à la somme des résultats individuels, divisés par l'effectif.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.19)$$

écart type :

Par définition, l'écart type est le rayon de giration de l'aire en dessous de la courbe théorique des probabilités, autour du centre, pour lequel la courbe change d'allure.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - \bar{x}^2} \quad (2.20)$$

σ , est l'écart type d'une population, c'est à dire, nombre infini d'individus ou résultats ≥ 30 .

En dessous de 30 essais, nous parlerons d'échantillon, quand il se rapproche de 30, il tend vers une population, de ce fait, nous aurons recours à l'écart type d'échantillon qui est égal à :

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n-1} - \bar{x}^2} \quad (2.21)$$

Nota :

Pour avoir une meilleure appréciation en ce qui concerne l'analyse des résultats, il serait convenable de disposer d'un nombre suffisant d'essais au moins 30 essais pour, chaque âge et chaque type de béton.

Coefficient de variation :

L'écart type, exprimé en pourcentage de la résistance moyenne, est appelé coefficient de variation.

$$V = \frac{\sigma}{x} * 100 \quad (2.22)$$

Cette fonction, permet d'exprimer le degré de dispersion.

Tab 2.12 valeurs standards pour le contrôle de béton.

Classement des opérations	Coefficient de variation pour différents types de contrôle			
	Excellent	Bon	Moyen	Mauvais
1.1 sur toutes les variations dans la construction en général	Plus bas Que, 10,0	10,0 à 15,0	15,0 à 20,0	Supérieur à 20,0
2.1 contrôle en laboratoire	Plus bas Que, 5,0	5,0 à 7,0	7,0 à 10,0	Supérieur à 10,0
1.2 variations ente essais sur le contrôle des méthodes des essais	Plus bas Que, 4,0	4,0 à 5,0	5,0 à 6,0	Supérieur à 6,0
2.2 contrôle en laboratoire	Plus bas Que, 3,0	3,0 à 4,0	4,0 à 5,0	Supérieur à 5,0

1.1 - qualité du béton produit sur chantier, essais de convenance et de contrôle.

2.1 - qualité du contrôle sur le béton produit au laboratoire pour des essais d'étude et d'expérimentation.

1.2 – variations entre essais pour l'appréciation des méthodes des essais, concernant le béton produit sur le chantier.

2.2 – variations entre essais pour ce qui concerne les essais expérimentaux.

Etendue (ou dispersion) :

L'étendue, est trouvée par différence de la résistance minimale d'une série d'éprouvettes, à la résistance maximale, l'étendue est employée dans le calcul de l'écart type entre essais.

Variations entre essais :

$$\sigma_1 = \frac{1}{d_2} \bar{R} \quad (2.23)$$

$$v_1 = \frac{\sigma_1}{\bar{x}} * 100 \quad (2.24)$$

avec

σ_1 Ecart type entre essais.

$1/d_2$ constante dépendant du nombre d'éprouvettes dans la série, voir tableau.....

\bar{R} Etendue moyenne de l'ensemble des séries d'éprouvettes.

v_1 Coefficient de variation entre essais.

\bar{x} Résistance moyenne.

Tab 2.13 Constante $1/d_2$, facteur de calcul de l'écart type entre essais.

Nombre d'éprouvettes	d_2	$1/d_2$
2	1,128	0,8865
3	1,693	0,5907
4	2,059	0,4857
5	2,326	0,4299
6	2,534	0,3946
7	2,704	0,3698
8	2,847	0,3512
9	2,970	0,3367
10	3,078	0,3249

Fig. 2.17 courbes de distribution cumulée pour différent coefficients de variation

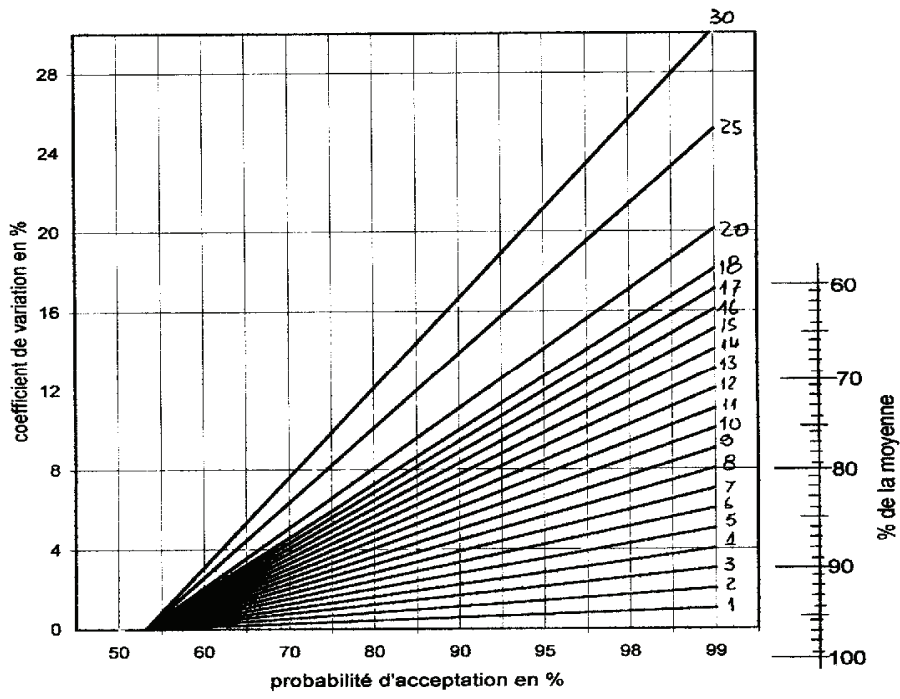
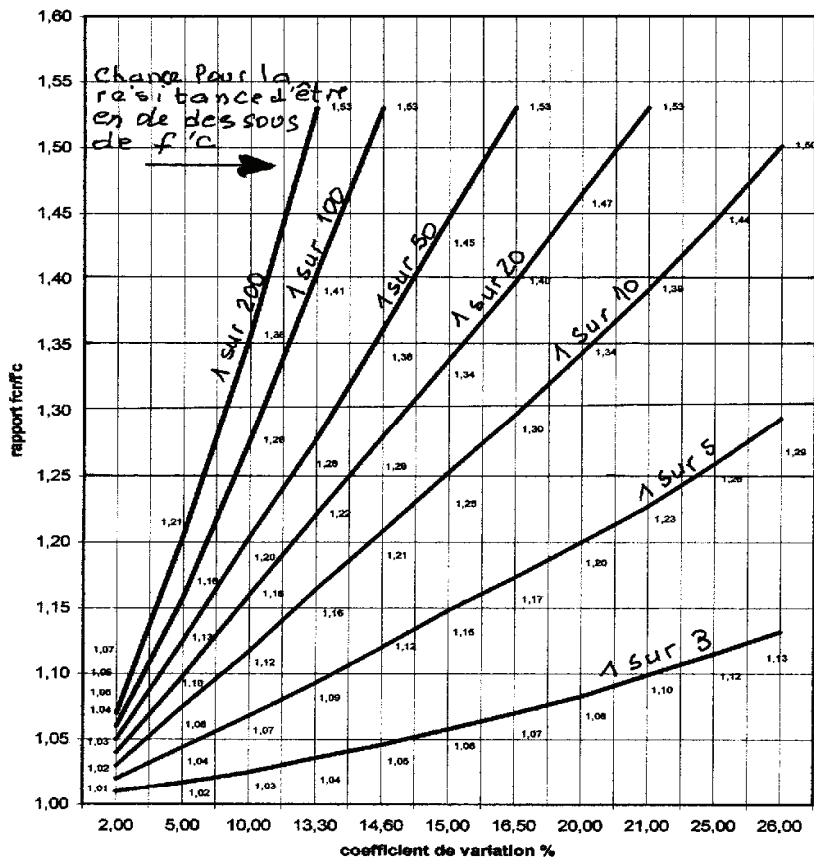


Fig. 2.18 rapport f_{tr}/f_c en fonction du coefficient de variation de de la chance de tomber en dessous de f_c



2.15..2 – Corrélations :

Le coefficient de corrélation est déterminé selon les formules ci-dessous :

$$r = \frac{1}{n} \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{1}{n} \frac{\sum e_x e_y}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.25)$$

avec

$$\begin{aligned} e_x &= x_i - \bar{x} \\ e_y &= y_i - \bar{y} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Où e , est l'écart entre la moyenne et les résultats individuels.

σ_x , est l'écart type des individus x.

σ_y , est l'écart type des individus y.

l'erreur probable

$$Er = \pm \frac{0,6745(1 - r^2)}{\sqrt{n}} \quad (2.27)$$

Règles d'interprétation :

1° si r est inférieur à l'erreur probable, il n'y a pas corrélation évidente.

2° si r est supérieur à six (06) fois l'erreur probable, l'existence de la corrélation est pratiquement certaine.

3° dans le cas où, l'erreur serait relativement petite :

- a) Si r est inférieur à 0,3, la corrélation ne peut être considérée comme marquée.
- b) Si r est supérieur 0,5, il y a corrélation.

Chapitre III

Résultats

3.1 résultats :

Les résultats obtenus suites aux essais entrepris, sont regroupés, selon l'âge, le type d'essai et le type de béton afin de permettre la compréhension et l'exploitation de ces derniers de la manière la plus pratique et la plus aisée.

Tab. 3.1 Résultats des essais de traction par flexion à 7 jours
BETON TMOIN

Essai n°	érou n°	P. Érou.	d. Érou.	d. Moy.	Char. F	ch. Moy.	sect. fibres	df %	df Moy
1	1	3490	2,54	2,55	6,62	6,73	0,00	0,00	0,00
	2	3520	2,57		6,84		0,00	0,00	
2	1	3400	2,48	2,47	6,82	6,57	0,00	0,00	0,00
	2	3380	2,46		6,32		0,00	0,00	
3	1	3400	2,48	2,47	6,88	6,91	0,00	0,00	0,00
	2	3390	2,47		6,94		0,00	0,00	
4	1	3410	2,49	2,50	5,72	5,86	0,00	0,00	0,00
	2	3440	2,51		6,00		0,00	0,00	

Ch. Moy. 6,52 dens. Moy. 0,00

Tab. 3.2 Résultats des essais de traction par flexion à 7 jours
1% DE FIBRES

Essai n°	érou n°	P. Érou.	d. Érou.	d. Moy.	Char. F	ch. Moy.	sect. fibres	df %	df Moy
1	1	3530	2,57	2,57	7,20	7,35	0,31	0,62	0,54
	2	3510	2,56		7,50		0,23	0,46	
2	1	3520	2,57	2,53	7,31	7,325	0,25	0,51	0,53
	2	3430	2,50		7,34		0,27	0,55	
3	1	3430	2,50	2,51	6,02	6,26	0,23	0,46	0,47
	2	3450	2,51		6,5		0,24	0,48	
4	1	3550	2,59	2,59	6,24	6,70	0,28	0,58	0,57
	2	3570	2,60		7,16		0,27	0,55	

Ch. Moy. 6,91 dens. Moy. 0,53

Tab. 3.3 Résultats des essais de traction par flexion à 7 jours
2% DE FIBRES

Essai n°	érou n°	P. Érou.	d. Érou.	d. Moy.	Char. F	ch. Moy.	sect. fibres	df %	df Moy
1	1	3570	2,60	2,63	7,80	8,22	0,41	0,83	0,82
	2	3640	2,65		8,64		0,40	0,81	
2	1	3640	2,65	2,60	7,68	7,61	0,43	0,88	0,93
	2	3505	2,55		7,54		0,49	0,99	
3	1	3620	2,64	2,63	7,12	7,88	0,45	0,92	0,89
	2	3590	2,62		8,64		0,42	0,85	
4	1	3620	2,64	2,64	7,52	7,61	0,46	0,95	0,92
	2	3620	2,64		7,70		0,44	0,90	

Ch. Moy. 7,83 dens. Moy. 0,89

Tab. 3.4 Résultats des essais de traction par flexion à 7 jours
3% DE FIBRES

Essai n°	érou n°	P. Érou.	d. Érou.	d. Moy.	Char. F	ch. Moy.	sect. fibres	df %	df Moy
1	1	3670	2,67	2,68	8,34	8,19	0,50	1,02	1,00
	2	3675	2,68		8,04		0,49	0,99	
2	1	3670	2,67	2,67	8,24	8,28	0,52	1,06	1,08
	2	3660	2,67		8,32		0,54	1,11	
3	1	3630	2,65	2,65	6,7	6,46	0,47	0,97	1,03
	2	3630	2,65		6,22		0,53	1,08	
4	1	3700	2,70	2,68	7,99	8,325	0,46	0,95	1,03
	2	3650	2,66		8,66		0,54	1,11	

