

UNIVERSITE MOHAMED KHIDER - BISKRA
FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

N° d'ordre:.....

Série:

MEMOIRE DE MAGISTER

Option : Matériaux De Construction

Présenté par :

BELARIBI HASSIBA

THEME

L'EVALUATION DE LA QUALITE DU BETON DE FIBRES
IN SITU PAR LES ESSAIS NON DESTRUCTIFS
(METHODE COMBINEE ULTRASON ET SCLEROMETRE)

Soutenu le : .../.... / 2007

Devant le jury :

Président	: B. MEZGHICHE	M.C	Université de Biskra
Rapporteur	: M. MELLAS	P _r . H _A	Université de Biskra
Examineur	: A. GUETTALA	M.C	Université de Biskra
Examineur	: R. CHEBILI	M.C	Université de Biskra

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction le plus utilisé au monde. Le béton, malgré son commun usage, demeure un matériau complexe. Matériau également économique et polyvalent, c'est ainsi qu'il continue encore aujourd'hui d'étonner, alors qu'il réussit sans cesse à relever les défis de l'imaginaire, aussi bien que ceux commandés par l'économie et l'environnement. Plus que jamais, le béton répond avec brio aux réalités d'aujourd'hui. Autant le béton est solide et durable, autant il est fragile avant sa mise en place.

Deux caractéristiques ont néanmoins limité son utilisation : il est fragile et résiste mal à la traction. Ce digest décrit les propriétés générales et l'utilisation en construction du béton de fibres. La promesse d'éléments plus minces, plus résistants, plus légers et moins sujets à la fissuration par la simple addition d'une petite quantité de fibres rend cette innovation très intéressante.

Ainsi apparût le béton de fibres dont l'usage devient de plus en plus répandu à travers le monde. Des milliers, voire des millions de tonnes de fibres sont ajoutées au béton chaque année dans le but d'améliorer l'une ou l'autre de ses propriétés (résistance, ténacité, contrôle de la fissuration...).

Les fibres sont ajoutées à la gâchée de béton, qui contient habituellement du ciment, de l'eau et des granulats fins et grossiers. Le béton fibré permet d'éliminer le poste de ferrailage, puisque les fibres remplacent le treillis soudé. Parmi les fibres les plus utilisées, citons les fibres métalliques, de verre, d'amiante et de polypropylène .et aussi les fibres de carbone sous forme de lamelles et tissus.

Les méthodes non destructives d'essai (NDT) ont été employées pour évaluer la résistance du béton ordinaire ou béton de fibres dans beaucoup de pays, et des études expérimentales ont étudié quelle est la méthode la plus fiable et la plus pratique. Cette recherche fondamentale est nécessaire en raison du manque de compréhension de la façon dont le béton de fibres répond aux différentes méthodes non destructives.

La méthode normalisée utilisée pour évaluer la qualité du béton de fibres dans les bâtiments ou les ouvrages comprend les essais de résistance à la compression, à la flexion et à la traction effectués sur des éprouvettes coulées au même moment. Les principaux désavantages de cette méthode sont les suivants :

- Les résultats ne sont pas obtenus immédiatement.

- Le béton fabriqué en laboratoire peut rarement avoir la même qualité que celui fabriqué sur site, qui est exposé aux différentes conditions climatiques, de transport, de vibration et de curage. L'environnement au laboratoire ne peut pas être stimulé à celui sur site.
- Les propriétés de résistance d'une éprouvette de béton dépendent de sa grosseur et de sa forme.

Cette recherche s'est attachée à estimer en utilisant les courbes qui corrélient les mesures des méthodes non destructives avec la résistance à la compression du béton de fibres établie par un programme d'essai en laboratoire. Habituellement les paramètres qui affectent ces courbes sont le rapport eau/ciment, le pourcentage de fibres, l'âge du béton et les conditions de conservation.

Outre l'introduction générale, ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

Les chapitres I et II constituent la première partie qui est consacrée à la revue de la documentation.

- Chapitre I donne un aperçu général sur le béton de fibres (constituants, propriétés etc).
- Chapitre II comporte une recherche bibliographique sur les méthodes non destructives d'évaluation de la qualité du béton in situ soulignant leurs avantages et leurs inconvénients. et l'utilisation combinée de la méthode de marteau de Schmidt (le scléromètre à béton) avec la méthode ultrasonique de vitesse d'impulsion. Ainsi que les expressions de corrélation entre la résistance de béton in situ avec l'indice sclérométrique et la vitesse de son.

Les chapitres III, IV, constituent la deuxième partie qui est consacré à l'étude expérimentale.

- Chapitre III présente les caractéristiques des matériaux utilisés, les mélanges préparés et les procédures à suivre.
- Dans le chapitre IV nous présentons les résultats obtenus pour la résistance à la compression, l'indice sclérométrique et la vitesse du son. L'analyse de ces résultats qui nous permettent d'établir des corrélations entre la résistance à la compression, et l'indice sclérométrique et aussi entre la résistance à la compression, et la vitesse du son ainsi qu'une application de la formule obtenue par corrélation sur des carottes enlevées d'une dalle fabriquée in situ.

Enfin, une conclusion qui propose une synthèse des résultats obtenus, et les recommandations.

Abreviations

B.F	:	Béton de fibres.
ARE	:	Adjuvants réducteurs d'eau.
CRV	:	Ciment renforcé de fibres de verre.
GRC	:	Glass reinforced concrete.
CNERIB	:	Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment.
END	:	Les essais non destructifs.
MEDFLUID (SF)	:	Adjuvant superplastifiant réducteur d'eau.
C S H	:	Silicate De Calcium Hydraté.
C H	:	Chaux.
BS	:	British Standard.
ACI	:	American concrete institute.
ASTM	:	American society for testing and materials.
CPJ-CEM II/A 42.5	:	Ciment Portland composé
M_T	:	Béton témoin (0% de fibres)
M_{0.5}	:	Béton avec 0.5% de fibres
M₁	:	Béton avec 1 % de fibres
M_{1.5}	:	Béton avec 1.5 % de fibres
C1_{0.5}	:	Carotte n : 1 avec 0.5% de fibres
C2_{0.5}	:	Carotte n : 2 avec 0.5% de fibres

CHAPITRE I :

LE BETON DE FIBRES

Dans ce chapitre nous allons décrire ou faire connaître, historiquement, ce nouveau constituant (fibres), son influence sur la matrice cimentaire, le nouveau comportement mécanique, thermique et d'autres propriétés du béton contenant les fibres ; sans oublier de mentionner les avantages des fibres dans le béton , et leurs domaines d'utilisations.

I.1. Introduction:

Pour présenter le béton de fibres, nous avons pris le parti de suivre l'itinéraire des matériaux de base que l'on associe pour leurs comportements respectifs transmettant, par un effet synergétique, de nouvelles propriétés au composite créé. Ainsi successivement nous abordons la présentation du matériau de base (les fibres), sa formulation, son comportement et ses propriétés.

Ce choix s'impose pour positionner notre étude. En effet, il convient de montrer par une recherche les nombreux paramètres qui influencent le comportement de ce composite dont la matrice est un matériau vieillissant, poreux, retenant l'eau, dont la stabilité est fonction de l'hygrométrie ambiante, présentant un état initial complexe (micofissures, déformations) ; quant aux fibres, elles sont de nature et de géométrie très diverses.

I.2. Historique du béton de fibres:

Historiquement, il n'y a pas une confirmation quant est-ce le concept du béton par des fibres a été connu en premier lieu. Une analyse profonde de ce concept nous indique que cette idée est très ancienne et date depuis l'antiquité. C'est ainsi qu'au cours de l'histoire la technologie des matériaux a été jalonnée par l'apparition de composite de texture de plus en plus complexe.

D'après Exode 5:6 les Egyptiens ont utilisé la paille pour renforcer les briques de boue. Il y a aussi une certitude que les fibres d'amiante ont été utilisées dans le renforcement des poteries en argile, en Finlande, il y'a de cela 5000 années. D'autres sources (Antoine, E.N et Mars 1985 et ACI Committee 554 Mars - Avril 1984), ont indiqué que la paille a été utilisée pour renforcer les briques chez les anciens, tandis que les poils d'animaux et les fibres d'amiantes ont été introduits pour renforcer le plâtre et la pâte du ciment portland. On peut noter aussi la réalisation, au milieu du XX^e siècle, d'alliages métalliques avec fibre de carbone.

Cette réalité a été confirmée par M.Braun avec d'autres chercheurs qui ont rapporté que la première matière renforcée par des fibres a été fabriquée par l'homme en introduisant la paille

et d'autres produits semblables dans des matériaux de construction tel que le mortier, le plâtre etc. . Le professeur Alberto Fava de l'université de Plata en Argentine a écrit que l'hornero, qui est un petit oiseau vivant en Argentine, au Chili et en Bolivie , avait construit avec soin son nid en utilisant bien l'argile renforcée par de la paille depuis des siècles bien avant l'homme .

A la fin du 19^{ème} siècle, les matériaux fibreux ont commencé à devenir courants et plusieurs domaines ont commencé à exploiter ce nouveau matériau.

En Algérie on trouve, chez les anciens, le prisé qui est de l'argile armée hachée en place par compression pour produire ce qu'on appelle le « Toub » qui est une brique de terre stabilisée ou non, moulée manuellement et séchée à l'air libre. Ce type de matériau est utilisé en Algérie en tant que matériau de maçonnerie et joints de murs.

Mais le vrai développement de ce type de matériau peut être attribué à Joseph Lambot. Son brevet qui a été établi en 1847, a suggéré l'ajout des fibres continues sous forme de fils ou bandes en fils d'acier pour créer un nouveau matériau. Vingt sept ans après, l'américain A.Bernard arrivé en Californie a créé une pierre artificielle par l'ajout de granulats en fer recuit dans un mélange de béton. Ensuite, en 1899 un processus de fabrication d'éléments composites à base de ciment et d'amiante a été mis au point par Lhatshele.

En 1910 une série d'essais pour améliorer la résistance du béton a été faite par J.Porter qui a conclu que la présence de fibres courtes dans le béton augmente sa résistance à l'écrasement et à la traction. Par la suite en 1911 Graham a établi un brevet sur les bétons de fibres. C'était le premier brevet américain où il a décrit l'emploi des tranches d'acier comme des renforts fibreux dans les matériaux de construction.

Une année après, en 1912 Weakly déposa un brevet montré sur la figure (I.1).au U.S.A qui consiste à l'utilisation des bandes en fils d'acier fabriquées avec deux fils, avec pour intermédiaire un anneau, afin d'assurer une adhérence durable avec le béton

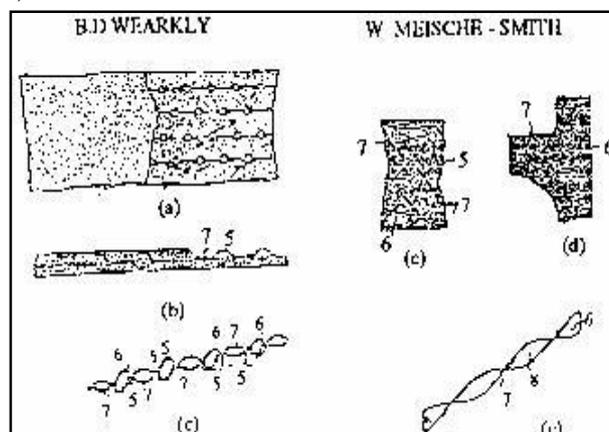


Figure (I.1): Brevet de Weakly (1912)

En 1914 le premier brevet britannique a été établi par Fickley qui a décrit d'une manière assez rigoureuse une recommandation d'inclusion dans le mélange de béton des différentes

pièces métalliques tortueuses. Il a confirmé que la résistance à la fissuration et à la fatigue a été améliorée mais il a noté aussi qu'il n'y a pas une amélioration dans la résistance du composite ni à la traction de même qu'à la compression.

A l'opposé de Fickley, le français H.Alfsen a rapporté dans ses travaux que la résistance à la traction d'un béton avec des petits éléments longitudinaux en fer, en bois ou autres matériaux a été améliorée. Il a suggéré également l'amélioration de l'état de surface des fibres. En effet, d'après Alfsen, les fibres doivent être rugueuses et arrondis aux extrémités afin de leur procurer une bonne adhérence à la matrice en béton.

En 1920, A.Kleinlogel a déposé le premier brevet allemand qui a décrit la synthèse d'ajouter un volume relativement important de particules de fer au béton pour produire une masse capable d'être usiné (par tournage) comme une masse d'acier. A cette période là, une étude sur les bétons avec des fibres de verre a été publiée par Griffith.

Sept années après, en 1927 deux brevets sur les bétons de fibres ont été établis par W.Smith et G.Martin en Californie. Le procédé Martin recommande l'ajout des plaquettes d'acier emboutées ou de fils d'acier dans le béton qui sert à la fabrication des tuyaux. Alors que W.Smith recommande le malaxage des morceaux de fil tordus avec le béton en vue de construire un immeuble en béton armé.