Ch. Moy. 7,81 dens. Moy. 1,04

Tab. 3.5 Résultats des essais de traction par flexion à 14 jours

BETON TEMOIN

Essai n°	éprou n°	P. Éprou.	d. Éprou.	d. Moy.	Char. F	ch. Moy.	sect. fibres	df %	df Moy
1	1	3490	2,54	2,53	7,00	6,86	0,00	0,00	0,00
	2	3440	2,51		6,72		0,00	0,00	
2	1	3365	2,45	2,47	7,32	7,42	0,00	0,00	0,00
	2	3415	2,49		7,52		0,00	0,00	
3	1	3390	2,47	2,49	7,06	7,07	0,00	0,00	0,00
	2	3435	2,50		7,08		0,00	0,00	
4	1	3415	2,49	2,50	6,08	6,38	0,00	0,00	0,00
	2	3450	2,51		6,68		0,00	0,00	

Ch. Moy. 6,93

dens. Moy. 0,00

Tab. 3.6 Résultats des essais de traction par flexion à 14 jours

1% DE FIBRES

Essai n°	éprou n°	P. Éprou.	d. Éprou.	d. Moy.	Char. F	ch. Moy.	sect. fibres	df %	df Moy
1	1	3510	2,56	2,56	7,32	7,26	0,21	0,44	0,48
	2	3520	2,57		7,2		0,26	0,53	
2	1	3430	2,50	2,52	7,98	7,51	0,31	0,62	0,63
	2	3485	2,54		7,04		0,32	0,65	
3	1	3495	2,55	2,55	7,10	7,06	0,26	0,53	0,54
	2	3490	2,54		7,02		0,27	0,55	
4	1	3580	2,61	2,59	7,02	6,99	0,33	0,67	0,58
	2	3535	2,58		6,96		0,24	0,48	

Ch. Moy. 7,21

dens. Moy. 0,56

Tab. 3.7 Résultats des essais de traction par flexion à 14 jours

2% DE FIBRES

Essai n°	éprou n°	P. Éprou.	d. Éprou.	d. Moy.	Char. F	ch. Moy.	sect. fibres	df %	df Moy
1	1	3610	2,63	2,63	7,06	7,36	0,40	0,81	0,83
	2	3620	2,64		7,66		0,42	0,85	
2	1	3520	2,57	2,57	7,18	7,38	0,52	1,06	1,00
	2	3530	2,57		7,58		0,46	0,95	
3	1	3590	2,62	2,62	7,68	7,4	0,44	0,90	0,83
	2	3590	2,62		7,12		0,37	0,76	
4	1	3615	2,63	2,63	7,97	7,425	0,42	0,85	0,91
	2	3615	2,63		6,88		0,47	0,97	

Ch. Moy. 7,39

dens. Moy. 0,89

Tab. 3.8 Résultats des essais de traction par flexion à 14 jours

3% DE FIBRES

Essai n°	éprou n°	P. Éprou.	d. Éprou.	d. Moy.	Char. F	ch. Moy.	sect. fibres	df %	df Moy
1	1	3560	2,59	2,63	7,36	7,31	0,57	1,15	1,13
	2	3670	2,67		7,26		0,54	1,11	
2	1	3675	2,68	2,66	7,24	7,31	0,49	0,99	1,00
	2	3635	2,65		7,38		0,50	1,02	
3	1	3595	2,62	2,64	7,54	7,32	0,55	1,13	1,10
	2	3640	2,65		7,10		0,52	1,06	
4	1	3675	2,68	2,69	7,43	7,81	0,47	0,97	0,98
	2	3700	2,70		8,19		0,49	0,99	

Ch. Moy. 7,44

dens. Moy. 1,05

Tab. 3.9 Resultats des essais de traction par flexion à 28 jours

BETON TEMOIN

Essai n°	éprou n°	P. Éprou.	d. Éprou.	d. Moy.	Char . F	ch. Moy.	sect. fibres	df %	df Moy	
1	1	3445	2,51	2,51	7,30	7,38	0,00	0,00	0,00	
	2	3435	2,50		7,45		0,00	0,00		
2	1	3385	2,47	2,47	7,35	7,23	0,00	0,00	0,00	
	2	3400	2,48		7,10		0,00	0,00		
3	1	3360	2,45	2,46	7,15	7,175	0,00	0,00	0,00	
	2	3400	2,48		7,20		0,00	0,00		
4	1	3415	2,49	2,49	7,33	7,305	0,00	0,00	0,00	
	2	3410	2,49		7,28		0,00	0,00		
Ch. Moy.					7,27	dens. Moy.				0,00

Tab. 3.10 Resultats des essais de traction par flexion à 28 jours

1% DE FIBRES

Essai n°	éprou n°	P. Éprou.	d. Éprou.	d. Moy.	Char . F	ch. Moy.	sect. fibres	df %	df Moy	
1	1	3515	2,56	2,56	7,59	7,56	0,29	0,60	0,50	
	2	3510	2,56		7,52		0,19	0,39		
2	1	3510	2,56	2,56	7,31	7,41	0,26	0,53	0,58	
	2	3515	2,56		7,50		0,31	0,62		
3	1	3460	2,52	2,52	7,65	7,6	0,24	0,00	0,21	
	2	3460	2,52		7,55		0,20	0,42		
4	1	3550	2,59	2,58	7,70	7,68	0,33	0,67	0,61	
	2	3535	2,58		7,66		0,27	0,55		
Ch. Moy.					7,56	dens. Moy.				0,47

Tab. 3.11 Resultats des essais de traction par flexion à 28 jours

2% DE FIBRES

Essai n°	éprou n°	P. Éprou.	d. Éprou.	d. Moy.	Char . F	ch. Moy.	sect. fibres	df %	df Moy	
1	1	3680	2,68	2,65	9,24	8,38	0,59	1,20	1,19	
	2	3580	2,61		7,52		0,58	1,18		
2	1	3645	2,66	2,60	7,80	8,185	0,34	0,69	0,81	
	2	3495	2,55		8,57		0,45	0,92		
3	1	3550	2,59	2,60	7,36	7,42	0,47	0,01	0,47	
	2	3590	2,62		7,48		0,45	0,92		
4	1	3590	2,62	2,61	7,65	7,615	0,53	1,08	0,93	
	2	3585	2,61		7,58		0,38	0,78		
Ch. Moy.					7,90	dens. Moy.				0,85

Tab. 3.12 Resultats des essais de traction par flexion à 28 jours

3% DE FIBRES

Essai n°	éprou n°	P. Éprou.	d. Éprou.	d. Moy.	Char . F	ch. Moy.	sect. fibres	df %	df Moy	
1	1	3620	2,64	2,67	7,78	8,635	0,72	1,48	1,43	
	2	3700	2,70		9,49		0,68	1,38		
2	1	3625	2,64	2,66	8,62	8,86	0,54	1,11	1,30	
	2	3665	2,67		9,10		0,73	1,50		
3	1	3605	2,63	2,62	8,69	8,47	0,50	0,01	0,65	
	2	3595	2,62		8,25		0,63	1,29		
4	1	3690	2,69	2,69	8,28	8,24	0,57	1,15	1,25	
	2	3680	2,68		8,20		0,66	1,34		
Ch. Moy.					8,55	dens. Moy.				1,16

Tab. 3.13 Résultats des essais de compression
indices sclérométriques et ultrasoniques à 7 jours (BETON TEMOIN)

Essai n°	érou n°	char. C	f'c. comp	f'c Moy.	Is	Is Moy.	t (µs)	Vs (ms)	Vs Moy
1	1	180	18,37	20,41	20	22	14,70	4762	4917
	2	220	22,45		24		13,80	5072	
2	1	200	20,41	19,90	19	21	16,00	4375	4030
	2	190	19,39		23		19,00	3684	
3	1	185	18,88	19,39	22	23	13,40	5224	5304
	2	195	19,90		24		13,00	5385	
4	1	230	23,47	22,19	25	24,5	16,80	4167	4514
	2	205	20,92		24		14,40	4861	

f'c moy. 20,47 Is moy. 22,63 Vs moy 4691

Tab. 3.14 Résultats des essais de compression
indices sclérométriques et ultrasoniques à 7 jours (1% DE FIBRES)

Essai n°	érou n°	char. C	f'c. comp	f'c Moy.	Is	Is Moy.	t (µs)	Vs (m/s)	Vs Moy
1	1	205	20,92	22,19	27	26,00	14,20	4930	4830
	2	230	23,47		25		14,80	4730	
2	1	215	21,94	22,19	22	22,50	20,40	3431	3639
	2	220	22,45		23		18,20	3846	
3	1	210	21,43	20,92	25	26,00	13,60	5147	5110
	2	200	20,41		27		13,80	5072	
4	1	200	20,41	20,82	23	22,00	17,20	4070	4647
	2	208	21,22		21		13,40	5224	

f'c moy. 21,53 Is moy. 24,13 Vs moy 4556

Tab. 3.15 Résultats des essais de compression
indices sclérométriques et ultrasoniques à 7 jours (2% DE FIBRES)

Essai n°	érou n°	char. C	f'c. comp	f'c Moy.	Is	Is Moy.	t (µs)	Vs (m/s)	Vs Moy
1	1	200	20,41	19,90	26	27,5	13,60	5147	5110
	2	190	19,39		29		13,80	5072	
2	1	210	21,43	22,19	20	19,5	19,10	3665	3368
	2	225	22,96		19		22,80	3070	
3	1	230	23,47	23,72	24	25	13,80	5072	5054
	2	235	23,98		26		13,90	5036	
4	1	215	21,94	21,68	23	20,5	14,80	4730	4830
	2	210	21,43		18		14,20	4930	

f'c moy. 21,88 Is moy. 23,13 Vs moy 4590

Tab. 3.16 Résultats des essais de compression
indices sclérométriques et ultrasoniques à 7 jours (3% DE FIBRES)

Essai n°	érou n°	char. C	f'c. comp	f'c Moy.	Is	Is Moy.	t (µs)	Vs (m/s)	Vs Moy
1	1	225	22,96	23,16	28	27,5	14,20	4930	4912
	2	229	23,37		27		14,30	4895	
2	1	237	24,18	24,59	19	19,5	20,90	3349	3158
	2	245	25,00		20		23,60	2966	
3	1	210	21,43	21,68	26	25,5	14,80	4730	5099
	2	215	21,94		25		12,80	5469	
4	1	235	23,98	23,72	20	21,5	14,80	4730	4638
	2	230	23,47		23		15,40	4545	

f'c moy. 23,29 Is moy. 23,50 Vs moy 4452

Tab. 3.17 Résultats des essais de compression
indices sclérométriques et ultrasoniques à 14 jours (BETON TEMOIN)

Essai n°	éproû n°	char. C	f'c. comp	f'c Moy.	Is	Is Moy.	t (µs)	Vs (m/s)	Vs Moy
1	1	270	27,55	28,57	26	27,5	13,00	5385	5304
	2	290	29,59		29		13,40	5224	
2	1	240	24,49	25,00	25	26	17,20	4070	4465
	2	250	25,51		27		14,40	4861	
3	1	290	29,59	27,55	28	27	13,50	5185	4990
	2	250	25,51		26		14,60	4795	
4	1	280	28,57	25,77	27	26,5	13,60	5147	4789
	2	225	22,96		26,00		15,80	4430	
		f'c moy.	26,72	Is moy.	26,75		Vs moy	4887	

Tab. 3.18 Résultats des essais de compression

indices sclérométriques et ultrasoniques à 14 jours (1% DE FIBRES)

Essai n°	éproû n°	char. C	f'c. comp	f'c Moy.	Is	Is Moy.	t (µs)	Vs (m/s)	Vs Moy
1	1	300	30,61	30,36	26	27	12,00	5833	5529
	2	295	30,10		28		13,40	5224	
2	1	300	30,61	30,10	27	26	17,00	4118	4361
	2	290	29,59		25		15,20	4605	
3	1	275	28,06	27,81	28	29	13,20	5303	5244
	2	270	27,55		30		13,50	5185	
4	1	280	28,57	29,08	29	29,5	15,00	4667	5026
	2	290	29,59		30,00		13,00	5385	
		f'c moy.	29,34	Is moy.	27,88		Vs moy	5040	

Tab. 3.19 Résultats des essais de compression

indices sclérométriques et ultrasoniques à 14 jours (2% DE FIBRES)

Essai n°	éproû n°	char. C	f'c. comp	f'c Moy.	Is	Is Moy.	t (µs)	Vs (m/s)	Vs Moy
1	1	280	28,57	32,14	29	28	12,00	5833	5694
	2	350	35,71		27		12,60	5556	
2	1	320	32,65	31,12	26	28,5	15,20	4605	4269
	2	290	29,59		31		17,80	3933	
3	1	300	30,61	28,83	29	29,5	13,40	5224	5185
	2	265	27,04		30		13,60	5147	
4	1	285	29,08	28,57	30	28	14,70	4762	5053
	2	275	28,06		26		13,10	5344	
		f'c moy.	30,17	Is moy.	28,50		Vs moy	5050	

Tab. 3.20 Résultats des essais de compression

indices sclérométriques et ultrasoniques à 14 jours (3% DE FIBRES)