Quelques années après, en 1933 au New Jersey, H.Etheridge a inventé une technique pour améliorer la forme des fibres afin d'augmenter leur contribution. Il a recommandé ensuite d'ajouter au béton des fibres en forme d'anneaux de différentes dimensions et de différents diamètres représenté sur la figure (I.2).

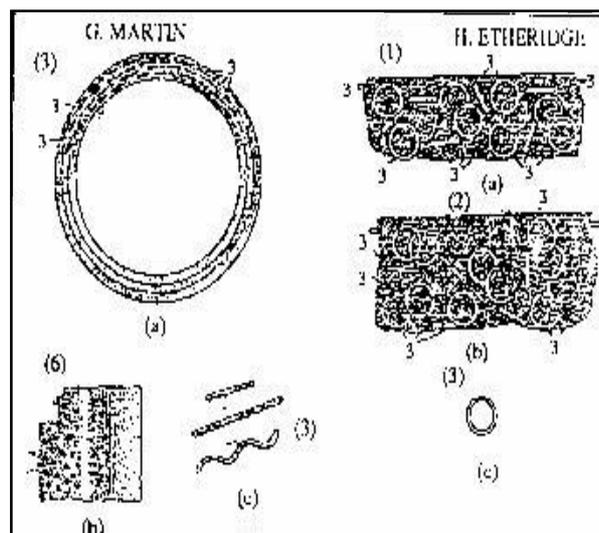


Figure (I.2): Brevet de H.Etheridge et G.Martin (1933)

En 1938, un autre brevet britannique a été établi par N.Zitevic. Son procédé consiste à mélanger avec le béton des petits éléments en fer avec approximativement 100 mm de longueur et 1.00 mm de diamètre. Ces éléments métalliques sont très similaires aux fibres utilisées

aujourd'hui pour armer le béton. Il conclut qu'il y'a une amélioration de la résistance du béton à la compression, à la traction et au cisaillement.

A partir de 1940, plusieurs procédés sont apparus dans différents pays. Ces procédés recommandent en général l'inclusion des fibres dans le béton pour améliorer sa performance. Mais on note ici que celui de G. Constantinesco en 1943 en l'Angleterre et au USA en 1854 représenté sur la figure (I.3), mérite une attention particulière. Les paramètres qu'il a recommandé à l'époque sont similaires à ceux d'aujourd'hui pour le béton de fibres. Il a recommandé également l'emploi de fibres permettant la résistance à la fissuration et à l'absorption de l'énergie par la masse de béton. Il a suggéré l'utilisation de cette composite dans plusieurs domaines spécialement dans la construction des pistes d'aéroport, fondations de machines et tous les ouvrages similaires.

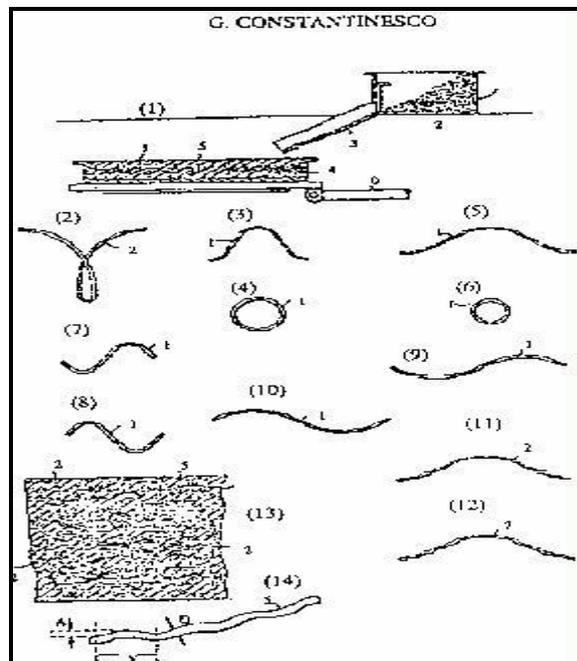


Figure (I 3): brevet de G.Constantinesco 1943

Au début des années soixante, une série de brevets ont été établis par Battelle Développement Corporation. Ces brevets sont basés sur l'utilisation des morceaux d'acier pour le béton. Une amélioration dans la résistance à la traction, l'absorption de l'énergie et la résistance à l'usure a été rapportée dans ces brevets.

En 1963, deux articles ont été publiés par Romuldi et Batson dans lesquels une analyse théorique des résultats donnés par les brevets de Battelle Développement Corporation a été fondée avec des données expérimentales obtenues à l'essai de flexion.

Par la suite, les recherches sur les bétons de fibres ont connu un réel développement grâce aux travaux de Romualdi, Batson et Mandel. Dans ces travaux, qu'on peut qualifier de fondateurs, on décrit les mécanismes de propagation et d'arrêt d'une fissure au sein d'une

matrice fragile. Ils ont aussi développé une analyse théorique des résultats donnés par les brevets de Battelle Développement Corporation et mettent notamment l'accent sur l'influence de l'espacement moyen des fibres sur le comportement du composite.

D'autres chercheurs étaient aussi actifs pendant cette période et à partir de la fin des années soixante plusieurs chercheurs à travers le monde entier sont arrivés à pousser les travaux dans ce domaine vers l'application dans des secteurs de la construction où ce type de béton a été introduit avec beaucoup de fiabilité par rapport aux bétons traditionnels. Le plus grand progrès a commencé en 1970 avec l'incorporation des fibres d'acier dans le domaine de l'industrie réfractaire. Le premier article de ce concept a été publié par Lankard et Sheets dont lequel ils ont affirmé que l'ajout de 1 à 2% de fibres au béton réfractaire donne une amélioration significative à sa résistance, sa ténacité et sa durabilité.

I.3. Présentation du béton de fibres:

Le béton de fibres est un matériau composite (ciment, granulats, fibres et vides) qui peut être considéré comme un matériau composite homogène (même résistance dans toutes les directions). Le ciment utilisé est habituellement un ciment hydraulique, c'est à dire qu'après avoir été mélangé avec l'eau, il fait prise et durcit même en présence d'un excès d'eau. Les granulats peuvent être de forme et de nature minéralogique diverse et ont des dimensions variant de quelques dizaines de microns à quelques dizaines de millimètres. Les fibres sont en acier, en plastique, en verre ou en divers matériaux naturels.

Les propriétés du béton de fibres dépendent de la qualité de la matrice et des caractéristiques de fibres. La matrice considérée est identique à la matrice d'un béton courant avec des granulats plus petits. Pour le renforcement, les fibres sont de types variés. Elles sont de formes et de dimensions différentes liées aux technologies d'élaboration. Chacune de ces catégories de fibres donne au béton des propriétés spécifiques lesquelles dépendent de la nature, la forme géométrique, l'élanement (le rapport de la longueur de la fibre sur le diamètre équivalent à la fibre), et la teneur en volume de fibre.

La fabrication d'un béton de fibre ne consiste pas à mélanger une certaine quantité de fibres à un béton déjà existant. C'est à dire qu'il convient d'ajuster la formulation en fonction des objectifs de mise en oeuvre et de résistance. On ajoute directement des fibres dans le mélange du béton. L'effet de cette addition est la maniabilité décroissante. Pour l'amélioration, il convient d'utiliser une quantité de fine (sable et ciment) plus haute que pour un béton ordinaire. En ce qui concerne les fibres, on utilise une faible longueur et un élanement moyen car il y a risque de former des pelotes qui rendent difficile la mise en oeuvre et nuisent au comportement

mécanique. On peut utiliser aussi des plastifiants pour obtenir une maniabilité acceptable tout en gardant le rapport eau/ciment raisonnable.

I.3.1. La matrice:

Dans le béton de fibres la matrice cimentaire est différente de celle du béton ordinaire par:

- Les teneurs en ciment qui sont ordinairement plus élevées pour le béton de fibres (BF) que pour les bétons classiques; elles varient de 325 à 450 Kg/m³ pour une granulométrie de 0 à 10 mm. (Corneille .A 1979)
- Afin d'améliorer l'ouvrabilité et réduire la teneur en eau, des cendres volantes peuvent être utilisées en remplacement d'une partie du ciment portland, par exemple 50 à 100 Kg/m³ de ciment (Venuat M.1974)
- Il en résulte une amélioration de la plasticité. En abaissant la chaleur d'hydratation et d'obtenir une réduction de coût pour le béton de fibres. (Paillère A.M-Serrano .J 1981)
- Les adjuvants réducteurs d'eau (ARE) ont aussi des effets retardateurs de prise et habituellement facilitent la manipulation du béton de fibres sur le chantier. Il est recommandé que, compte tenu des dosages importants de ciment généralement utilisés pour le béton de fibres, la quantité d'ARE soit maintenue à un niveau inférieur à celle recommandée pour le béton classique. (Milan M.1982)
- Les rapports Eau/ Ciment utilisés dans le béton de fibres doivent faire l'objet d'une intention particulière. La tendance d'augmenter la teneur en eau qui élimine certaines des propriétés avantageuses attendues de l'addition de fibres devrait être évitée. Dans le béton de fibres, des rapports eau/ ciment de 0,41 à 0,48 sont habituels. Les applications à des structures spéciales, notamment le pavage, se traduisent par des rapports E/C plus faibles (0,38 à 0,44) mais il en résulte plus de difficultés de mise en place. (Rice J. L. 1972)

I.3.2. Les Fibres – l'aspect géométrique- :

Il existe un grand nombre de fibres qui se différencient par leur nature, leur diamètre, leur longueur, leur forme et leur état de surface. Elles possèdent des caractéristiques différentes les unes des autres. Nous distinguons les fibres naturelles et les fibres artificielles ou synthétiques ; Ou le tableau (I.1) classe les différents types de fibres selon Venuat M.(1983)

Tableau (I.1) : Différents types de fibres (Venuat M.1983)

Fibres naturelles			Fibres artificielles	
Végétales	Animales	Minérales	Minérales	Organiques
Lin Chanvre Coton Celluloses Sisal	Poil Crin Laine Soie	Amiante de roches Silicomagnésiennes	Laitiers de haut fourneau Laine de roche (basalte) Carbone Céramique Métaux (acier, fonte) Verres spéciaux	Polymères longs dont les molécules sont orientées dans l'axe de fibre

Le choix des fibres dépend de l'usage recherché (pièces mince ou massives, renforcement de pâte pure, de mortier ou de béton, réparation de structure.....), de leurs propriétés (résistance et module plus ou moins élevés, adhérence plus ou moins bonne...) de leur disponibilité et de leurs prix. Il faut mentionner aussi les qualités recherchées pour les fibres :

- être relativement longues, fines, flexibles, ne pas se casser lors du malaxage.
- Posséder une forte résistance en traction;
- Bien adhérer à la pâte du ciment (forme- adaptée état du surface facilitant l'accrochage);
- Avoir un module d'élasticité adapté (parfois très supérieur à celui de la pâte pure du ciment),
- Ne pas être attaquées par le milieu basique du ciment; ni corrodées par le milieu extérieur;
- Être stables dans le temps;
- Être sans danger pour la main-d'œuvre;
- Être efficaces pour un dosage peu élevé;
- Être d'un prix compétitif et acceptable.

Tableau (1.2): Différents types de fibres extrait des travaux de recherche de laboratoire de l'institut national des science

	Nature de la fibre		Forme de la fibre		Coupe de la fibre	Longueur des fibres	Elancement L/φ ou L/e	Dim. des Granulats associés aux fibres (mm)				% volumique de fibre
								<1	<5	<10		
Renforcement discontinus- fibres	Acier	Relief irrégulier				25-35	25-55		x	x	x	1 à 3%
						16-32	110		x	x	x	0,7 à 2%
		Formes particulières				6-30		x	x	x	x	0,7 à 3%
									x	x	x	0,7 à 2 %
						30-40	100-150		x	x	x	0,7 à 2%
	Fonte amorphe				30-40	1200-1400	x	x	x	x	0,7 à 2%	
	Verre	e = 5 à 20 μm			10-20		x	x			5 à 6%	
	Carbone	φ = 7 à 20 μm			3-15	150-400	X				2 à 5%	
	Aramide	12,4 +m			1-10	100-800	X				1 à 3%	
	Polypropylène	φ51 à 250 μm			10-30	140-1700	x	x	x	x	2 à 8 %	
Amiante	φ = 0.0002 à 0.02 μm			5	5000					5 à 10 %		
	Mélange hybride : cellulose + polypro. Ou polyéthylène ou PVA etc. (pour tenu à long terme)										5 à 10%	
Renforts continus	Aramide	Fibres enduites de résine						x	x	x	X	4 à 7%
	Verre							X	x	x	x	
	Polypropylène	Filets	Fibrilles				X	x				
	Verre		Tissés				x	x				

Le tableau (I-2) présente différents renforts, sans vouloir être exhaustif, il met en évidence la nature très variée des produits proposés. Nous suggérons les commentaires suivants :

- 1- Deux types de fibres peuvent être distingués : l'un composé de fibres courtes dispersées, l'autre de fibres continues. Les comportements mécaniques de ces deux types de fibres sont totalement différents. En effet, généralement, dans le cas de fibres continues, une multi-fissuration est susceptible de se développer grâce à la continuité des filaments, ce qui peut donner une grande souplesse au composite dans le mécanisme de ruine comme la montré (Keer et Hannant 1986).
- 2- La figure (I.4) montre que la taille des granulats associés aux matrices permet de mettre en évidence des domaines d'application potentiels : réalisation de plaques, gros bétons, enduits, mortiers renforcés, bétons projetés. La longueur des fibres utilisées doit être adaptée dans chaque cas, en fonction de la nature des pièces à réaliser ou des techniques de mise en oeuvre retenues (G.Odelberg 1985). Pour une longueur constante de fibre, plus la taille des granulats augmente, plus il est difficile d'obtenir une dispersion uniforme des fibres.