Essai n°	éproû n°	char. C	f'c. comp	f'c Moy.	Is	Is Moy.	t (µs)	Vs (m/s)	Vs Moy
1	1	285	29,08	30,61	26	28	13,00	5385	5090
	2	315	32,14		30		14,60	4795	
2	1	320	32,65	31,12	25	26,5	16,60	4217	4143
	2	290	29,59		28		17,20	4070	
3	1	285	29,08	28,06	30	29	14,20	4930	4912
	2	265	27,04		28		14,30	4895	
4	1	275	28,06	29,59	26	27	15,00	4667	4636
	2	305	31,12		28		15,20	4605	
		f'c moy.	29,85	Is moy.	27,63		Vs moy	4695	

Tab. 3.21 Resultats des essais de compression
indices sclérométriques et ultrasoniques à 28 jours (BETON TEMOIN)

Essai n°	éprou n°	char. C	f'c. comp	f'c Moy.	ls	ls Moy.	t (μs)	Vs (m/s)	Vs Moy
1	1	350	35,71	35,71	28	27,5	10,25	6829	6307
	2	350	35,71		27		12,10	5785	
2	1	340	34,69	35,71	29	29,5	13,10	5344	5506
	2	360	36,73		30		12,35	5668	
3	1	345	35,20	34,44	29	28	12,10	5785	5544
	2	330	33,67		27		13,20	5303	
4	1	335	34,18	34,44	29	29,5	13,15	5323	5462
	2	340	34,69		30		12,50	5600	
		f'c moy.	35,08	ls moy.	28,63		Vs moy	5705	

Tab. 3.22 Resultats des essais de compression
indices sclérométriques et ultrasoniques à 28 jours (1% DE FIBRES)

Essai n°	éprou n°	char. C	f'c. comp	f'c Moy.	ls	ls Moy.	t (μs)	Vs (m/s)	Vs Moy
1	1	340	34,69	34,95	30	29,5	11,55	6061	5887
	2	345	35,20		29		12,25	5714	
2	1	335	34,18	34,34	26	26,5	11,75	5957	5813
	2	338	34,49		27		12,35	5668	
3	1	340	34,69	35,20	26	27	10,88	6434	6252
	2	350	35,71		28		11,53	6071	
4	1	375	38,27	36,73	30	30,5	13,40	5224	5195
	2	345	35,20		31		13,55	5166	
		f'c moy.	35,31	ls moy.	28,38		Vs moy	5787	

Tab. 3.23 Resultats des essais de compression
indices sclérométriques et ultrasoniques à 28 jours (2% DE FIBRES)

Essai n°	éprou n°	char. C	f'c. comp	f'c Moy.	ls	ls Moy.	t (μs)	Vs (m/s)	Vs Moy
1	1	340	34,69	33,67	31	30	11,82	5922	5721
	2	320	32,65		29		12,68	5521	
2	1	300	30,61	30,36	30	28,5	11,27	6211	6042
	2	295	30,10		27		11,92	5872	
3	1	355	36,22	35,97	30	29,5	10,50	6667	6307
	2	350	35,71		29		11,77	5947	
4	1	355	36,22	35,97	30	29,5	10,68	6554	5759
	2	350	35,71		29		14,10	4965	
		f'c moy.	33,99	ls moy.	29,38		Vs moy	5957	

Tab. 3.24 Resultats des essais de compression
indices sclérométriques et ultrasoniques à 28 jours (3% DE FIBRES)

Essai n°	éprou n°	char. C	f'c. comp	f'c Moy.	ls	ls Moy.	t (μs)	Vs (m/s)	Vs Moy
1	1	365	37,24	36,48	30	29	11,85	5907	5754
	2	350	35,71		28		12,50	5600	
2	1	355	36,22	35,71	29	28	12,55	5578	5710
	2	345	35,20		27		11,98	5843	
3	1	375	38,27	36,73	32	29,5	12,55	5578	5489
	2	345	35,20		27		12,96	5401	
4	1	385	39,29	39,29	32	31,5	13,05	5364	5296
	2	385	39,29		31		13,39	5228	
		f'c moy.	37,05	ls moy.	29,50		Vs moy	5562	

Tab. 3.25 les valeurs de dispersions traction par flexion à 7 jours (BETON TEMOIN)

Essai n°	éproû n°	Charge de traction flexion			Densification des fibres		
		R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	0,22	0,10	0,21	0,00	0,00	0,00
	2		0,32			0,00	
2	1	0,5	0,30	0,05	0,00	0,00	0,00
	2		-0,20			0,00	
3	1	0,06	0,36	0,39	0,00	0,00	0,00
	2		0,42			0,00	
4	1	0,28	-0,80	-0,66	0,00	0,00	0,00
	2		-0,52			0,00	
R moy.		0,27	R moy.		0,00		

Tab. 3.26 les valeurs de dispersions traction par flexion à 7 jours (1% DE FIBRES)

Essai n°	éproû n°	Charge de traction flexion			Densification des fibres		
		R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	0,3	0,29	0,44	0,16	0,10	0,01
	2		0,59			-0,07	
2	1	0,03	0,40	0,42	0,05	-0,02	0,00
	2		0,43			0,03	
3	1	0,48	-0,89	-0,65	0,02	-0,07	-0,05
	2		-0,41			-0,04	
4	1	0,92	-0,67	-0,21	0,02	0,05	0,04
	2		0,25			0,03	
R moy.		0,43	R moy.		0,06		

Tab. 3.27 les valeurs de dispersions traction par flexion à 7 jours (2% DE FIBRES)

Essai n°	éproû n°	Charge de traction flexion			Densification des fibres		
		R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	0,84	-0,03	0,39	0,02	-0,06	-0,07
	2		0,81			-0,08	
2	1	0,14	-0,15	-0,22	0,12	-0,01	0,04
	2		-0,29			0,10	
3	1	1,52	-0,71	0,05	0,07	0,03	0,00
	2		0,81			-0,04	
4	1	0,18	-0,31	-0,22	0,05	0,05	0,03
	2		-0,13			0,01	
R moy.		0,67	R moy.		0,06		

Tab. 3.28 les valeurs de dispersions traction par flexion à 7 jours (3% DE FIBRES)

Essai n°	éproû n°	Charge de traction flexion			Densification des fibres		
		R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	0,3	0,53	0,38	0,02	-0,02	-0,03
	2		0,23			-0,04	
2	1	0,08	0,43	0,47	0,05	0,03	0,05
	2		0,51			0,07	
3	1	0,48	-1,11	-1,35	0,12	-0,07	-0,01
	2		-1,59			0,05	
4	1	0,67	0,18	0,51	0,16	-0,09	-0,01
	2		0,85			0,07	
R moy.		0,38	R moy.		0,09		

Tab. 3.29 les valeurs de dispersions traction par flexion à 14 jours (BETON TEMOIN)

Essai n°	éprou n°	Charge de traction flexion			Densification des fibres		
		R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	0,28	0,07	-0,07	0,00	0,00	0,00
	2		-0,21			0,00	
2	1	0,2	0,39	0,49	0,00	0,00	0,00
	2		0,59			0,00	
3	1	0,02	0,13	0,14	0,00	0,00	0,00
	2		0,15			0,00	
4	1	0,6	-0,85	-0,35	0,00	0,00	0,00
	2		0,16			0,00	
R moy.		0,28	R moy.		0,00		

Tab. 3.30 les valeurs de dispersions traction par flexion à 14 jours (1% DE FIBRES)

Essai n°	éprou n°	Charge de traction flexion			Densification des fibres		
		R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	0,12	0,12	0,06	0,09	-0,12	-0,07
	2		0,00			-0,03	
2	1	0,94	0,78	0,31	0,02	0,06	0,07
	2		-0,16			0,09	
3	1	0,08	-0,11	-0,15	0,02	-0,03	-0,02
	2		-0,19			-0,01	
4	1	0,06	-0,19	-0,21	0,18	0,11	0,02
	2		-0,24			-0,07	
R moy.		0,30	R moy.		0,08		

Tab. 3.31 les valeurs de dispersions traction par flexion à 14 jours (2% DE FIBRES)

Essai n°	éprou n°	Charge de traction flexion			Densification des fibres		
		R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	0,6	-0,33	-0,03	0,05	-0,09	-0,06
	2		0,27			-0,04	
2	1	0,4	-0,21	-0,01	0,12	0,17	0,11
	2		0,19			0,05	
3	1	0,56	0,29	0,01	0,14	0,01	-0,06
	2		-0,27			-0,13	
4	1	1,09	0,58	0,03	0,12	-0,04	0,02
	2		-0,51			0,07	
R moy.		0,66	R moy.		0,10		

Tab. 3.32 les valeurs de dispersions traction par flexion à 14 jours (3% DE FIBRES)

Essai n°	éprou n°	Charge de traction flexion			Densification des fibres		
		R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	0,1	-0,08	-0,13	0,05	0,10	0,08
	2		-0,18			0,05	
2	1	0,14	-0,20	-0,13	0,02	-0,06	-0,05
	2		-0,06			-0,04	
3	1	0,44	0,10	-0,12	0,07	0,08	0,04
	2		-0,34			0,01	
4	1	0,76	-0,01	0,37	0,02	-0,08	-0,07
	2		0,75			-0,06	
R moy.		0,36	R moy.		0,04		

Tab. 3.33 les valeurs de dispersions traction par flexion à 28 jours (BETON TEMOIN)

Essai n°	éprou n°	Charge de traction flexion			Densification des fibres		
		R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	0,15	0,03	0,11	0,00	0,00	0,00
	2		0,18			0,00	
2	1	0,25	0,08	-0,05	0,00	0,00	0,00
	2		-0,17			0,00	
3	1	0,05	-0,12	-0,10	0,00	0,00	0,00
	2		-0,07			0,00	
4	1	0,05	0,06	0,03	0,00	0,00	0,00
	2		0,01			0,00	
R moy.		0,13	R moy.		0,00		

Tab. 3.34 les valeurs de dispersions traction par flexion à 28 jours (1% DE FIBRES)

Essai n°	éprou n°	Charge de traction flexion			Densification des fibres		
		R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	0,07	0,03	-0,01	0,21	0,13	0,02
	2		-0,04			-0,08	
2	1	0,19	-0,25	-0,16	0,09	0,06	0,10
	2		-0,06			0,15	
3	1	0,1	0,09	0,04	0,41	-0,47	-0,26
	2		-0,01			-0,06	
4	1	0,04	0,14	0,12	0,12	0,20	0,14
	2		0,10			0,08	
R moy.		0,10	R moy.		0,21		

Tab. 3.35 les valeurs de dispersions traction par flexion à 28 jours (2% DE FIBRES)

Essai n°	éprou n°	Charge de traction flexion			Densification des fibres		
		R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	1,72	1,34	0,48	0,02	0,35	0,34
	2		-0,38			0,33	
2	1	0,77	-0,10	0,29	0,23	-0,16	-0,04
	2		0,67			0,07	
3	1	0,12	-0,54	-0,48	0,91	-0,84	-0,38
	2		-0,42			0,07	
4	1	0,07	-0,25	-0,28	0,30	0,24	0,09
	2		-0,32			-0,06	
R moy.		0,67	R moy.		0,37		

Tab. 3.36 les valeurs de dispersions traction par flexion à 28 jours (3% DE FIBRES)

Essai n°	éprou n°	Charge de traction flexion			Densification des fibres		
		R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	1,71	-0,77	0,08	0,09	0,32	0,27
	2		0,94			0,23	
2	1	0,48	0,07	0,31	0,39	-0,05	0,15
	2		0,55			0,34	
3	1	0,44	0,14	-0,08	1,28	-1,15	-0,51
	2		-0,30			0,13	
4	1	0,08	-0,27	-0,31	0,18	0,00	0,09
	2		-0,35			0,18	
R moy.		0,68	R moy.		0,49		

Tab. 3.37 valeurs de dispersions de compression
d'indices sclérométriques et ultrasoniques à 7 jours BETON TEMOIN

Ess. n°	épr. n°	Compression			indices sclérométriques			Ultrason		
		R	e	e moy.	R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	4,08	-2,10	-0,06	4,00	-2,63	-0,63	311	71	226
	2		1,98			1,38			381	
2	1	1,02	-0,06	-0,57	4,00	-3,63	-1,63	691	-316	-662
	2		-1,08			0,38			-1007	
3	1	1,02	-1,59	-1,08	2,00	-0,63	0,38	161	533	613
	2		-0,57			1,38			693	
4	1	2,55	3,00	1,72	1,00	2,38	1,88	694	-525	-177
	2		0,45			1,38			170	
R moy.		2,17	R moy.			2,75	R moy.			464

Tab. 3.38 valeurs de dispersions de compression
d'indices sclérométriques et ultrasoniques à 7 jours 1% DE FIBRES

Ess. n°	épr. n°	Compression			indices sclérométriques			Ultrason		
		R	e	e moy.	R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	2,55	-0,61	0,66	2,00	2,88	1,88	200	373	273
	2		1,94			0,88			173	
2	1	0,51	0,41	0,66	1,00	-2,13	-1,63	415	-1125	-917
	2		0,92			-1,13			-710	
3	1	1,02	-0,10	-0,61	2,00	0,88	1,88	75	591	554
	2		-1,12			2,88			516	
4	1	0,82	-1,12	-0,71	2,00	-1,13	-2,13	1154	-486	91
	2		-0,31			-3,13			668	
R moy.		1,22	R moy.			1,75	R moy.			461

Tab. 3.39 valeurs de dispersions de compression
d'indices sclérométriques et ultrasoniques à 7 jours 2% DE FIBRES

Ess. n°	épr. n°	Compression			indices sclérométriques			Ultrason		
		R	e	e moy.	R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	1,02	-1,47	-1,98	3,00	2,88	4,38	75	557	519
	2		-2,49			5,88			482	
2	1	1,53	-0,45	0,32	1,00	-3,13	-3,63	595	-925	-1223
	2		1,08			-4,13			-1520	
3	1	0,51	1,59	1,85	2,00	0,88	1,88	36	482	464
	2		2,10			2,88			446	
4	1	0,51	0,06	-0,19	5,00	-0,13	-2,63	200	139	239
	2		-0,45			-5,13			339	
R moy.		0,89	R moy.			2,75	R moy.			226

Tab. 3.40 valeurs de dispersions de compression
d'indices sclérométriques et ultrasoniques à 7 jours 3% DE FIBRES

Ess. n°	épr. n°	Compression			indices sclérométriques			Ultrason		
		R	e	e moy.	R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	0,41	-0,33	-0,13	1,00	4,50	4,00	34	478	461
	2		0,08			3,50			443	
2	1	0,82	0,89	1,30	1,00	-4,50	-4,00	383	-1102	-1294
	2		1,71			-3,50			-1486	
3	1	0,51	-1,86	-1,61	1,00	2,50	2,00	739	278	648
	2		-1,35			1,50			1017	
4	1	0,51	0,69	0,43	3,00	-3,50	-2,00	184	278	186
	2		0,18			-0,50			94	
R moy.		0,56	R moy.			1,50	R moy.			335

Tab. 3.41 valeurs de dispersions de compression
d'indices sclérométriques et ultrasoniques à 14 jours BETON TEMOIN

Ess. n°	épr. n°	Compression			indices sclérométriques			Ultrason		
		R	e	e moy.	R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	2,04	0,83	1,85	3,00	-0,75	0,75	161	498	417
	2		2,87			2,25			337	
2	1	1,02	-2,23	-1,72	2,00	-1,75	-0,75	791	-817	-422
	2		-1,21			0,25			-26	
3	1	4,08	2,87	0,83	2,00	1,25	0,25	391	298	103
	2		-1,21			-0,75			-93	
4	1	5,61	1,85	-0,96	1,00	0,25	-0,25	717	260	-98
	2		-3,76			-0,75			-457	
R moy.		3,19	R moy.		2,00	R moy.		515		

Tab. 3.42 valeurs de dispersions de compression
d'indices sclérométriques et ultrasoniques à 14 jours 1% DE FIBRES

Ess. n°	épr. n°	Compression			indices sclérométriques			Ultrason		
		R	e	e moy.	R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	0,51	1,28	1,02	2,00	-1,88	-0,88	609	793	489
	2		0,77			0,13			184	
2	1	1,02	1,28	0,77	2,00	-0,88	-1,88	488	-922	-678
	2		0,26			-2,88			-435	
3	1	0,51	-1,28	-1,53	2,00	0,13	1,13	118	263	204
	2		-1,79			2,13			145	
4	1	1,02	-0,77	-0,26	1,00	1,13	1,63	718	-373	-14
	2		0,26			2,13			345	
R moy.		0,77	R moy.		1,75	R moy.		483		

Tab. 3.43 valeurs de dispersions de compression
d'indices sclérométriques et ultrasoniques à 14 jours 2% DE FIBRES

Ess. n°	épr. n°	Compression			indices sclérométriques			Ultrason		
		R	e	e moy.	R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	7,14	-1,59	1,98	2,00	0,50	-0,50	278	783	644
	2		5,55			-1,50			505	
2	1	3,06	2,49	0,96	5,00	-2,50	0,00	673	-445	-781
	2		-0,57			2,50			-1118	
3	1	3,57	0,45	-1,34	1,00	0,50	1,00	77	173	135
	2		-3,13			1,50			97	
4	1	1,02	-1,08	-1,59	4,00	1,50	-0,50	582	-288	2
	2		-2,10			-2,50			293	
R moy.		3,70	R moy.		3,00	R moy.		402		

Tab. 3.44 valeurs de dispersions de compression
d'indices sclérométriques et ultrasoniques à 14 jours 3% DE FIBRES

Ess. n°	épr. n°	Compression			indices sclérométriques			Ultrason		
		R	e	e moy.	R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	3,06	-0,77	0,77	4,00	-1,63	0,38	590	689	394
	2		2,30			2,38			99	
2	1	3,06	2,81	1,28	3,00	-2,63	-1,13	147	-478	-552
	2		-0,26			0,38			-626	
3	1	2,04	-0,77	-1,79	2,00	2,38	1,38	34	234	217
	2		-2,81			0,38			200	
4	1	3,06	-1,79	-0,26	2,00	-1,63	-0,63	61	-29	-59
	2		1,28			0,38			-90	
R moy.		2,81	R moy.		2,75	R moy.		208		

Tab. 3.45 valeurs de dispersions de compression
d'indices sclérométriques et ultrasoniques à 28 jours BETON TEMOIN

Ess. n°	épr. n°	Compression			indices sclérométriques			Ultrason		
		R	E	e moy.	R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	0,00	0,64	0,64	1,00	-0,63	-1,13	1044	1125	603
	2		0,64			-1,63			80	
2	1	2,04	-0,38	0,64	1,00	0,38	0,88	325	-361	-199
	2		1,66			1,38			-37	
3	1	1,53	0,13	-0,64	2,00	0,38	-0,63	482	80	-161
	2		-1,40			-1,63			-402	
4	1	0,51	-0,89	-0,64	1,00	0,38	0,88	277	-381	-243
	2		-0,38			1,38			-105	
R moy.		1,02	R moy.			1,25	R moy.			532

Tab. 3.46 valeurs de dispersions de compression
d'indices sclérométriques et ultrasoniques à 28 jours 1% DE FIBRES

Ess. n°	épr. n°	Compression			indices sclérométriques			Ultrason		
		R	E	e moy.	R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	0,51	-0,61	-0,36	1,00	1,63	1,13	346	274	101
	2		-0,10			0,63			-73	
2	1	0,31	-1,12	-0,97	1,00	-2,38	-1,88	289	171	26
	2		-0,82			-1,38			-119	
3	1	1,02	-0,61	-0,10	2,00	-2,38	-1,38	363	647	466
	2		0,41			-0,38			284	
4	1	3,06	2,96	1,43	1,00	1,63	2,13	58	-563	-592
	2		-0,10			2,63			-621	
R moy.		1,22	R moy.			1,25	R moy.			264

Tab. 3.47 valeurs de dispersions de compression
d'indices sclérométriques et ultrasoniques à 28 jours 2% DE FIBRES

Ess. n°	épr. n°	Compression			indices sclérométriques			Ultrason		
		R	E	e moy.	R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	2,04	0,70	-0,32	2,00	1,63	0,63	402	-35	-236
	2		-1,34			-0,38			-437	
2	1	0,51	-3,38	-3,64	3,00	0,63	-0,88	339	254	84
	2		-3,89			-2,38			-85	
3	1	0,51	2,23	1,98	1,00	0,63	0,13	719	709	350
	2		1,72			-0,38			-10	
4	1	0,51	2,23	1,98	1,00	0,63	0,13	1590	597	-198
	2		1,72			-0,38			-993	
R moy.		0,89	R moy.			1,75	R moy.			762

Tab. 3.48 valeurs de dispersions de compression
d'indices sclérométriques et ultrasoniques à 28 jours 3% DE FIBRES

Ess. n°	épr. n°	Compression			indices sclérométriques			Ultrason		
		R	E	e moy.	R	e	e moy.	R	e	e moy.
1	1	1,53	0,19	-0,57	2,00	0,50	-0,50	307	345	191
	2		-1,34			-1,50			38	
2	1	1,02	-0,83	-1,34	2,00	-0,50	-1,50	265	15	148
	2		-1,85			-2,50			281	
3	1	3,06	1,21	-0,32	5,00	2,50	0,00	176	15	-73
	2		-1,85			-2,50			-161	
4	1	0,00	2,23	2,23	1,00	2,50	2,00	136	-198	-266
	2		2,23			1,50			-335	
R moy.		1,40	R moy.			2,50	R moy.			221

EVALUATION DES RESULTATS

Traitement statistique

Evaluation des résultats des charges de traction par flexion

Tab. 3.49

		Sur les matériaux				sur les méthodes des essais		
Type de béton	Age	X moy.	s	V %	Commentaires	σ_1	V1%	Commentaires
Témoïn	7j	6,52	0,46	7,00	(m)	0,23	3,60	(B)
	14j	6,93	0,44	6,39	(B)	0,24	3,52	(B)
	28j	7,27	0,11	1,57	(E)	0,11	1,52	(E)

Tab. 3.50

		Sur les matériaux				sur les méthodes des essais		
Type de béton	Age	X moy.	s	V %	Commentaires	σ_1	V1%	Commentaires
1% de fibres	7j	6,91	0,57	8,20	(m)	0,38	5,55	(M)
	14j	7,21	0,33	4,63	(E)	0,27	3,69	(B)
	28j	7,56	0,12	1,63	(E)	0,09	1,17	(E)

Tab. 3.51

		Sur les matériaux				sur les méthodes des essais		
Type de béton	Age	X moy.	s	V %	Commentaires	σ_1	V1%	Commentaires
2% de fibres	7j	7,83	0,54	6,89	(B)	0,59	7,59	(M)
	14j	7,39	0,38	5,15	(B)	0,59	7,95	(M)
	28j	7,90	0,66	8,33	(m)	0,59	7,52	(M)

Tab. 3.52

		Sur les matériaux				sur les méthodes des essais		
Type de béton	Age	X moy.	s	V %	Commentaires	σ_1	V1%	Commentaires
3% de fibres	7j	7,81	0,87	11,13	(M)	0,34	4,34	(m)
	14j	7,44	0,33	4,46	(E)	0,32	4,29	(m)
	28j	8,55	0,55	6,39	(B)	0,60	7,02	(M)

EVALUATION DES RESULTATS
 Traitement statistique
Evaluation des résultats de résistance de compression

Tab. 3.53

		Sur les matériaux				sur les méthodes des essais		
Type de béton	Age	X moy.	s	V %	Commentaires	σ_1	V1%	Commentaires
Témoin	7j	20,47	1,76	8,58	(m)	1,92	9,39	(M)
	14j	22,96	2,47	10,75	(M)	2,83	12,31	(M)
	28j	35,08	0,97	2,78	(E)	0,90	2,58	(E)

Tab. 3.54

		Sur les matériaux				sur les méthodes des essais		
Type de béton	Age	X moy.	s	V %	Commentaires	σ_1	V1%	Commentaires
1% de fibres	7j	21,53	1,05	4,89	(E)	1,09	5,04	(M)
	14j	29,34	1,16	3,94	(E)	0,68	2,31	(E)
	28j	35,31	1,29	3,65	(E)	1,09	3,07	(B)

Tab. 3.55

		Sur les matériaux				sur les méthodes des essais		
Type de béton	Age	X moy.	s	V %	Commentaires	σ_1	V1%	Commentaires
2% de fibres	7j	21,88	1,55	7,10	(m)	0,79	3,62	(B)
	14j	30,17	0,36	1,20	(E)	3,28	10,87	(M)
	28j	33,99	0,72	2,12	(E)	0,79	2,33	(E)

Tab. 3.56

		Sur les matériaux				sur les méthodes des essais		
Type de béton	Age	X moy.	s	V %	Commentaires	σ_1	V1%	Commentaires
3% de fibres	7j	23,29	0,14	0,62	(E)	0,50	2,14	(E)
	14j	29,85	1,97	6,59	(B)	2,49	8,33	(M)
	28j	37,05	1,72	4,65	(E)	1,24	3,36	(B)

EVALUATION DES RESULTATS

Traitement statistique

Evaluation des résultats de densification des fibre, indices sclérométrique, ultrasonique
Sur les matériaux

Tab. 3.57

		Densification				indices sclérométriques				ultrasonique			
Type B	Age	X moy.	s	V %	Comm.	X moy.	s	V %	Comm.	X moy.	s	V %	Comm.
Témoïn	7j	/	/	/	/	22,63	2,13	9,43	(m)	4691	0,46	0,01	(E)
	14j	/	/	/	/	26,75	1,28	4,79	(E)	4887	0,35	0,01	(E)
	28j	/	/	/	/	28,63	1,19	4,15	(E)	5705	0,09	0,00	(E)