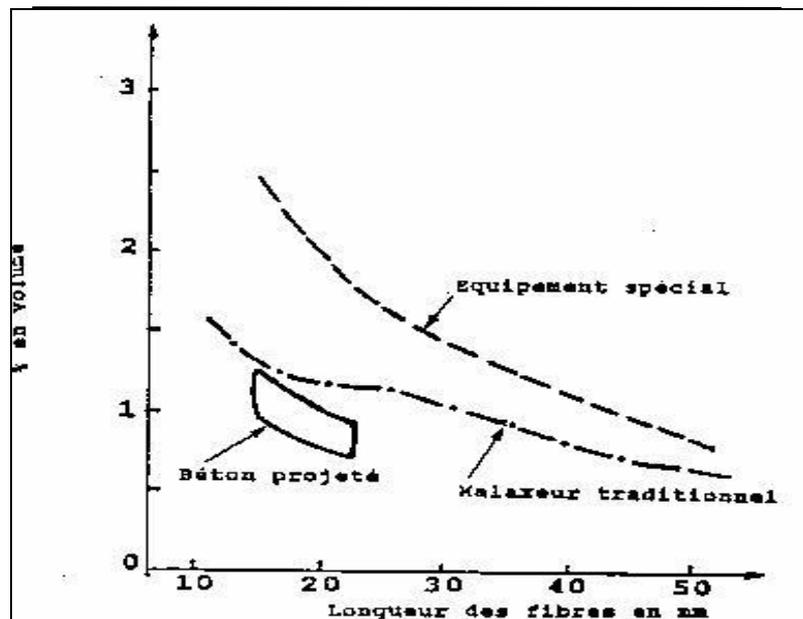


Figure (I.4): limites technologiques pour la mise en œuvre du béton d'acier
(G.Odelberg 1985)

- 3- Les données géométriques, jouent un rôle important sur l'adhérence mécanique.
- 4- Dans le cas des fibres d'acier relativement rigides, les études portent sur l'analyse de l'influence de la forme (Crochets, ondulation.....) et des surfaces à relief irrégulier.
- 5- Dans le cas de la fonte amorphe, nous sommes en présence d'une importante surface développée associée à une grande souplesse.

6- Dans le cas de filets, la continuité de la fibre et l'effet de maille assurent un excellent encastrement.

Les valeurs d'élanement sont données à titre indicatif ; Celui-ci joue un rôle important pour les propriétés rhéologiques des mélanges, ainsi que sur le coefficient d'espacement des fibres. Dans le cas de rubans, (Swamy, Mangat et Rao 1974) proposent une valeur équivalente pour caractériser l'élanement :

$$n = \frac{(b+e).L}{b.e} \quad (I.1)$$

e : épaisseur de la fibre. **b** : Largeur de la fibre **L** : longueur de la fibre.

Si l'épaisseur **e** est faible devant la largeur cette formule se simplifie :

$$n = \frac{L}{e} \quad (I.2)$$

Ce paramètre élanement des fibres peut aussi s'exprimer en fonction de la surface spécifique des fibres, de leur volume, de leur longueur et d'un coefficient K.

$$r = \frac{\text{Surface développée des fibres}}{\text{Volume des fibres}} \times K \times \text{longueur} \quad (1.3)$$

Précisons que si K est pris égal à 1 pour les fibres cylindriques les plus courantes, alors K=0.5 pour les rubans minces.

7- Les pourcentages volumiques de fibres préconisés sont présentés à titre indicatif. Ils sont liés à la composition de la matrice et au mode de mise en place utilisé.

Dans le paragraphe suivant nous démontrons l'influence de la nature des fibres sur le composite.

I.3.2.1 - Rôle de la nature des constituants : fibres et matrices :

Les fibres sont non seulement caractérisées par leur forme mais aussi par leur nature dont dépendent les grandeurs suivantes : coefficient de dilatation, résistance mécanique, souplesse, éventuellement plasticité, déformation à rupture, adhésion plus ou moins importante à la pâte de ciment et neutralité vis à vis de ce milieu.

Le tableau (I.3) suivant donne les caractéristiques moyennes des fibres les plus utilisées. Pour compléter ce tableau, et positionner les fibres les unes par rapport aux autres en mettant en évidence leur caractère fragile ou ductile, ainsi la figure (I.6) présente les relations contrainte-déformation des différents types de fibres.

Tableau (I.3) : suivant donne les caractéristiques moyennes des fibres les plus utilisées (G.Debicki 1987)

Fibres	Diamètre (mm)	Longueur	Masse volumique (Kg/cm ³)	Résistance traction (Mpa)	Module E (Mpa)	Allongement (%)	Coefficient de dilatation 10-6 °C-1	R au feu (°C)
Amiante (chrysolite)	0.0002 à 0.002	5 à 20	2.6 à 3	300 à 1000	80 000 à 150 000	2 à 3		1500
Polypropylène	0.01 à 0.1	25 à 75	0.9	400 à 600	4000 à 8000	15 à 20	90	150
Verre (au zirconium)	0.006 à 0.020	40 à 70	2.6	1500 à 3000	80 000	2 à 3	9	600
Acier	0.2 à 0.5	20 à 50	7.9	1000 à 3000	200 000	3 à 4	11	1500
Carbone	0.005 à 0.01	Variable	2	2000	400 000	0.5	1	400 à 1500
Fonte amorphe	30 à 60 x 0.03 x1	30 à 60	7.2	2500	130 000	2		300
Aramide	0.012	10	1.4	2800	80 000	4.2	-2	300

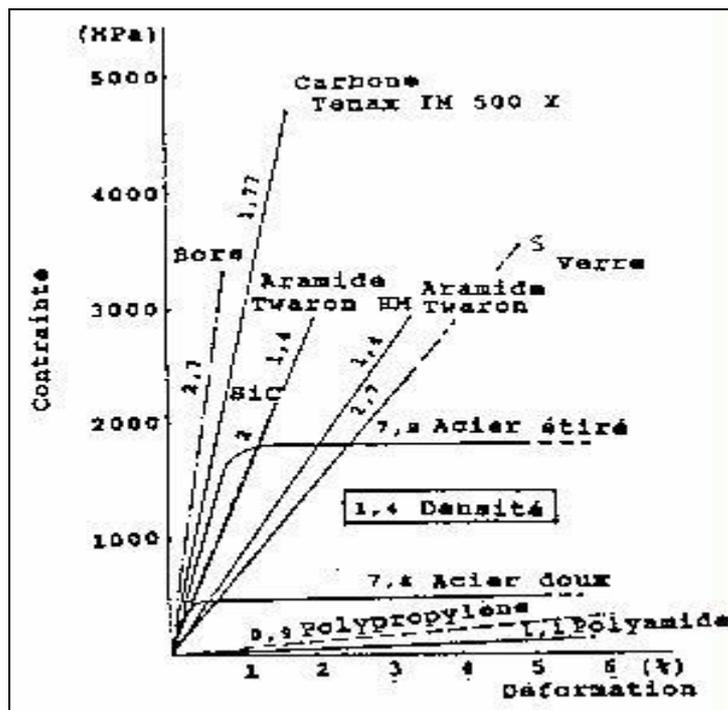


Figure (1-6): les relations contrainte- déformation des fibres de renforcement (G.Debicki 1987)

I.3.2.2. Les différents type de fibres :

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



Photo (I.1). Différents types de fibres

I.3.2.2.1 Les Fibres polypropylène :



Photo (I.2): Différents types de fibres polypropylène

Les fibres de polypropylène sont fabriquées depuis 1954 par l'industrie textile Gentil J. (1983). L'ajout de fibres au mortier ou au béton remonte industriellement à 1960 et ce n'est qu'à partir de 1967 qu'apparaissent des réalisations intéressantes notamment en Grande Bretagne (Panneaux de façade de 33 mm d'épaisseur du Londonderry House à Park-Lane à Londres). Les premiers fils étaient de section circulaire et lisses.

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

Les caractéristiques principales de ces fils de polypropylène sont les suivantes :

- Diamètre de 0.01 à 0.2 mm.
- Longueur : 25 à 75 mm.
- Masse volumique : 0.9 Kg/dm³.

- Résistance en traction : 400 à 8000 Mpa.
- Module d'élasticité : 4000 à 8000 Mpa.
- Coefficient de dilatation thermique : 90 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$

Les propriétés rhéologiques du béton frais renforcé par des fibres sont dues à la fois à la présence des fibres de polypropylène, très élastiques empêchant le béton frais de se déformer, et à celle de l'air occlus apportant une sorte de thixotropie. Ce béton conserve ainsi à l'état frais les empreintes faites en surface sans affaissement, ni ressuage. Nous pouvons le travailler afin d'obtenir des reliefs très variés soit manuellement, soit à l'aide de machine adaptées.

Le type de fibres à utiliser dépend essentiellement de la dimension des granulats, les fibres les plus courtes étant choisies pour des micros-béton, les plus longues pour ceux dont le « D » le diamètre est important. C'est ainsi que certains fabricants préconisent des fibres de 20 mm pour des bétons dont la dimension des granulats n'excède pas 15 mm, celles de 50 mm étant réservées à des bétons pour lesquels « D » est compris entre 30 et 40 mm.

On utilise ces type de fibres dans :

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

I.3.2.2.2 Les fibres d'amiante :

Les fibres d'amiante sont des silicates hydratés de magnésium extraites de roches appartenant aux familles des serpentines et des amphiboles (Noiret Y.1983). Elles sont utilisées depuis l'antiquité dans la fabrication de tissu résistance au feu. Très utilisé, ce matériau composite amiante- pâte de ciment offre une résistance à la traction de 15 à 25 MPa et en flexion de 27 à 40 MPa. Selon Gilebert.G.T (1983), les fibres d'amiante ne conviennent pas pour armer des mortiers et des bétons, car elles sont trop courtes, et elles nécessitent beaucoup d'eau de gâchage. Par contre, elles conviennent parfaitement comme charge avec la pâte pure, avec ou sans ajout de poudre de silice.

I.3.2.2.3 Les fibres de verre :

Photo (I.3) : fibres de verre



L'idée d'ajout de fibre de verre remonterait à 1920. Les premiers essais furent effectués en URSS vers 1950 par ajout de fibre de verre ordinaire dans une pâte de ciment alumineux. Comme le verre ordinaire est attaqué par les alcalis des ciments portland, le Dr Majumber mit au point vers 1976 un verre spécial, non attaquable, à base de Zirconium. Cette dernière solution est la plus pratique. On peut également protéger la fibre par un ensimage (Dépôt d'un corps gras sur la fibre).

Les Fibres de verre présentent d'excellentes caractéristiques : leur résistance à la traction est supérieure à celle de l'acier et leur coefficient de dilatation est sensiblement égal à celui de la pâte de ciment.

Le tableau (I.4) montre, qu'il y a trois types de fibres de verre (Venuat M.1985) suivant leur composition chimique:

Tableau (I.4) : Composition des différentes sortes de fibres de verre (Venuat M. 1985)

Composition chimique	SiO ₂	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	B ₂ O ₃
Verre classique	73	1	0	8	4	13	10
Verre borosilicate	55	14	0	17	5	0	8
Verre zirconium	70	0..2	16	0	0	12	8

Parmi les trois types de fibre de verre classiques seule la fibre au zirconium a une bonne résistance aux alcalins et peut être utilisée dans les compositions à base de liants hydrauliques. Les autres fibres nécessitent un traitement par des résines. La figure(I.7) donne l'évolution de la résistance dans le temps de plusieurs types de fibres de verre (Steel B.R 1971)

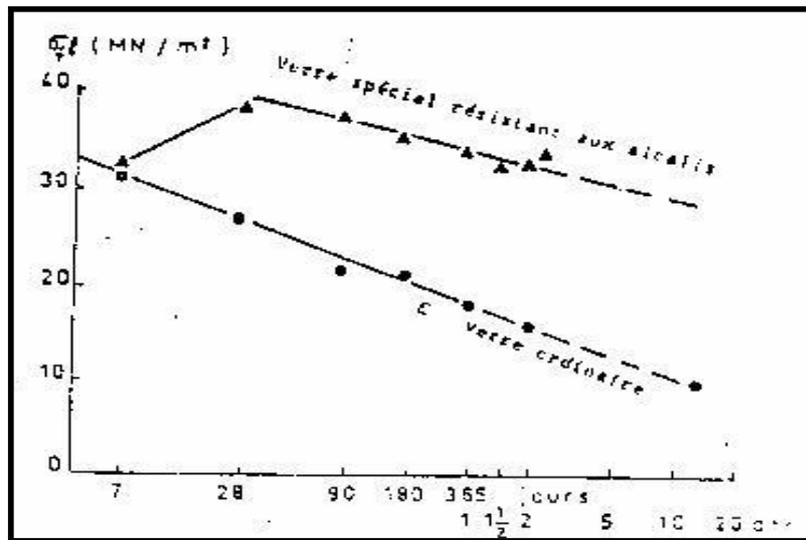


Figure (I.7): Résistance à la flexion du ciment portland de fibres en fonction du temps et conservé à l'air (échelle logarithmique) (Steel B.1971)

Les avantages apportés par l'incorporation de fibres de verre sont donc une très bonne résistance à la traction, une plus grande ductilité en compression et en traction, une réduction de l'écaillage en cas de choc, d'où des possibilités d'allègement des pièces par diminution de leur épaisseur, ce qui les fait surtout s'utiliser dans le moulage de pièces minces en mortier. Leur domaine d'utilisation est donc la fabrication de panneaux très minces, inférieurs à 20 mm d'épaisseur, de tuyaux d'assainissement, d'éléments décoratifs préfabriqués.

Les fibres de verre s'ajoutent à raison de 0,45 à 4,5 % en volume, soit de 0,5 à 5% en poids, soit encore entre 12 et 115 kg par m³. Les mortiers ou bétons armés de fibres de verre sont appelés:

- CRV (ciment renforcé de fibres de verre), en français.
- GRC (glass reinforced concrete) en anglais.

Le domaine préférentiel des mortiers armés de fibres de verre est celui de la préfabrication comme par exemple :

- Bardages industriels.
- Murs anti- bruit, claustras.
- Rideaux.
- Tuyaux d'égout et canalisations diverses (caniveaux d'irrigation).
- Toiture en voile mince de béton.
- Enduit pour blocs de béton et objet décoratifs, sculptures et mobiliers urbains.

I.3.2.2.4 Les fibres d'acier :



Photo (I.4): Différents type de fibres d'acier

Les fibres d'acier sont sans doute les plus utilisées. Elles ont fait l'objet de plusieurs recherches. A l'origine, ces fibres rectilignes et de section circulaire (d'un type analogue à celle servant à armer les pneumatiques) ont évolués vers les fibres d'acier en tôle cisailée.

Il existe de nombreuses variétés de fibres qui se différencient les unes des autres par leur diamètre, leur section (ronde, carrée, rectangulaire.....), leur longueur et leur mode d'élaboration. Elles peuvent être rectilignes, ondulées, ou présenter des élargissements aux extrémités, soit coudées ou en crochets pour améliorer l'accrochage. Dans le même but, elles peuvent présenter des aspérités, des crans surfaces. La figure (I.8) montre quelques types de fibres d'acier.

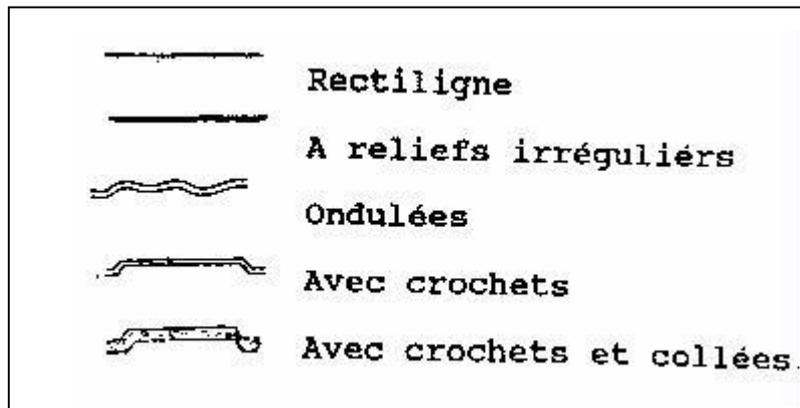


Figure (I.8): Quelques exemples de formes de fibres d'acier section circulaire, rectangulaire, carrée ou elliptique (Venuat M. 1983).

La dispersion des fibres d'acier dans le malaxeur s'opérant aisément et rapidement en évitant la formation d'oursin (ou boules de fibres), due au fait que les fibres ont naturellement tendance à s'agglomérer pendant le malaxage par suite des frottements réciproques, d'où la nécessité de prendre des précautions pour bien les répartir dans toute la masse du béton en évitant de la déverser d'un seul coup.

Les avantages de ce type de fibres sont :

- Ces fibres ne forment pas d'oursins et peuvent être introduites directement dans le malaxeur.
- S'individualisent lors du malaxage (la colle est soluble dans l'eau) se répartissent bien dans la masse et reprennent leur fort élancement d'origine favorable aux résistances.
- Les fibres qui présentent des crochets aux extrémités ont une meilleure adhérence que les fibres droites. Leurs diamètres s'échelonnent de 0,4 à 0,8 mm et leurs longueurs de 25 à 60mm.
- L'augmentation des résistances en traction et en flexion et surtout la résistance à l'usure, aux chocs et à la fatigue.
- Réduire l'épaisseur des pièces, par exemple: l'épaisseur d'un dallage prévue à l'origine de 15cm pourra être réduite à 12 cm avec l'ajout de fibres (30 à 50 kg/m³) et les joints seront plus espacés (jusqu'à 100 m² sans joint).

Leurs applications sont très nombreuses ; les principales sont les suivantes :

- Sols industriels et sol de parkings.
- Éléments de toiture en béton cellulaire.
- Tabliers de pont.
- Tuyaux en béton.
- Réservoirs sous pression.
- Revêtements de tunnel, coques de bateaux.
- Revêtements de chaussée.
- Produits réfractaires.
- Pistes d'atterrissage.
- Structures résistantes aux explosions.

I.3.2.2.5 Les fibres de carbone :

Leur utilisation, pour le renforcement de structures par mise en place de fibres de carbone, vise à compléter la structure d'un ouvrage là où ses parties tendues sont insuffisamment dimensionnées.

a) Procédé:

Le procédé est destiné à réparer et à renforcer les structures par le collage soit d'armatures passives composites à base de fibres de carbone noyées dans une matrice polymère ou d'un tissu de fibres de carbone.

Ce procédé s'applique après diagnostic, à toute structure d'ouvrage neuf ou ancien pour laquelle une augmentation de la capacité portante est recherchée. Il permet:

- D'accroître la résistance aux moments de flexion et aux efforts de traction (les lamelles);
- D'accroître la résistance à l'effort tranchant (le tissu).

b) Domaine d'application:

Ce Procédé est préconisé pour le renforcement des structures du Bâtiment et des Travaux Publics. Pour les structures en béton armé, les domaines d'application se résument en:

- Changement d'affectation de la structure : Par exemple, bureau transformé en pièce d'archivage, augmentation du trafic des charges d'exploitation;
- Modification de la géométrie de la structure: Par exemple, ouverture de trémies, suppression de poteaux, ouvertures dans un voile porteur.
- Erreur de conception initiale : Par exemple, mauvais dimensionnement des aciers, ferrailage insuffisant par conception ou défaut de positionnement;
- Réparation après un sinistre: Par exemple, incendie, diminution de la section des aciers par corrosion.
- Amélioration des conditions de service: réduction de flèche de plancher, réduction des contraintes dans les armatures, réduction d'ouverture de fissures.

c) Produits et matériels:

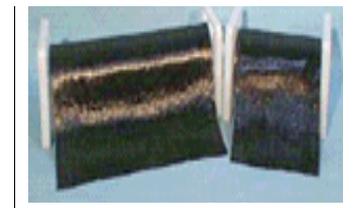
-Les lamelles: Elles sont composées de fibres de carbone, et caractérisées par:

- Module d'élasticité supérieure à 165 000 MPa.
- Allongement à la rupture supérieur à 17 %.
- Résistance à la rupture par traction supérieure à 2800MPa. Leur insensibilité à la corrosion permet leur utilisation là où des renforcements par tôles métalliques collées ne seraient pas possibles. Leur faible densité 1,5 permet une mise en place facile, sans étaieement.

- Les fibres en tissu C'est est un tissu composé de fibres de carbone insensible à la corrosion, souple, léger, épousant parfaitement les formes des supports qu'il recouvre, applicable jusqu'à trois couches en superposition, le tissu permet le renforcement des structures aux géométries complexes. La réparation par les fibres de carbone est devenue une technique très connue à cause de son efficacité. Elle est appliquée dans différents types d'ouvrage et à travers le monde



Photos I.5 : Fibres de carbone en lamelles



Photos I.6 : Fibres en tissu

I-3-2.3. Influencent des propriétés mécaniques des fibres sur les composite:

Les caractéristiques mécaniques des fibres, module d'élasticité et allongement à rupture sont très différentes d'une fibre à l'autre comme décrite au paravent figure (I.6). Ces seules caractéristiques permettent-elles de prévoir le comportement du matériau ? Nous tentons d'illustrer notre commentaire par des exemples.

Le module d'élasticité de la matrice n'est guère modifié à l'origine, la simple application de la loi des mélanges permet d'expliquer ce résultat Hannant (1987). Avec 5% de fibres de verre ou 2% de fibres d'acier on gagne théoriquement 11 à 13% dans le cas de fibres orientées dans la direction de sollicitation. Dans le cas de fibres dispersées, les gains théoriques sont seulement de 2%. Ainsi, le mode de fabrication ou de conservation des éprouvettes influence autant la valeur du module que la présence de fibres. Plusieurs auteurs, comme Akihama S et Al (1984), signalent qu'avec des pourcentages élevés de fibres, le décroît de façon significative s'effectue en compression (cas de fibres d'acier, de carbone, de verre). Tout se passe comme si la résistance de la liaison fibre- matrice diminuait lorsque le pourcentage volumique des fibre- matrice diminuait lorsque le pourcentage volumique des fibres augmente au- delà d'une certaine valeur. La loi précédemment énoncée montre que pour des fibres à module inférieure à celui du béton, le module à l'origine du composite baisse, résultat observé expérimentalement avec des fibres de polypropylène par J. Dardare (1975), Dave et Ellis (1979). Comme constaté avec les autre fibres, la diminution importante pour les forts pourcentages de fibres ne s'explique pas uniquement par la quantité de fibres. Précisons qu'avec les fibres de polypropylène, plus la longueur des fibres est importante, plus faible est le module. Dardare (1975) donne 16% et 13% de chute pour une longueur multipliée par 8,2 ceci dans le cas d'une conservation humide ou sèche.

Les travaux de Dave et Ellis (1979) sur des fibres de polypropylène montrent que si le module d'élasticité de ces fibres augmente, la résistance ultime de flexion augmente et le saut après la première fissuration est moins important.

La résistance à l'initiation des fissures du béton de fibres n'est pas seulement un indice pour exprimer quantitativement les caractéristiques du béton à la fissuration, mais également une valeur importante qui peut servir de critère pour le calcul d'une structure. On peut utiliser plusieurs méthodes pour repérer ce point :

La limite de proportionnalité sur le diagramme force-flèche en flexion, ou la limite de résistance de la matrice en traction du composite. Cette limite difficile à définir précisément est influencée par plusieurs facteurs :

- Le mode de conservation des éprouvettes : les éprouvettes stockées dans l'eau présentent des limites supérieures, (Ali, Majumdar, Singh (1975) – cas des fibres de verre)
- Le pourcentage volumique des fibres : le gain de résistance pour les fibres de verre, d'acier, de carbone, et les perte pour les fibres de polypropylène semblent proportionnels au pourcentage volumique de fibre. (Ali, Majumdar, Singh (1975), Dave Et Ellis (1979, Gopalaratnam Et Shah (1986), Akinam S Et Al (1986).
- Le module d'élasticité des fibres : le rôle de ce paramètre semble suggéré par l'étude de Akihama S et AL 1986, dans laquelle les auteurs comparent les courbes contraintes- déformations d'un mortier renforcé de deux types de fibres de carbone (Tableaux I.5, I.6). Les courbes contraintes- déformations obtenues sont présentées sur les figures (I.9).
- L'élanement des fibres : ce paramètre est proposé par Johanston et Coleman 1974 (figure I.10)

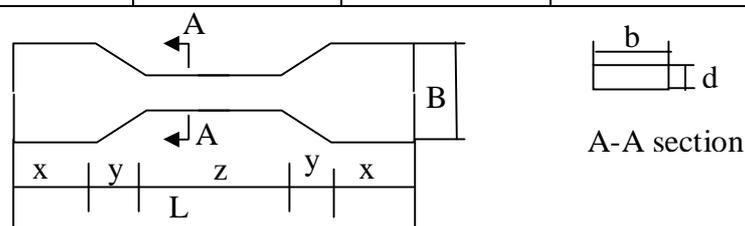
Enfin précisons qu'aucune étude expérimentale systématique ne permet de suggérer une relation simple entre la nature de la fibre et l'apparition de la première fissuration dans le composite. Il y a accord pour noter un effet favorable des fibres sur la limite de fissuration définie en contrainte, lorsque le module de la fibre est supérieur à celui de la matrice. Le gain en déformation est plus controversé faute d'une définition précise et reconnue de cette limite.