Tab. 3.58

		Densification				indices sclérométriques				ultrasonique			
Type B	Age	X moy.	s	V %	Comm.	X moy.	s	V %	Comm.	X moy.	s	V %	Comm.
1% de fibres	7j	0,53	0,06	11,07	(M)	24,13	2,23	9,25	(m)	4556	0,53	0,01	(E)
	14j	0,56	0,08	14,41	(M)	27,88	1,81	6,49	(B)	5040	0,23	0,00	(E)
	28j	0,47	0,21	44,86	(M)	28,38	1,92	6,78	(B)	5787	0,12	0,00	(E)

Tab. 3.59

		Densification				indices sclérométriques				ultrasonique			
Type B	Age	X moy.	s	V %	Comm.	X moy.	s	V %	Comm.	X moy.	s	V %	Comm.
2% de fibres	7j	0,89	0,06	6,91	(B)	23,13	3,87	16,74	(M)	4590	0,29	0,01	(E)
	14j	0,89	0,10	10,75	(M)	28,50	1,93	6,76	(B)	5050	0,03	0,00	(E)
	28j	0,85	0,38	45,17	(M)	29,38	1,19	4,04	(E)	5957	0,46	0,01	(E)

Tab. 3.60

		Densification				indices sclérométriques				ultrasonique			
Type B	Age	X moy.	s	V %	Comm.	X moy.	s	V %	Comm.	X moy.	s	V %	Comm.
3% de fibres	7j	1,04	0,06	6,12	(B)	23,50	3,51	14,92	(M)	4452	0,90	0,02	(E)
	14j	1,05	0,07	6,72	(B)	27,63	1,85	6,69	(B)	4695	0,25	0,01	(E)
	28j	1,16	0,48	41,81	(M)	29,50	2,07	7,02	(m)	5562	0,26	0,00	(E)

Tab. 3.61 CORRELATION ENTRE LES DIFFERENTES VARIABLES (Age 7 jours)

	%	ch TF	Densif	Comp.	IS	US
%		0,94	0,97	0,98	0,33	-0,89
ch TF			0,96	0,85	0,17	-0,71
Densif				0,93	0,43	-0,86
Comp.					0,43	-0,96
IS						-0,64
US						

Tab. 3.62 CORRELATION ENTRE LES DIFFERENTES VARIABLES (Age 14jours)

	%	ch TF	Densif	Comp.	IS	US
%		0,96	0,97	0,84	0,58	-0,44
ch TF			1,00	0,96	0,79	-0,16
Densif				0,95	0,76	-0,21
Comp.					0,91	0,10
IS						0,48
US						

Tab. 3.63 CORRELATION ENTRE LES DIFFERENTES VARIABLES (Age 28 jours)

	%	ch TF	Densif	Comp.	IS	US
%		0,98	1,00	0,47	0,84	-0,20
ch TF			0,96	0,62	0,83	-0,39
Densif				0,41	0,82	-0,13
Comp.					0,22	-0,94
IS						-0,07
US						

Tab. 3.64 CORRELATION "BETON TEMOIN IS ET US" (Age 7jours)

	IS	US
Comp.	0,69	-0,30

Tab. 3.65 CORRELATION "BETON TEMOIN IS ET US" (Age 14 jours)

	IS	US
Comp.	0,99	0,97

Tab. 3.66 CORRELATION "BETON TEMOIN IS ET US" (Age 28 jours)

	IS	US
Comp.	0,22	-0,94

Tab. 3.67 Influence la longueur des fibres sur la résistance en compression

Type de béton	Longueur mm	charge de compression kN			Résistance à la compression Mpa		
		Ch 7	Ch14	Ch 28	Rc 7	Rc 14	Rc 28
B1	15,00	280,00	325,00	400,00	28,00	32,50	40,00
B2	22,50	299,50	360,00	410,00	29,95	36,00	41,00
B3	30,00	310,00	390,00	465,00	31,00	39,00	46,50
B4	37,50	295,00	355,00	407,50	29,50	35,50	40,75
B5	45,00	260,00	335,00	385,00	26,00	33,50	38,50

Tab. 3.68 Influence du pourcentage des fibres sur la résistance en compression

Type de béton	% de fibres	charge de compression kN			Résistance à la compression Mpa		
		Ch 7	Ch14	Ch 28	Rc 7	Rc 14	Rc 28
B0	0	220,00	269,00	298,00	22,00	26,90	29,80
B1	1	246,00	290,00	335,00	24,60	29,00	33,50
B2	2	279,00	320,00	364,00	27,90	32,00	36,40
B3	3	248,00	306,00	342,00	24,80	30,60	34,20
B4	4	240,00	293,00	340,00	24,00	29,30	34,00

Fig. 3.1 influence de la longueur des fibres sur la résistance du béton

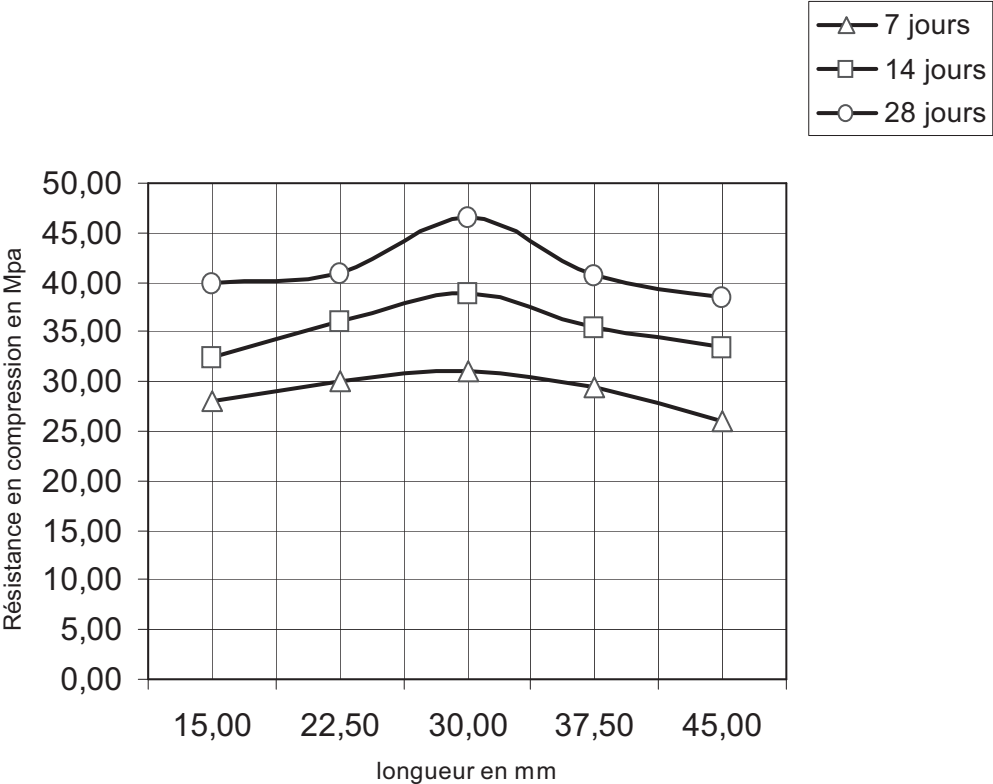


Fig. 3.2 influence du % de fibres sur la résistance en compression

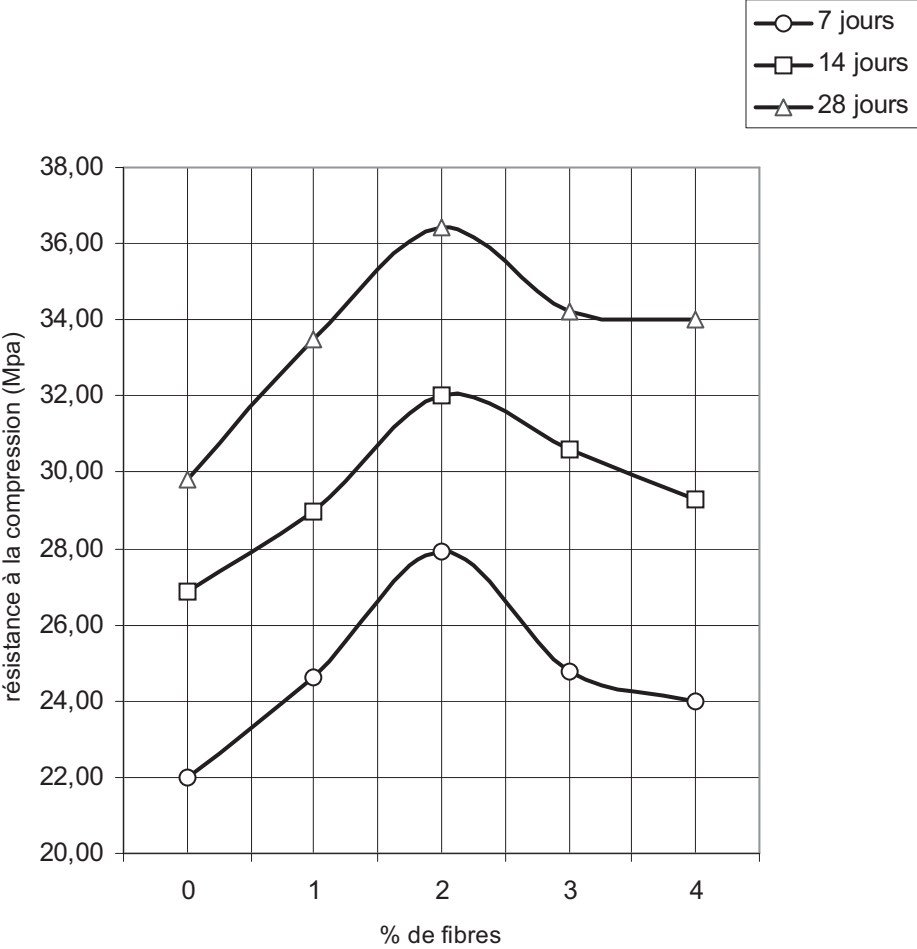


Fig. 3,3 Résistance en fonction de l'âge pour différentes longueurs de fibres

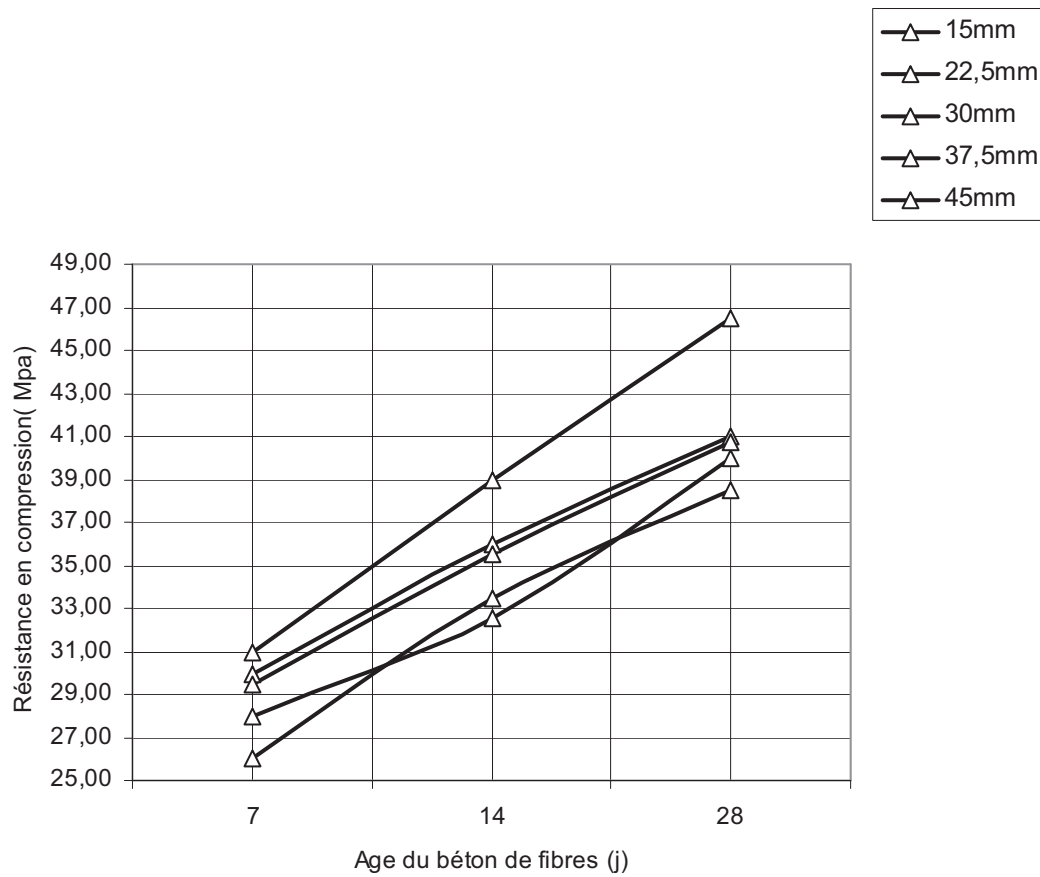


Fig. 3.4 résistance à la compression en fonction de l'âge pour différents % de fibres-