Tableau (I.5): propriétés des fibres de carbone d'après Akihama S et Al 1986

Type de fibre	Géométrie des fibres			Densité	Résistance en traction MPa	Module d'élasticité MPa	Allongement
	Diamètre μm	Longueur mm	Elancement L/d				
Pitch	14,5	3	207	1,63	7800	$3,8 \cdot 10^5$	2,1
PAN	7,0	3	429	1,90	32000	$23 \cdot 10^5$	1,4

Tableau (I.6) : composition de la matrice de ciment d'après Akihama S et Al 1986

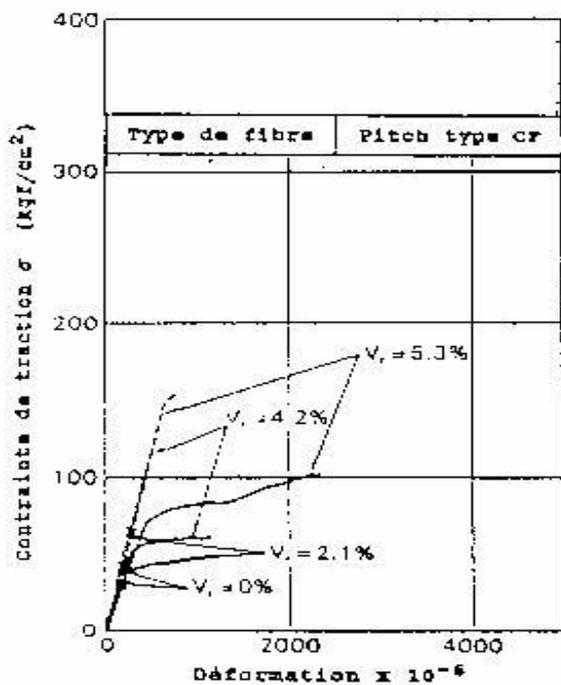
Eau / ciment	Agrégat/ ciment	Composition pondérale Kg/m^3			
		Eau	Ciment	Poudre de silicate	Méthylcellulose
0,47	0.25	512	1082	274	10,8



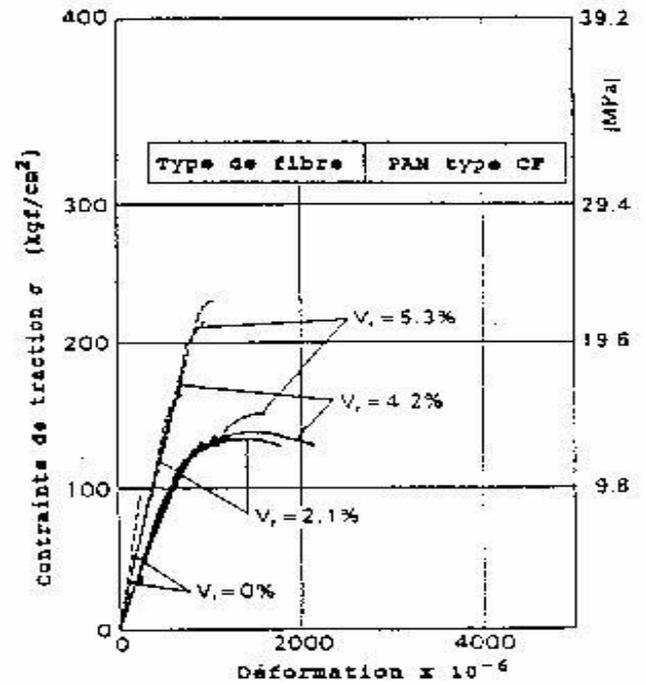
Symbole	L	B	B	D	x	y	z
Eprouvette							
Essai de traction discrète	330	60	30	6	85	40	80

Figure (I.9) a) : Géométrie des éprouvettes pour les essais de traction.

Symbole	Conditions de conservation et d'imprégnation par un polymère
—	Autoclavé sans imprégnation
.....	Imprégné de polymères après autoclavage



b) Courbe contrainte-déformation en traction.



c) Courbe contrainte-déformation en traction.

Figure (I.9) : Les courbes contraintes- déformations de Akihama S et Al 1986

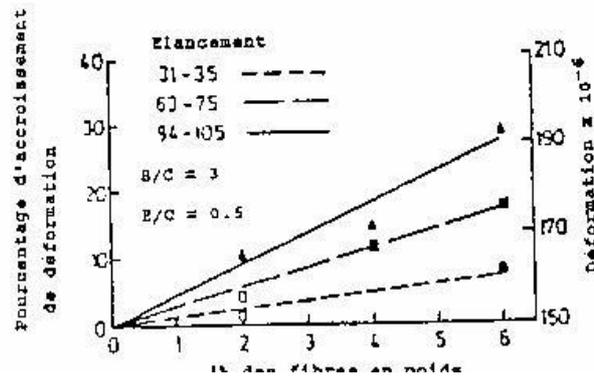


Figure (I.10):

Influence du volume et de l'éclatement des fibres sur la déformation de fissuration (pour la contrainte maximum) d'un composite avec des fibres d'acier. (Johnston et Coleman (1974))

Nous retiendrons de ces commentaires que les seules propriétés des fibres, même si elles donnent des tendances, ne suffisent pas à expliquer le comportement du composite.

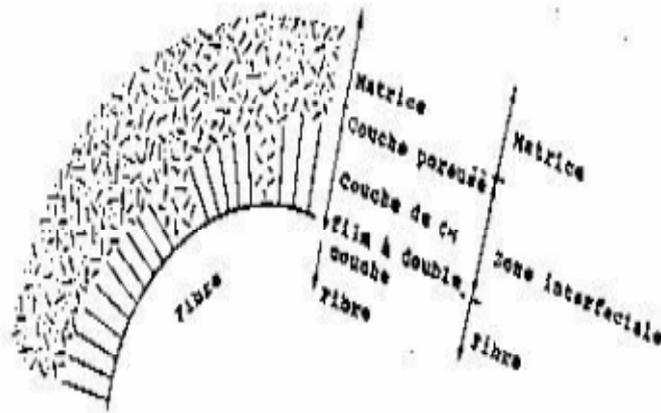
I.3.2.4. Le rôle de l'adhésion fibre – matrice :

L'observation de la zone entre fibre et matrice, met en évidence une zone de contact entre elles. La nature exacte de cette zone dans les composites à matrice cimentaire est trop complexe pour être définie par des paramètres simples. La matrice elle-même est poreuse et évolue avec des variations de volume et des propriétés en fonction du temps.

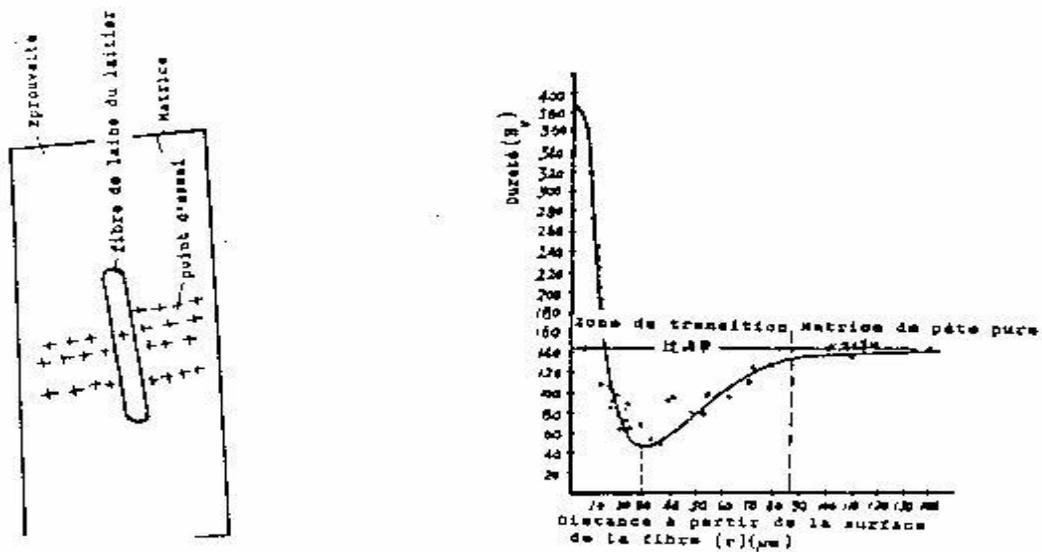
Par exemple, dans le cas de fibres d'acier, la zone de contact a une épaisseur de 50 μm autour de la fibre. La structure de la pâte dans cette zone diffère de celle que l'on trouve au cœur de la pâte. La nature de cette zone interfaciale a été étudiée pour différentes fibres (Bentur, Diamond Et Mindness (1985 A), Bentur Et Al (1985 b)). Cette zone est habituellement riche en portlandite CH (avec la notion des cimentaires), mais elle contient aussi d'autres composants (Bentur Et Al 1986) comme le montre la figure (I.11). Un mince film de 1 μm d'épaisseur, connu sous le nom de Film « Duplex », c'est à dire à deux couches, (Barnes et Al 1979)) se dépose autour de la fibre. Les deux couches de ce film sont composées : l'une de chaux CH qui est en contact direct avec la surface de la fibre, l'autre s'appuyant dessus étant une simple couche de Silicate De Calcium Hydraté (C S H). Derrière le « film duplex », se trouve un anneau de CH massif d'une épaisseur de 5 à 30 μm qui occupe la plus grande partie de la zone interfaciale. On peut remarquer que cet anneau n'est pas continu et contient des paquets de matériaux poreux constitués de C H S et d'ettringite. Entre la couche de CH et le cœur de la pâte contenant le ciment bien hydraté, on trouve une zone de transition avec un matériau très poreux constitué de C-S-H. La formation de cette microstructure spéciale à l'interface provient probablement de la nature du mélange frais : l'espace voisin d'une inclusion (Fibre ou granulats) étant principalement

occupé par de l'eau qui s'accumule pendant le ressuage. Cet effet est toujours présent et ne peut être complètement éliminé même dans un mélange très dense. En plus de ces observations, la mesure de dureté montre qu'il y'a une décroissance notable de résistance de la pâte de ciment entre 0,15 et 0.75 mm à partir de la surface de la fibre

(Pinchin Et Tabor (1978)). Ces résultats pour les fibres d'acier s'observent pour d'autres fibres, par exemple (figure I.12) sur des « Titanferrous alkali-resistant slag wool fibre » (Chuanhe et Al 1986))



Figure(I.11) : Description schématique de la zone inter faciale à l'interface
D'une fibre d'acier et du ciment Benthur et Al (1986)



Figure(I.12): Mesure de la dureté au voisinage d'une fibre de « Titanium slag wool »
(Chuanhe Et Al 1986)

da

Avec des fibres en matériau polymérique tel que le nylon, le polypropylène et le carbone, le liaison fibre – matrice est entièrement mécanique et la résistance de liaison dépend de l'action d'accrochage entre la matrice et les filaments individuels de la fibre. Dans le cas des fibres de verre, l'attaque alcaline de la pâte de ciment affaiblit le renforcement fibreux et modifie les propriétés des constituants à l'interface au cours du temps. Le verre a préalablement subi un traitement de surface, « l'ensimage », induit par les technique d'étirage et de filage, conduisant à l'obtention d'une zone de transition entre le milieu alcalin et le verre favorisant à la fois une adhésion physico-chimique et une protection du verre. Le degré de défibrage de la fibre durant le processus de malaxage influence également la liaison inter faciale.

A cause de la nature de la liaison inter faciale dans les composites de ciment une mesure réelle, de la résistance de liaison, ne peut être obtenue par un seul test. Le traditionnel essai d'arrachement, noté « pull-out », ne représente pas l'état correct de contrainte dans la matrice du composite. Il représente davantage une mesure d'ancrage. En effet une fissure dans la matrice qui se propage vers la fibre est déviée dès qu'elle atteint la couche poreuse inter faciale (Bentur et Al. (1986)). Ceci conduit à une dissymétrie et une flexion durant le processus d'extraction de la fibre, alors que dans l'essai de pull-out aucune flexion n'apparaît et la dissociation a plus de chance de se produire au niveau de l'interface. Il convient de noter qu'il n'y a pas une corrélation unique directe entre la résistance à l'arrachement et la résistance en traction ou compression (Tattersall Et Urbanowicz 1974).

Les résultats précédemment cités montrent que des traitements chimiques ou physiques peuvent améliorer la liaison avec des facteurs supérieurs à 10 par rapport à la fibre non traitée. Dans ce cas l'on observe une bonification des résistances en traction ou flexion faible du même ordre de grandeur que celle obtenue par un meilleur contrôle du mélange fibre- matrice.

Les valeurs de résistance de liaison les plus élevées sont obtenues pour des pâtes pures et celles-ci diminuent lorsque la taille des granulats augmente ou lorsque le pourcentage de fibres est plus élevé. Bentur, Gray Et Mindness (1986), s'intéressent au rôle de la matrice sur l'essai de pull-out mirent en évidence une décroissance de la résistance avec l'augmentation du dosage en eau plutôt qu'avec la résistance de la matrice (Figure (I.13)). Ceci est cohérent avec notre précédent propos, dans la mesure où la tendance au ressuage est fonction de la quantité d'eau introduite. Une augmentation de la résistance en compression de la matrice n'apporte pas forcément d'amélioration sur l'adhésion si la zone de contact fibre-matrice reste aussi faible.

Si l'on recherche uniquement des gains de résistance ultime en phase fissurée sous flexion, l'étude de géométries spéciales sur les fibres d'aciers semble moins coûteuse et plus

performante que la recherche d'une bonne adhésion fibre- matrice, qui ne joue aucun rôle au delà de la fissuration.

Ainsi il est difficile de définir une grandeur intrinsèque représentative de la liaison fibre-matrice. Une bonne adhésion fibre-matrice ou une bonne résistance au glissement n'apporte pas les mêmes propriétés au composite.

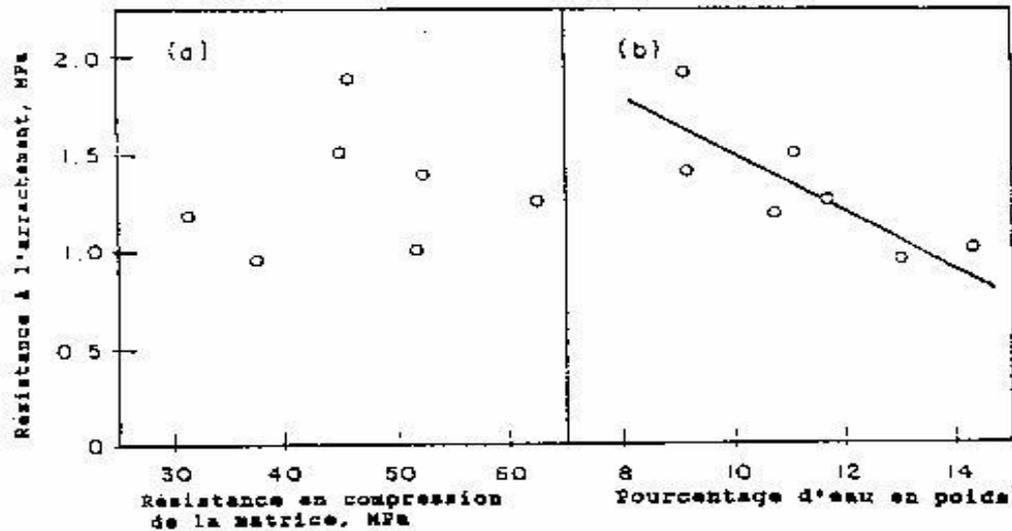


Figure (I.13):

- a) résistance à l'arrachement de fibres en acier droite en fonction de la résistance en compression de matrice.
- b) résistance à l'arrachement de fibres en acier droite en En fonction de la quantité d'eau contenue dans la matrice (Bentur et AL 1986)

I.3.2.5.les avantages et les inconvénients des fibres:

- Ils ne rouillent pas: ils ne sont pas corrosifs. Toutes les fibres sont désirables dans des environnements carbonatés. Les fibres d'aramide et de carbone montrent une bonne résistance aux environnements acides et alcalins.
- Ils sont résistants aux environnements agressifs, comme les ions chlorures.
- Ils sont insensibles aux courants électromagnétiques, à un degré moindre pour les fibres de carbone.
- Ils ont une bonne résistance en traction et un faible poids.

Ces qualité font des fibres un substitut idéals dans la structure est exposée à des agents corrosifs (sel de déverglaçage, environnements marins, gaz carbonique, gaz corrosifs, produits chimiques) ou que le système d'armature ne doit pas conduire d'électricité (planches d'alumineries, trous d'accès ou de visites d'équipements électriques et de télécommunication. etc.)

Cependant, comme tous les autres matériaux, les fibres ont des inconvénients qui peuvent être résumés dans les points suivants:

- Coût trop élevé (2 à 50 fois celui de l'acier).
- Un module d'élasticité relativement faible, sauf pour les fibres de carbone.
- -Absence de déformation plastique.
- Grand rapport de la résistance axiale sur la résistance latérale.
- Perte de résistance sous charges retenues.
- Dégradation au contact des rayons Ultra-Violet.
- Réaction des fibres de verre avec les alcalis.
- Un manque d'expérience d'utilisation des fibres.

I.3.2.6. Rôle des fibres dans le béton :

Le béton est un matériau fragile qui se rompt brutalement lorsqu' il atteint sa résistance à la traction. Les fissures s'y propagent donc de façon très rapide. Le béton armé de fibres se distingue du béton ordinaire par l'absorption d'énergie que procurent les fibres. La courbe (I.14) effort- déformation est différente : le matériau fragile au départ, s'est transformé en matériau ductile qui se rompt lentement après un allongement plus important dû à la formation d'un grand nombre de microfissures (plus grande énergie de rupture) (I.15)).

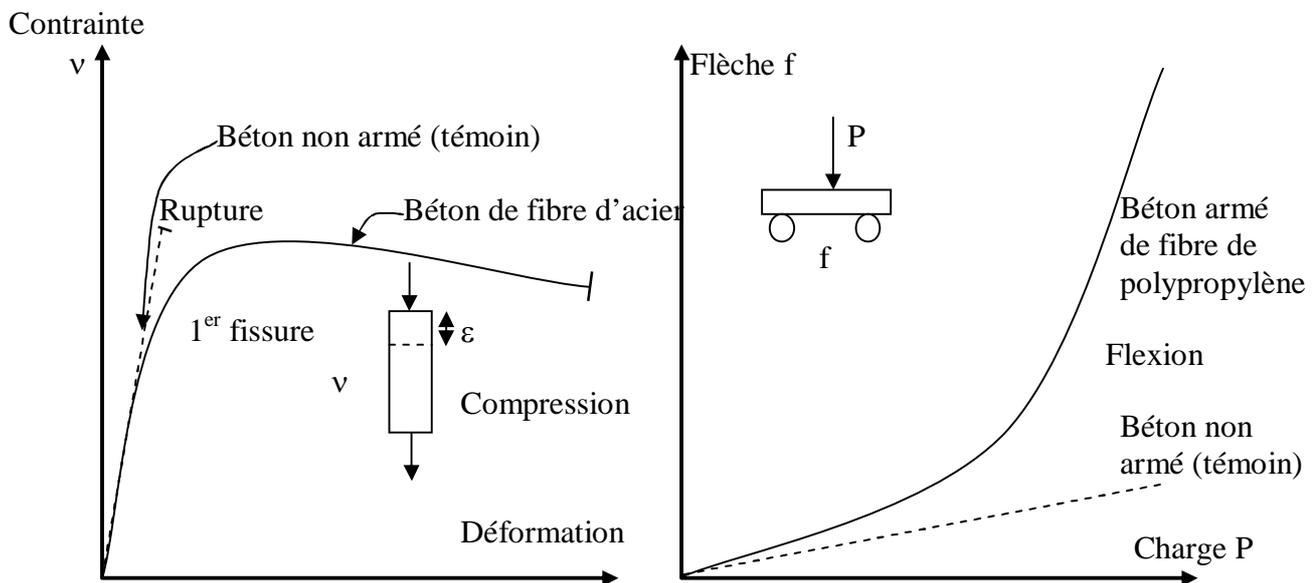
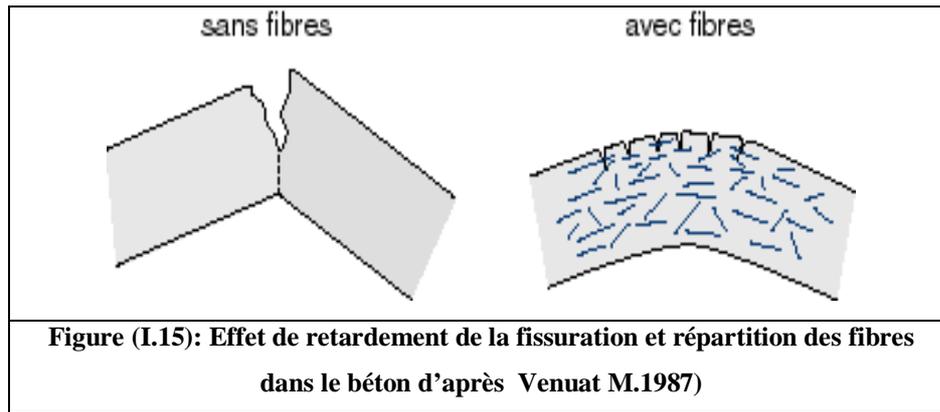


Figure (I.14): déformation d'un béton armé de fibres, comparée à celle d'un béton non armé d'après Venuat M.1987)



Les travaux de Dave Et Ellis (1979) sur des fibres de polypropylène montrent que si le module d'élasticité de ces fibres augmente, la résistance ultime de flexion augmente et le saut après la première fissuration est moins important.

En effet, lorsqu'une fissure tend à se propager à l'intérieur d'un béton armé de fibres, ses deux faces sont maintenues l'une contre l'autre par la force d'adhérence de l'interface fibre-matrice et aussi, dans le cas de fibres d'acier, par le phénomène d'ancrage mécanique. L'ouverture et la propagation des fissures nécessite donc un apport d'énergie supplémentaire afin de provoquer le glissement et éventuellement la rupture des fibres.

Ce phénomène a pour effet de conférer au béton une certaine ductilité après la rupture de la matrice tout en lui permettant de conserver son intégrité structurale. C'est pourquoi le béton armé de fibres est surtout utilisé dans la construction d'ouvrages soumis aux chocs sismiques, aux impacts, aux vibrations ou encore à de grandes déformations (dalles sur sol, viaducs, routes, structures en région sismique ou maritime, etc.). Les fibres peuvent aussi permettre un meilleur contrôle de la fissuration. Un béton ordinaire peut présenter de larges fissures localisées qui facilitent la pénétration d'agents agressifs et sont nuisibles au point de vue esthétique. Dans un béton armé de fibres, par contre, si la quantité de fibres est suffisante, ces larges fissures peuvent être remplacées par plusieurs fissures de dimensions beaucoup plus réduites, ce qui améliore à la fois la durabilité et l'aspect esthétique de l'ouvrage [Banthia Et Batchelor, 1991) comme le représente la photos (I.7).

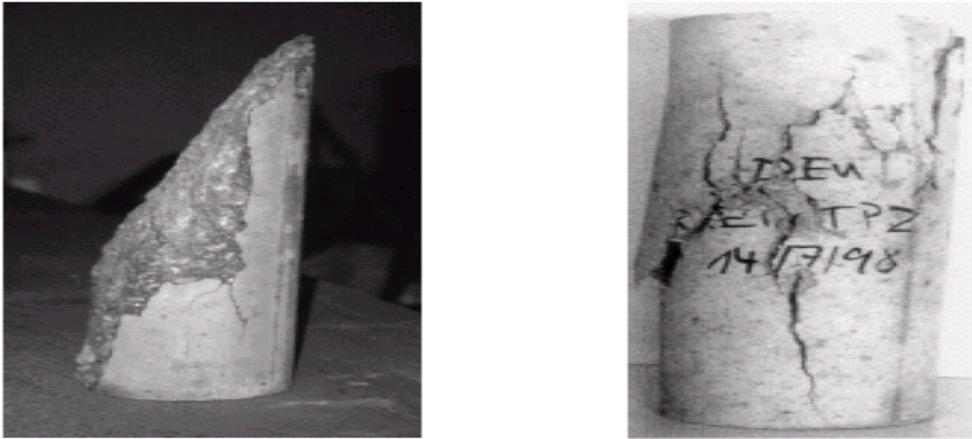


Photo (I.7): comparaison de rupture éprouvette armé de fibre et celle non armé d'après T. Budi Aulia

Pour qu'il supporte les contraintes de traction, le béton doit prendre en compte les contraintes de compression. Au lieu d'armer le béton et surtout les pièces de faible épaisseur qui posent des problèmes de dimension et de protection d'acier, on peut songer à ajouter des fibres. Selon les cas, ces fibres seront bien réparties dans la masse ou aux contraires orientées, ou encore placées à certains endroits de la pièce à renforcer. voir Figure (I.16).