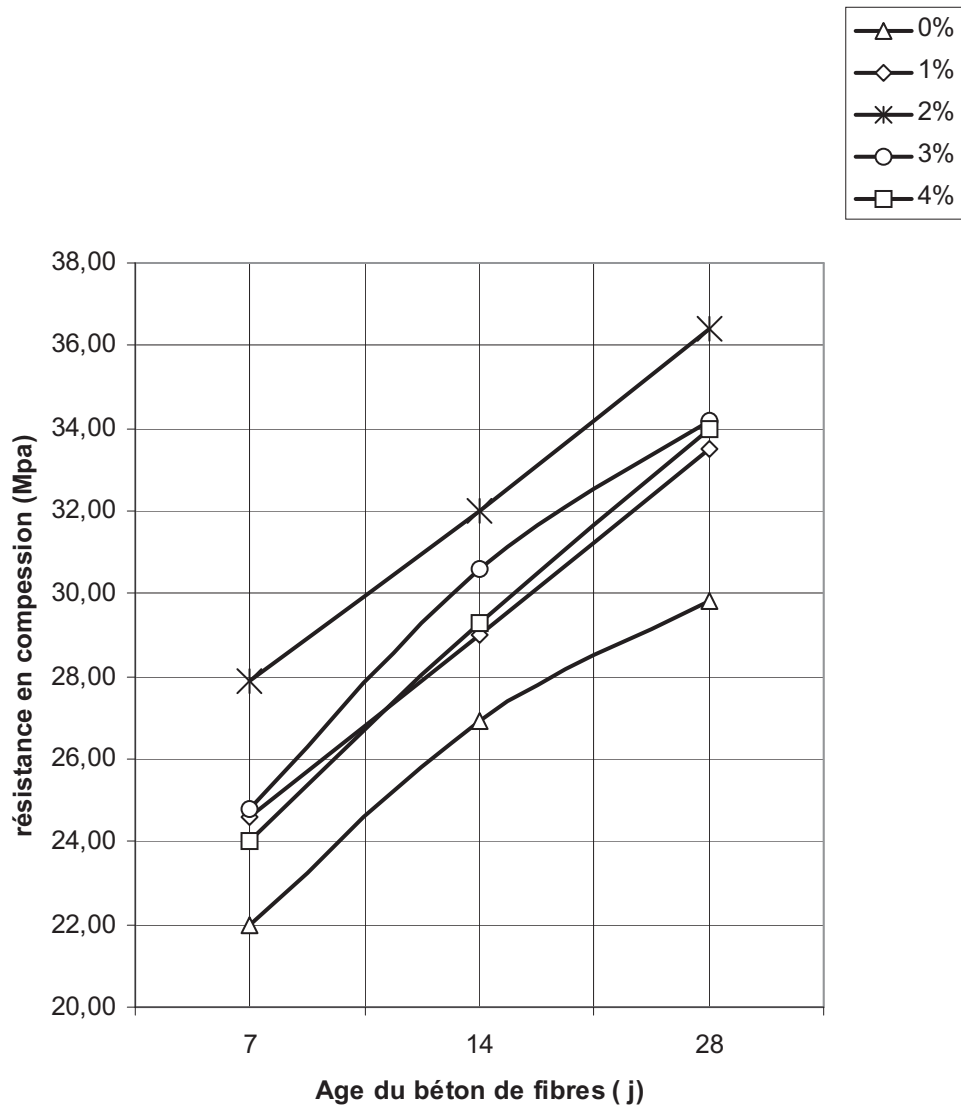


fig. 3.5 Influence du % de fibres sur la résistance en traction par flexion (Age 7,14 et 28 j)

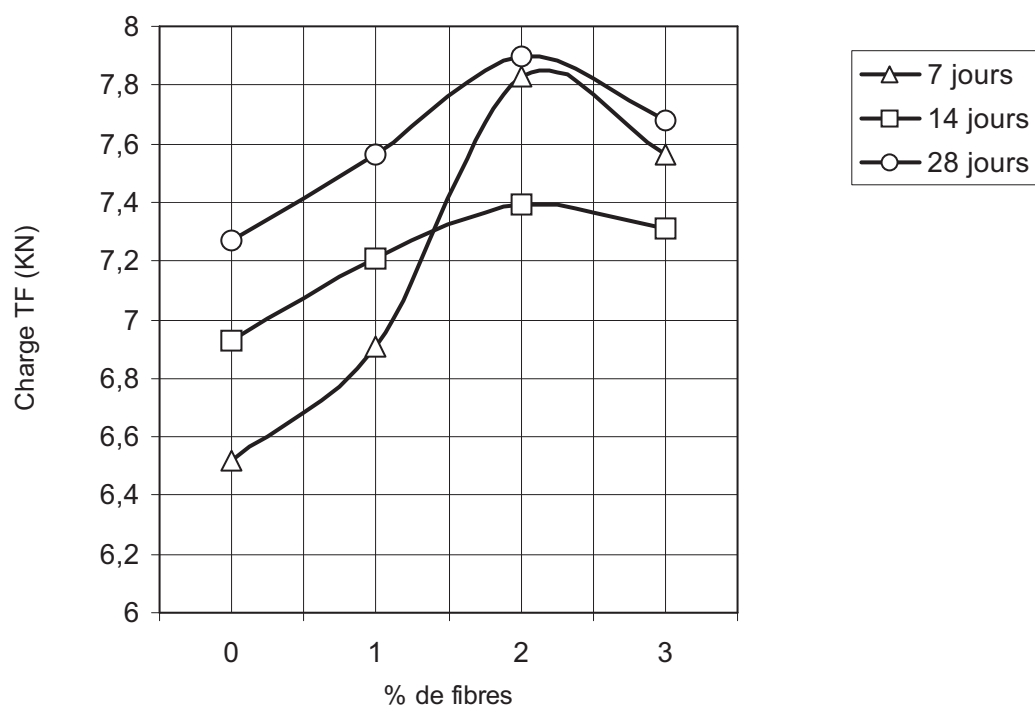


fig. 3.6 influence du % de fibre sur la résistance en compression (Age 7,14, et 28 j)

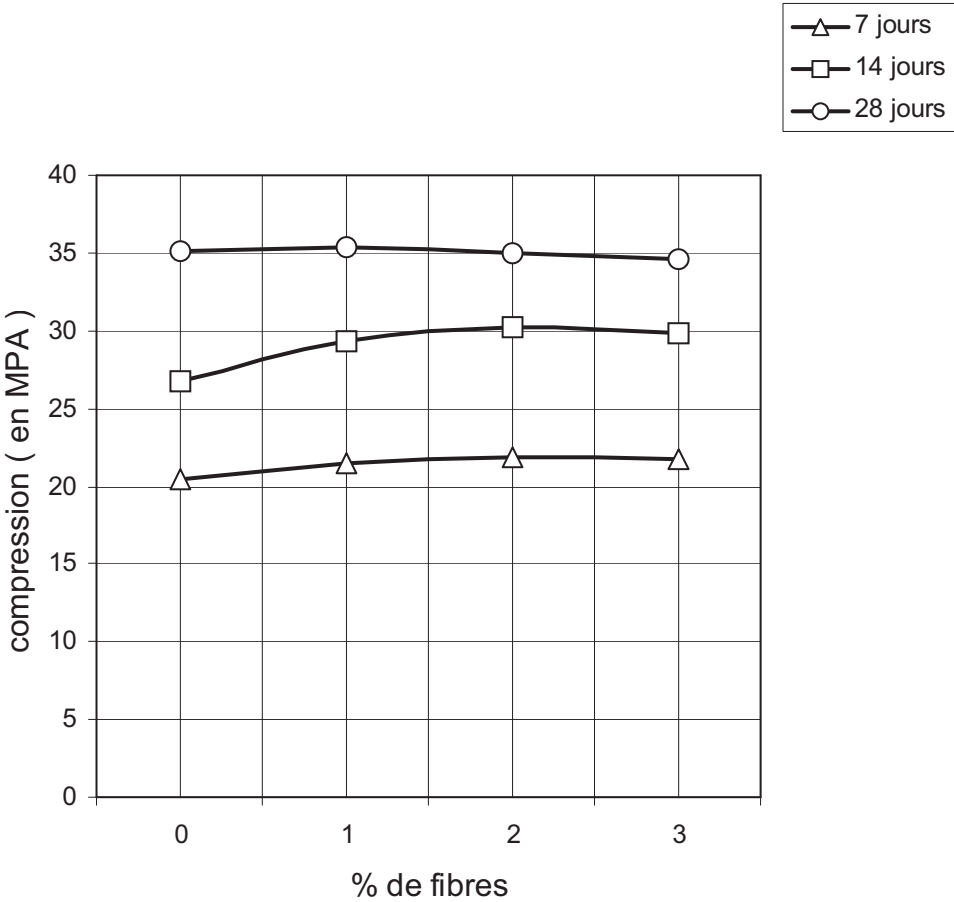


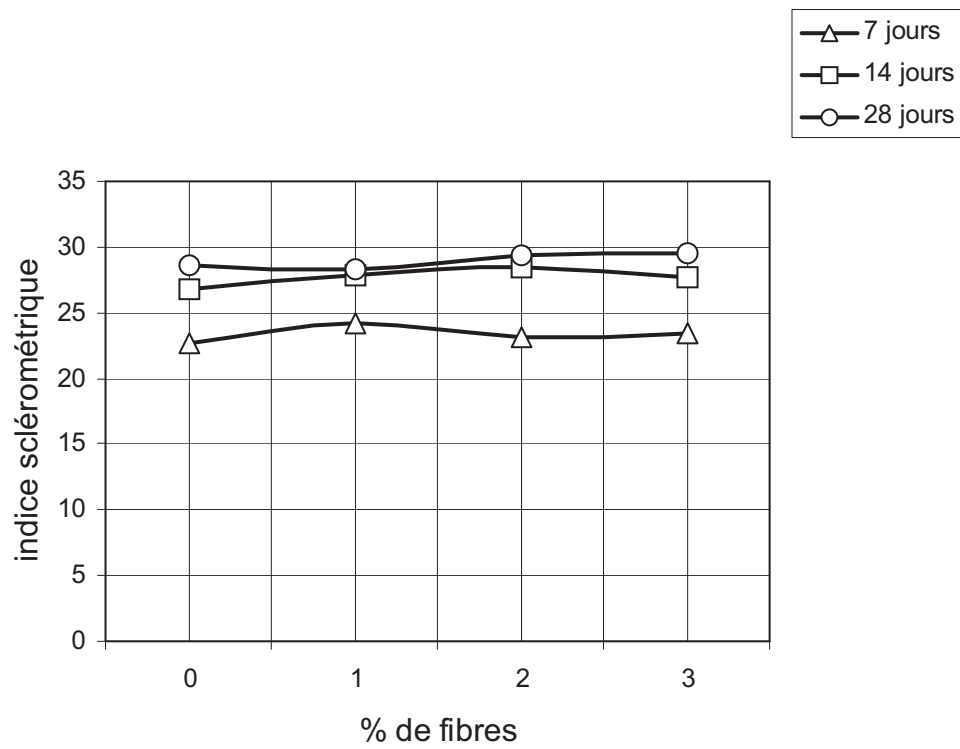
fig. 3.7 impact % de fibre sur l'IS (Age 28 j)

fig. 3.8 Impact des fibres sur l'US (Age 28 jours)