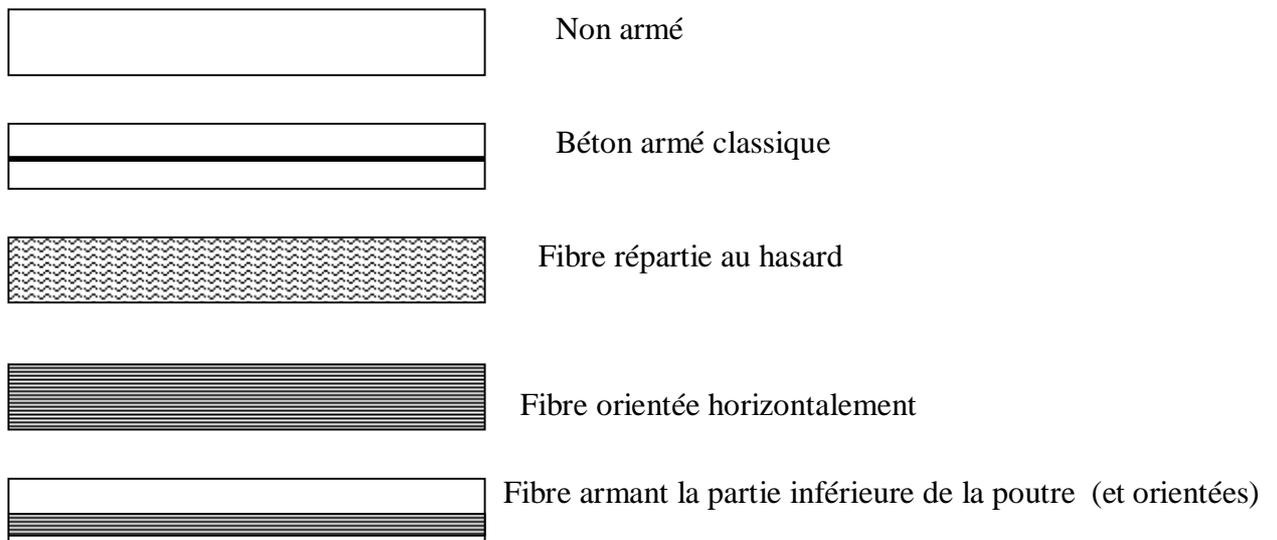


Figure (I.16): différents modes d'armature d'une poutre en béton d'après Michel Vénut1987

Les améliorations principales apportées par les fibres aux mortiers et aux bétons qui en contiennent se résument à:

- Réduction possible de l'épaisseur des pièces;
- Augmentation de la résistance en traction et en flexion;
- Accroissement de la déformabilité du matériau ; la matière est retenue par les fibres (certaines trop courtes déchaussent, d'autres plus longue se cassent);

I.3.2.7 La tenue de la fibre en milieu alcalin, condition de la durabilité du composite :

La durabilité est une propriété importante qu'il est nécessaire d'établir pour tous les matériaux de construction, et pour les nouveaux en particulier, dans différentes conditions d'environnement et d'exposition.

Certaines fibres organiques comme le polypropylène ou l'aramide résistent aux acides, aux alcalins et sont insensibles à la présence d'eau (Akihama et al. 1986), Hannant et Hughes 1986). Les composites de carbone gardent leur résistance sur des périodes supérieures à une année à l'air, sous l'eau, ou sous l'influence de cycles de gel-dégel. Bien que les bétons de fibres d'acier présentent des marbrures en surface, il n'y a pas de problème de durabilité ou de changement substantiel des propriétés de composite dans le temps (Swamy 1974)

Lorsqu'on veut utiliser les fibres de verre, on rencontre un problème important qui est la compatibilité chimique.

Le milieu fortement basique du ciment portland attaque les fibres en détruisant rapidement la résistance du composite. Les derniers travaux de recherche sur la microstructure de l'interface dans les ciments renforcés de fibres de verre ont révélé l'existence de la double couche notée « Duplex film » d'un micromètre d'épaisseur entourant la fibre de verre. Celle-ci se compose de portlandite, orientée suivant un axe perpendiculaire au verre, secondée par une bande façonnée de particule de C.S.H. Au cours du processus d'hydratation, ce « duplex film » se lie à la masse de la pâte de ciment par dépôt de l'hydroxyde de calcium additionnel, de l'ettringite ou d'autres produits d'hydratation. Cette constatation met en évidence la haute affinité des surfaces de verre pour la portlandite.

En conséquence, l'amélioration de la durabilité des bétons renforcés de fibres de verre s'est faite avec les démarches suivantes :

- Utilisation de ciment à faible alcalinité (Majumdar Et Nurse 1979, Pachtchenko Et Al 1980).
- Diminution de l'alcalinité des matrices durcies.
- Empêchement du déplacement des ions alcalins.
- Développement des fibres avec enduit imperméable résistant au milieu alcalin (Bouhekouk Et Al 1987)

Suite à l'apparition sur le marché de fibres de verre résistantes aux alcalins, on a découvert un nouveau problème qui est le remplissage de l'espace entre et autour des filaments avec des produits d'hydratation du ciment riches en calcium.

La mise en évidence de l'importance de ce remplissage pour la tenue des bétons renforcés de fibres de verre à long terme sous chargement mécanique a donné lieu à des études sur :

- L'application d'ensimage sur les filaments des fibres de verre qui change l'affinité des produits d'hydratation (Nills 1981.a).
- L'addition de polymères dispersés par l'eau qui pénètrent le paquet des filaments des fibres et se mêlent à la précipitation des produits d'hydratation du ciment dans l'espace inter filamentaire (Bijen 1979).
- L'utilisation du ciment libérant peu d'hydroxyde de calcium (Bentur 1984)
- Le stoppage de transport de la chaux (Nills 1981 b)

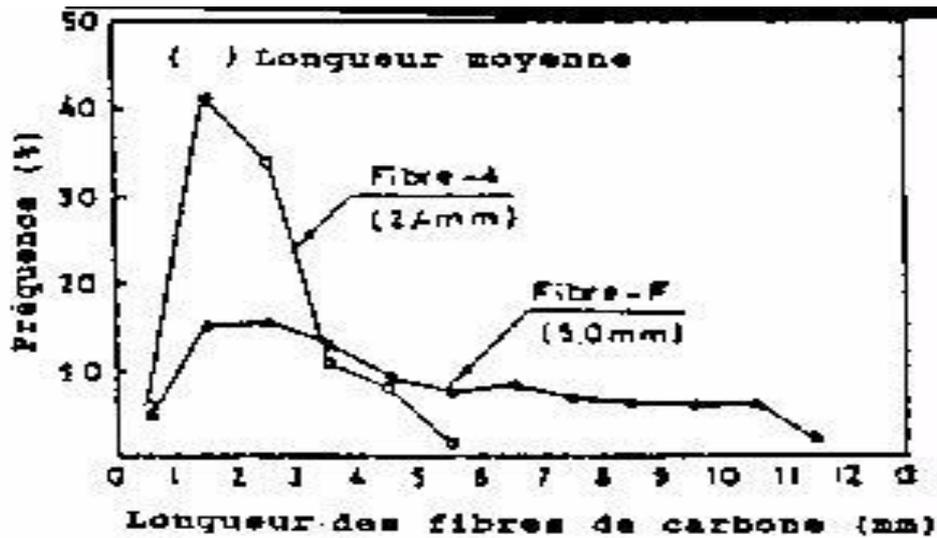
Schématiquement, l'on constate une évolution des caractéristiques du composite fibres de verre dans la matrice cimentaire : au jeune âge, il présente de très bonnes résistances et une bonne ductilité ; après six mois à un an, notamment au contact de l'humidité, le matériau présente toujours de bonnes résistances mais il se fragilise. Le vieillissement se poursuit par une dégradation des fibres en milieu alcalin.

Cette dégradation à long terme des fibres ne remet pas en cause le rôle qu'elles peuvent jouer pendant les phases de durcissement du béton. Pour l'application, il s'agit de la seule phase critique de l'élément structurel.

I.3.2.8 La tenue de la fibre durant les opérations de mise en oeuvre :

Les conditions de mise en oeuvre peuvent modifier les caractéristiques géométriques des fibres, notamment pendant l'opération de malaxage. Ainsi les fibres fragiles peuvent se rompre et les filaments se défibrer. Les paramètres importants sont alors le temps de malaxage, la taille, la quantité et la forme des granulats.

La figure (I.17) issue des travaux de Kunio Nishioka et Al 1986) montre la distribution des longueurs de fibres de carbone après malaxage, (300 à 400 fibres sont prises en compte). Toutes les fibres référencées A ont une longueur inférieure à 6 mm et la moyenne est pratiquement égale au quart de la longueur initiale. Dans le cas de la fibre F, la longueur initiale est réduite de moitié. Notant que la fibre A est plus fragile et moins résistante (Rapport de 1.55). Sur le composite ce résultat est important car si la longueur de la fibre devient inférieure à la longueur critique, l'intérêt du renforcement peut devenir nul.



Figure(I.17): distribution de la longueur des fibres de carbone après malaxage. La longueur initiale des fibres est de 10 mm (Kunio Nishioka Et Al 1986)

L'influence du temps de malaxage sur les courbes chargement déplacement de flexion, pour un composite fibres de verre E ciment adjuvante d'un latex, apparaît sur la figure (I.18), suite à une étude qui a été menée en 1984 par Dibecki:

- Pour 1 minute de malaxage les mèches de fil sont peu endommagées et confèrent au matériau une bonne résistance et une bonne ductilité.
- Pour 2 mn et 5 mn de malaxage, se produit un éclatement des mèches de fils, la résistance diminue, le matériau est plus fragile.
- Pour 8 mn de malaxage, les fibres sont défibrées, la résistance augmente à cause d'une meilleure répartition du latex le long des fibres mais le matériau continue de se fragiliser.

L'observation au microscope montre des fibres fortement striées pour 8 mn de malaxage.

Avec certaines fibres, pour une même composition au départ, le comportement du composite peut être très différent, voire contradictoire, si le processus de malaxage n'est pas rigoureusement contrôlé.

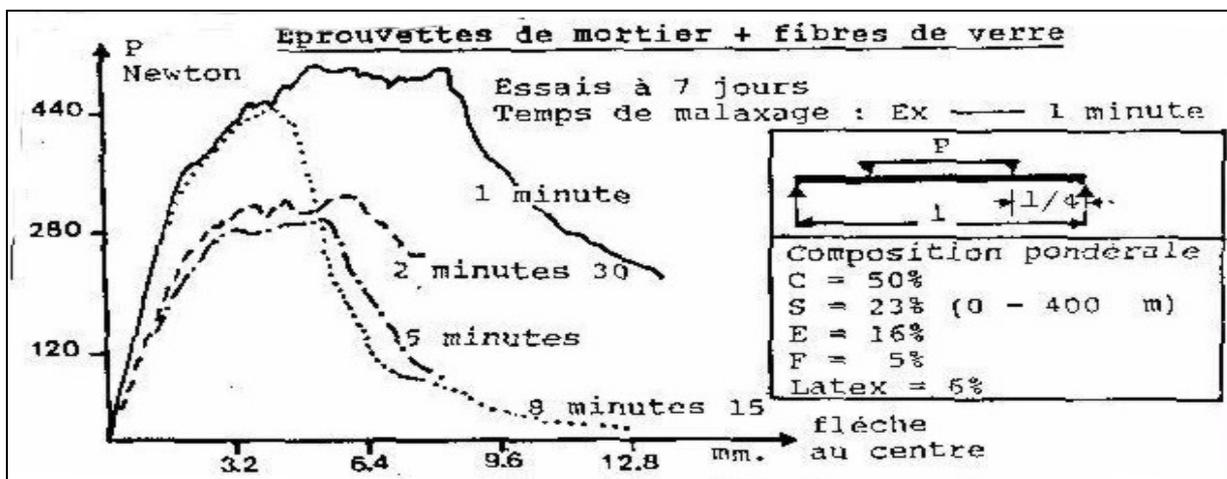


Figure (I.18): Courbes charge – flèche obtenues en fonction du temps de malaxage d'après Dibecki . 1984

I.3.3 Formulation du béton de fibres

Effectivement l'ajout de fibres d'acier dans le béton modifie le squelette granulaire. On doit donc augmenter la quantité de sable pour optimiser ce squelette granulaire et rendre ainsi le béton plus compact puisqu'il est de cette façon plus maniable. Cette première affirmation constitue la première hypothèse confirmée sur laquelle repose la méthode Baron-Lesage développée en France il y a environ 25 ans : Une méthode générale pour la composition d'un mélange de béton. De plus lorsque la quantité de sable augmente la porosité du béton augmente. Pour contrer cet effet, il faut alors utiliser plus de pâte de ciment pour remplir les vides et augmenter cette fois l'action mécanique entre les fibres et la pâte de ciment. Plus le dosage en fibres est élevé plus le rapport sable/pierre est élevé. Par conséquent plus la quantité de pâte de ciment augmente également, plus l'élanement (rapport longueur/diamètre) de fibre est élevé. Plus les quantités de sable et de pâte de ciment sont élevées plus on obtient une meilleure maniabilité du béton. Aussi pour être efficaces les fibres doivent avoir une longueur supérieure à 2 fois le diamètre des granulats. Une démarche d'optimisation d'un mélange de béton de fibres a été adoptée. Cette méthode se base sur la méthode Baron-Lesage mentionnée plus haut. Déjà utilisée pour les bétons ordinaires et les bétons à haute résistance avec fumée de silice, elle a été adaptée par Rossi et Harrouche (1990) pour optimiser le squelette granulaire des bétons de fibres. Cette démarche comporte trois étapes :

- 1) Fixer d'abord le rapport eau/ciment, le pourcentage de fibres à utiliser et la quantité de super plastifiant.
- 2) Fabriquer plusieurs mélanges en faisant varier le rapport sable/pierre qui devrait être autour de 1.0 en gardant constant le rapport eau/ciment et les quantités de pâte de ciment et super plastifiant fixés au départ. Déterminer la maniabilité de chacun des mélanges de préférence avec un maniabilimètre. Le mélange présentant la meilleure maniabilité est celui ayant le rapport sable/pierre (SR) optimal.
- 3) Augmenter ou diminuer la quantité d'eau et de ciment utilisée, tout en gardant les rapports eau/ciment et SR constants. Pour obtenir une bonne maniabilité il faut faire varier également la quantité de super plastifiant. Cette troisième étape repose sur la deuxième hypothèse confirmée par la méthode Baron-Lesage : la quantité optimale d'agrégats ne dépend pas de la nature ou du volume de pâte de ciment. En suivant cette procédure ; on arrive à fabriquer de très bons mélanges de béton de fibres avec des maniabilités comparables à des bétons blancs. Il faut par contre s'assurer que ces bétons de fibres très maniables aient un minimum de ségrégabilité et qu'aucun oursin de fibres

ne se forme. Pour éviter ces oursins il est suggéré d'ajouter les fibres graduellement dans un béton très plastique pour éviter une concentration locale des fibres.