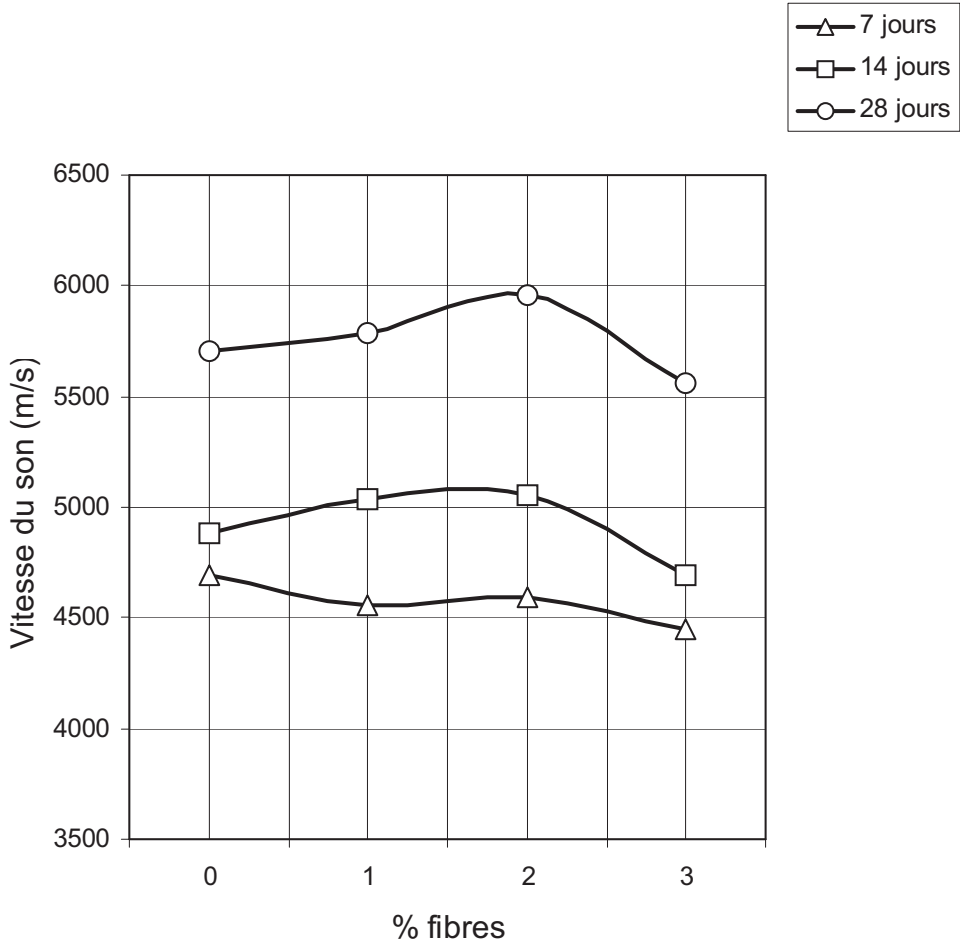


fig. 3.9 Résistance T-Flexion en fonction de l'âge

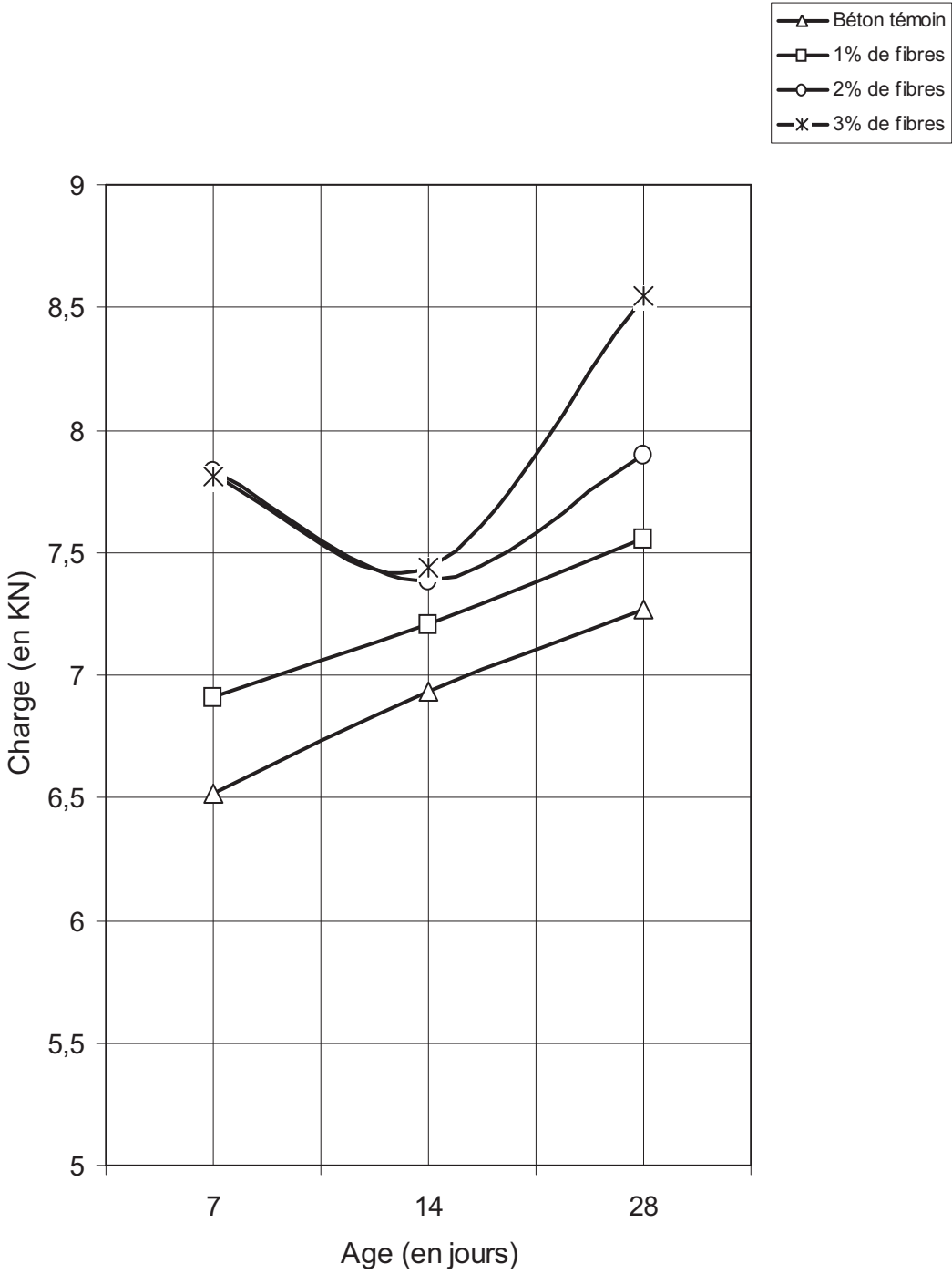


fig. 3.10 Résistance en compression en fonction de l'âge

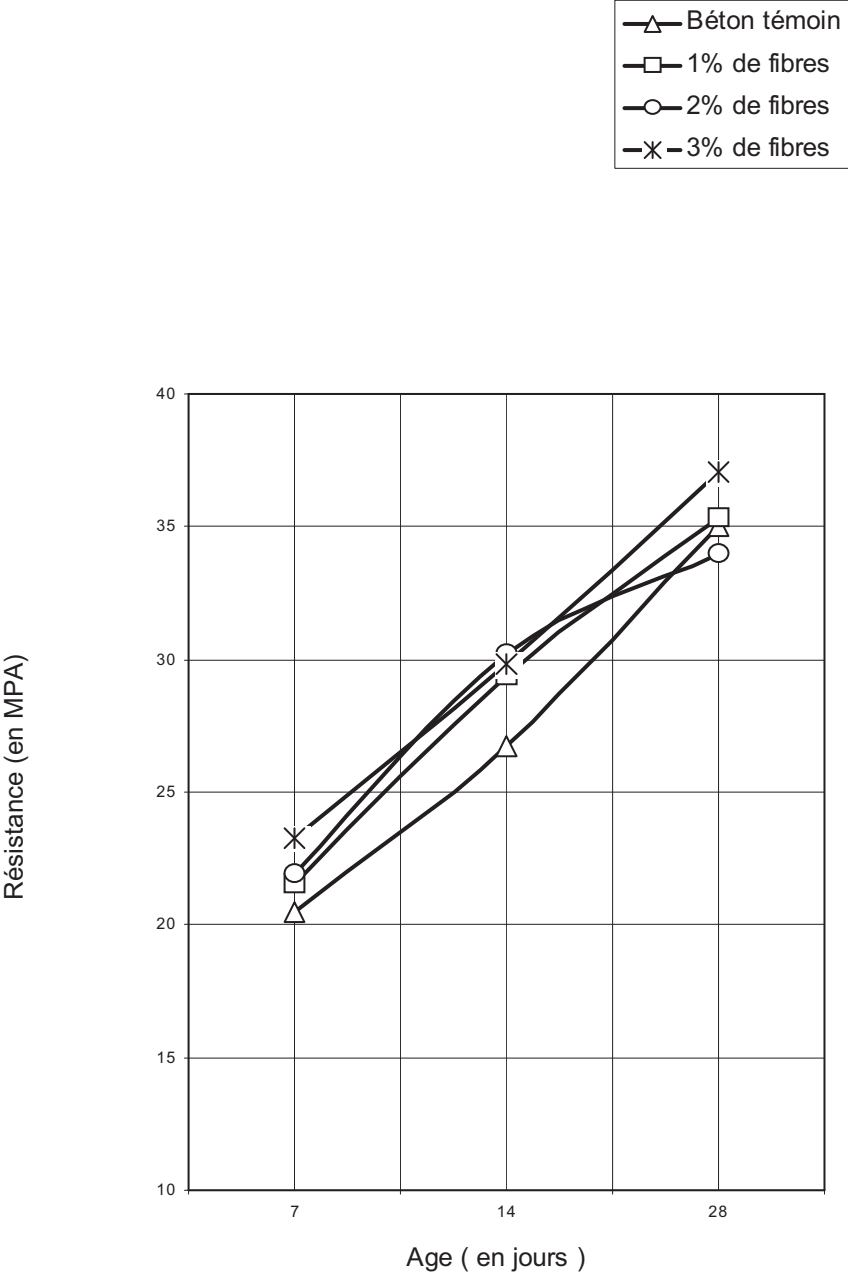


fig. 3.11 indice sclérométrique en fonction de l'âge du béton

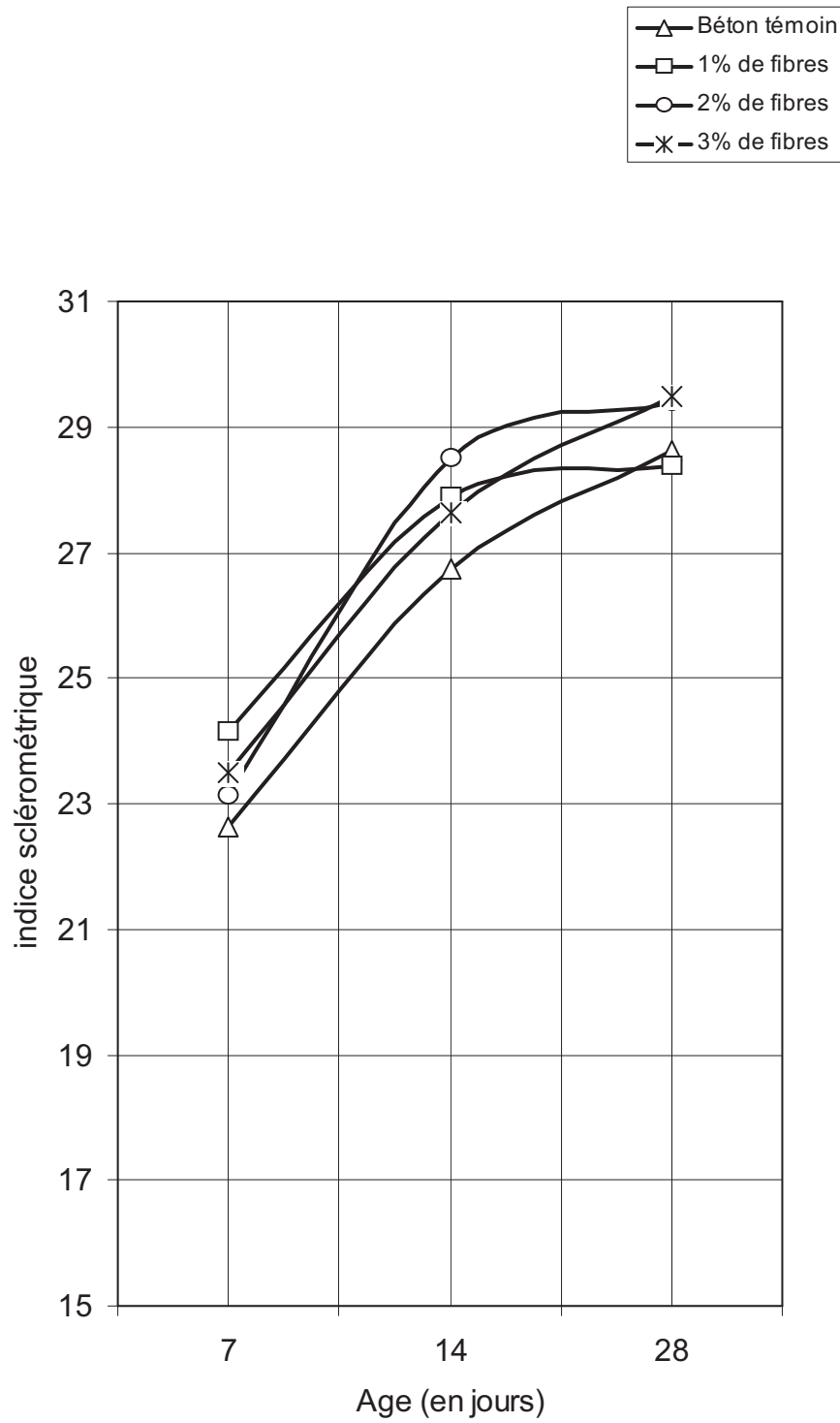
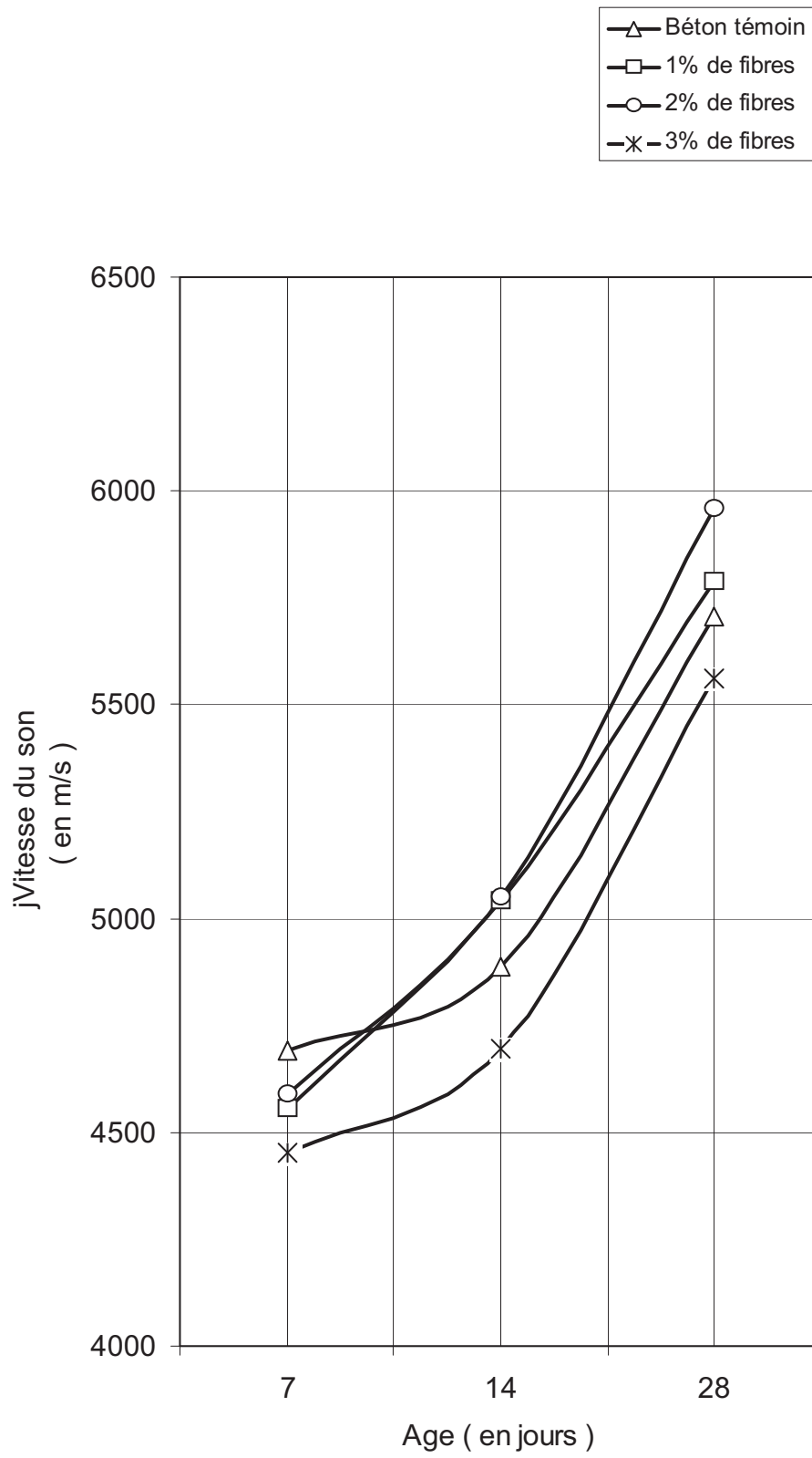


fig. 3.12 Vitesse du son en fonction de l'âge du béton



CHAPITRE IV

Concept, analyse et interprétation

4.1 – Concept :

Nous avons jugé opportun de baser l'analyse et l'interprétation des résultats des essais entrepris, sur des fondements scientifiques, qui ont fait leur preuve dans beaucoup de domaines de la recherche et de la fabrication en générale, ces fondements constituent à l'heure actuelle un concept de premier ordre sur le plan de la qualité et de l'économie de toute entreprise.

Ce concept repose essentiellement, sur des outils mathématiques, particulièrement une branche de celle-ci, qui est la statistique ; cette science, permet l'élaboration de modèles probabilistes autorisant les prévisions, à partir de recueils et de l'analyse de données réelles.

La statistique est utilisée avec grande importance dans le domaine de la construction en particulier dans l'immobilier, comme élément dans le maintien de la qualité du produit livré et l'assurance de l'utilisateur, vis à vis de la sécurité, et permet dans beaucoup de circonstances, la prise de décision de l'acceptation ou du refus du produit selon des règles convenues entre les parties « client – intervenants », notamment :

- Les fournisseurs.
- Les entrepreneurs.
- Les laboratoires.

Tous les intervenant sont responsables sur le plan qualité et sécurité, sans exclure celle du laboratoire, qui est tenu de faire des essais précis, sinon on verra sans doute l'entrepreneur pénalisé inutilement. Le laboratoire est soumis lui aussi comme le reste des intervenants à contrôle, sur ses équipements et son personnel par instauration de procédures de contrôle de la qualité

4.2 Données utiles :

Tab. 4.1 Rapport de résistance aux différents âges [18]

Age béton en jour	3	7	14	21	28	90
Rapport $f_{c_j}/f_{c_{28}}$	0,41	0,62	0,81	0,92	1	1,34

$$f_{c_j} = 0.685 f_{c_{28}} \log(j+1) \quad (4.1)$$

relation entre la résistance en compression et en traction [18]

$$f_{t_j} = 0,6 + 0,06 f_{c_j} \quad (4.2)$$

pour une résistance nominale de 27 Mpa, à 28 jour d'âge, nous aurons une résistance de référence nominale de :

$$f_{t_{28}} = 0,6 + 0,06 \times 27 = 2,22 \text{ Mpa.}$$

Résultats correspondant à 28 jours d'âge :

Résultats relatifs respectivement à la résistance en compression et en traction par flexion, pour les différents pourcentage de fibres, voir Fig. 3.5 et 3.6 chapitre III, page 72.

Tab. 3.2 résultats de compression

Type de béton	fcr (Mpa)	fcr/f ^c	V %	P(z) %	% de la moyenne	Soit en Mpa
Béton témoin	35,08	1,30	2,78	99,50	93	32,62
1% de fibres	35,31	1,31	3,65	99,50	92	32,48
2% de fibres	33,99	1,26	2,12	99,50	95	32,29
3% de fibres	32,05	1,18	4,65	99,50	84	26,92

Tab. 3.3 résultats de traction par flexion

Type de béton	Charge en KN	Moment KNm	Traction Mpa	F _{tj} /f ^c _j	V %	P(z) %	% de la moyenne	Soit en Mpa
Béton témoin	7,27	0,25	2,62	1,18	1,57	99,50	96	2,51
1% de fibres	7,56	0,26	2,73	1,23	1,63	99,50	96	2,62
2% de fibres	7,90	0,28	2,94	1,32	8,33	99,50	81	2,38
3% de fibres	7,68	0,27	2,83	1,27	6,39	99,50	85	2,41

Traction – flexion :

Traction de référence : 2,22 Mpa.

$$f_{tj} = 3,6 \frac{M}{a^3}, \quad M = \frac{Pa}{2}, \quad a = 0,07 \text{ m}$$

Nota : P(z) probabilité d'acceptation.

Voir figures - 2.17 courbes de distribution cumulée pour différent coefficient de variations.

- 2.18 rapport, fcr/f^c en fonction du coefficient de variation et de la chance de tomber en dessous de f^c

4.3 Analyse et interprétation :

1. En analysant les résultats des tableaux 4.2 et 4.3, nous pouvons affirmer que les méthodes des essais ont été menées d'une façon correcte, à savoir, que les résultats du point de vue de la qualité, sont acceptables à plus de 99,50%. Nous notons que les résultats sont un peu dispersifs, essentiellement pour les forts pourcentages de fibres et particulièrement pour les essais de traction par flexion.
2. L'analyse de la figure 3.8 chapitre 3 page 74, correspondante à l'impact des fibres sur l'onde sonore, montre nettement la décroissance de la vitesse de la propagation du son, aux différents âges et en fonction de l'augmentation du pourcentage de fibres.

3. L'augmentation des résistances est plus ou moins croissante et s'accorde avec l'âge, dont les résultats sont en majorité, appréciables.
4. Les essais non destructifs semblent être en concordance avec l'âge du béton et du pourcentage de fibres.
5. Lors des ruptures des éprouvettes, en traction par flexion, nous avons constaté que :
 - 5a. Les fibres métalliques se sont arrachées de la matrice du béton sans être rompues.
 - 5b. L'engrènement des fibres (position, direction et densité), n'étant pas régulière, en observant les sections droites des éprouvettes rompues.

Conclusions:

Sur la base des résultats expérimentaux, des remarques dégagées, et des outils en notre possession, nous aboutissons aux conclusions suivantes :

1. Dans l'ensemble des observations, nous constatons un pic correspondant à 2% de fibres et de longueur 3 cm, ces caractéristiques semblent être un optimum pour une résistance souhaitable.
2. Diminution de la vitesse de l'onde sonique, qu'on peut expliquer au fait de l'élongation du temps de la propagation du son dans la masse du béton, qui par la présence des fibres lui font parcourir un chemin plus long.
3. L'irrégularité des résistances semble être due, d'une part aux méthodes des essais, qui sont plus ou moins bon, ont influé probablement négativement sur les résultats, d'autre part, par la densification des fibres ; en se référant aux tableaux 3.57 à 3.60 portants sur l'évaluation des résultats de densification des fibres, indices sclérométriques et ultrasoniques, sur les matériaux, nous relevons des variabilités excessives fluctuant de 6,12 à 45,17 %.
4. La densité des fibres et leur position, constituent un paramètre prépondérant à l'aboutissement de résultats performants des résistances du béton et particulièrement en traction, les mêmes tableaux énumérés au point 3 ci-dessus, nous renseignent, que la qualité liée à ce paramètre est de mauvaise qualité dans la majorité des cas, cela ne signifie pas que la qualité du béton est mauvaise, mais peut constituer un risque sur la résistance du béton ; du fait que les fibres sont placées dans la masse du béton d'une façon tout à fait aléatoire et très probablement on peut tomber dans des zones de faibles densités en fibres.

Les conséquences sur la tenue des structures constituent une situation, qui peut peser lourdement sur l'économie de l'entreprise ainsi que sur la sécurité des usagers, de toute manière et d'une façon raisonnée, l'incorporation des fibres dans la masse du béton apporte sans aucun doute un plus dans l'amélioration de la qualité du béton, comme nous le constatons à travers les résultats. Une difficulté se pose dans ce contexte et concerne l'engrènement des fibres avec le béton, cette caractéristique importante dans l'uniformité des résultats des résistances du béton constitue un problème de l'heure, et ne peut être atteinte que par une solution technologique, qui peut être envisageable dans l'avenir, visant à mettre en place les fibres dans la masse du béton, de la manière la plus régulière possible

en position, direction et densité. Toute fois, nous pouvons toujours employer avantageusement les fibres, conjointement avec les armatures.

5. Les essais non destructifs semblent se concorder avec l'âge du béton de fibre, pour s'en assurer d'avantage sur ces types d'essais, il serait raisonnable de multiplier le nombre des essais, de cette façon, nous réduisons fortement le risque d'erreur d'appréciation dans l'emploi de tels outils et pour de tels type de béton ; Nous ne pouvons être formels de l'efficacité de ces essais pour les bétons de fibres, sachant que l'influence des aciers sur la lecture des données est fortement marquée. La recherche entreprise repose sur un nombre d'essais restreint (voir tableaux 3.57 à 3.60) les variabilités pour les indices sclérométriques s'étalent de moyens à bons, pour les ondes soniques, sont excellents, en dépit du peu d'essais obtenus. Toute fois, on se réserve, d'être prudent dans l'emploi de tels outils d'investigation, qui demandent nécessairement la multiplication des essais, ainsi que leur identification vis à vis des bétons de fibres employés, afin d'une part, de parvenir à l'uniformité des résultats, d'autre part d'assurer un contrôle adéquat des structures de béton, de cette façon, les données obtenues reflèterons sans grande marge d'erreurs les résultats réels escomptés.
6. Une caractéristique importante se rapportant à la résistance en traction, facteur d'amélioration de cette dernière, concerne la forme des fibres, sachant que dans notre expérimentation, les fibres employées sont de forme simple, ayant été arraché de la matrice de béton, cette situation nous permet de dire que l'adhérence de telles fibres est insuffisante, pour s'en assurer de l'efficacité des formes des fibres vis à vis de l'adhérence, nous espérons que des expériences en ce sens seront entreprises à l'avenir en variant les formes des fibres.

A la lumière de tous les éléments obtenus, nous espérons avoir contribuer d'une façon utile et avantageuse, dans cet axe de recherche et avoir apporter réponse à certaines interrogations touchant les bétons de fibres.