1-3.4. Comportement du béton de fibres vis-à-vis des actions thermiques :

Deux questions peuvent se poser :

- 1- Un étuvage améliore-t-il ou au contraire augmente –il les caractéristiques du composite ?
- 2- Des dilatation différentielles entre fibre et matrice ($\alpha = 12 \text{ à } 16 \cdot 10^{-6}/\text{c}$) endommageront –elles prématurément le matériau ?

On peut répondre que sous l'effet des variations de température la matrice ($\alpha = 10 \cdot 10^{-6}/\text{c}^\circ$) et la fibre se dilatent. Ces variations relatives ne doivent pas détériorer le composite. Sous les sollicitations de ce type se posent du fait de la compatibilité des coefficients de dilatation. L'effet des résistances en compression du béton et du béton renforcé de fibres a été étudié par Faiyao et Al-Aussi (1986). Ils en déduisent que la résistance, en compression du béton de fibres d'acier ou de verre, est supérieure à celle du béton mais reste indépendante du pourcentage de fibres vis à vis de cette sollicitation pour un volume de renforcement de 0,5 à 1%. Notons que les fibres d'acier trouvent une application importante dans le renforcement des produits réfractaires (Hackman 1980).

La fibre de carbone dans la matrice de ciment est mise en traction pour les variations de température positives et en compression pour les variations négatives. L'interface fibre matrice est ainsi sollicitée. Pour ce type de fibre, Shigeyuki Akihama et Al (1986) mirent en évidence qu'à partir de 140 c° le composite commence à perdre ses propriétés mécaniques. Les fibres en matériaux polymériques, du fait de leur important coefficient de dilatation, sont sollicitées en compression (20 MPa pour du polypropylène pour une variation de $+60^\circ$), et en traction pour un δT négatif.

I.3.5 La mise en oeuvre de béton de fibres:

On peut incorporer dans un mortier ou béton une certaine quantité de fibres longue de quelques centimètres, tout simplement comme un granulats additionnel dans une bétonnière. C'est la une technologie d'emploi immédiat et nous centrerons notre propos sur elle. Il convient de noter que d'autres techniques très performantes existent comme la projection ou le moulage par centrifugation, et il n'est pas irréaliste de prévoir que d'autres procédés (voir figure (I.19)) , comme le moulage par pultrusion ou le moulage en continu, voient le jour.

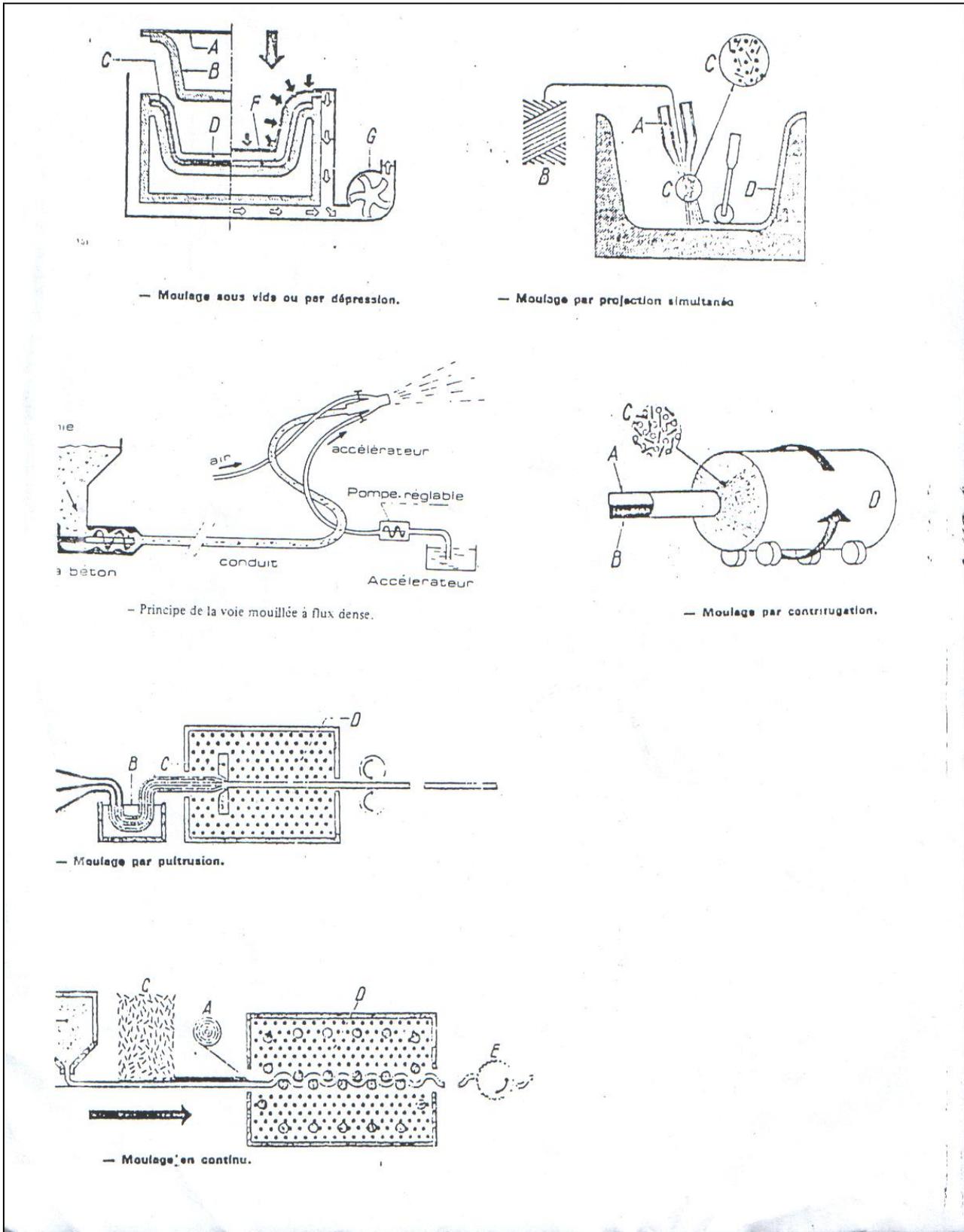


Figure (I.19) : Principales méthodes de mise en œuvre d'après les Travaux De Recherche De Laboratoire De L'institut National Des Science Appliquées De Lyon

L'addition de fibres à un béton ordinaire pose très vite des problèmes d'élaboration, dus à la réduction de la maniabilité du mélange. L'expérience montre que ce n'est pas uniquement la géométrie des fibres et le volume incorporé qui influencent les propriétés rhéologiques du béton frais renforcé de fibres, mais aussi la taille, la forme et la fraction volumique des gros granulats et des fines rajoutées.

Pour les mesures d'ouvrabilité, le cône d'Abrams reposant sur une méthode d'écoulement statique n'est pas un bon indicateur de l'aptitude relative des bétons à une bonne mise en place. Les méthodes dynamiques, permettant la mesure d'un temps d'écoulement du béton soumis à une vibration donnée, semblent être un meilleur indicateur (l'essai V_e-B_e ou le maniabilimètre LCL- Edgington (1973)).

La figure (I.20) (Boučekouk-Debicki- Hamelin (1987)) donne l'effet du pourcentage de fibres et leur élancement sur l'ouvrabilité du béton pour des rubans composés de fibres de verre enrobées de thermoplastique. Des résultats semblables ont été obtenus par Edgington et Hannant (1972) avec des fibres d'acier. Ceux-ci montrent une diminution rapide de l'ouvrabilité avec l'augmentation de l'élancement de la fibre, ainsi qu'avec l'augmentation de la proportion volumique des fibres incorporées. Une forte réduction de l'ouvrabilité se produit également lorsqu'on augmente la teneur en grains de dimension supérieure à 5 mm dans le mélange (Edgington (1973)). Précisons que le rajout de fines diminue également l'ouvrabilité

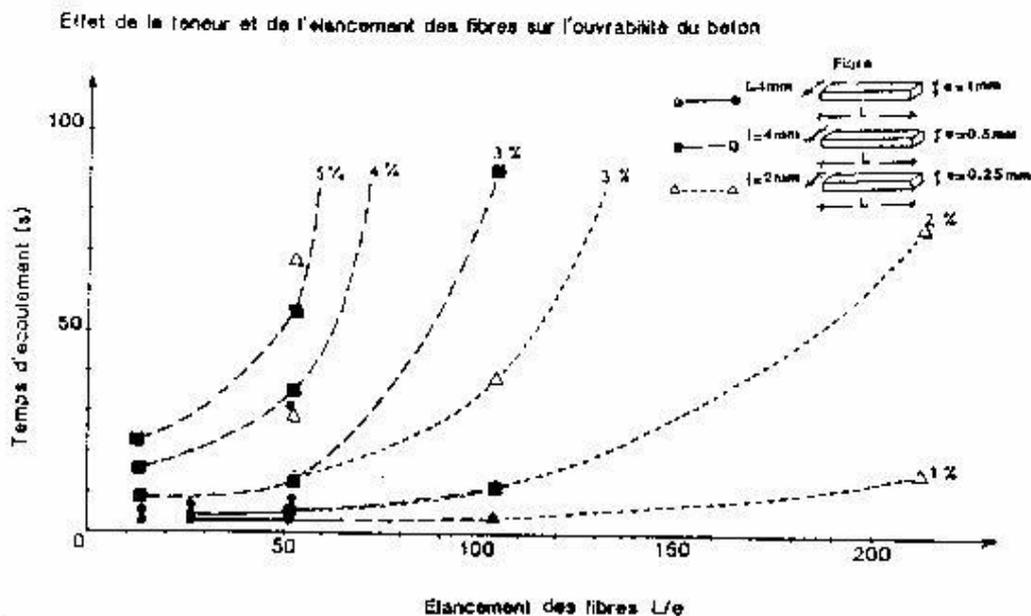


Figure (I.20) : Ouvrabilité des mélanges en fonction du pourcentage de fibres prismatique et de l'élancement (Boučekouk-Debicki- Hamelin(1987))

Ainsi apparaît une « limite pratique de faisabilité » que les chercheurs ont essayé de préciser. Dans le cas de fibres d'acier c'est la non formation d'oursins qui sert de critère. Dans le cas des fibres d'acier, les formules suivantes sont proposées pour définir le pourcentage massique ou volumique maximale de fibres intégrables ($V_{f_{max}}$)

$$V_f < 3 \frac{d}{l} \quad (I.4)$$

d : diamètre de la fibre

l : Longueur de la fibre

*- **Tattersall et Al** (1974)

$$V_f < \frac{600}{\Gamma_c} (1 - A_g) \quad (I.5)$$

V_f : proportion des fibres, en fraction pondérale

$$A_g = \frac{\text{masse des granulats supérieurs à 5 mm}}{\text{masse totale du béton}} \quad (I.6)$$

Γ_c : élancement (longueur de la fibre sur son diamètre)

*- **Edginton** (1973)

$$100 \frac{V_f}{V_m} < 75 \pi \frac{g}{g_m} \frac{d}{l} \cdot K \quad (I.7)$$

V_m : proportion de la matrice, en fonction pondérale.

G_m : masse volumiques de la matrice et de la fibre.

Ou $K = \frac{G_m}{G_m + G_g}$

G_m ; est la masse relative de la matrice moins la masse des grains inférieurs à 5 mm.

G_g : la masse relative des grains supérieur à 5 mm.

*- **G. Liqui** (1986) :

$$V_f < \frac{B}{l/d - 16} 1.08 \left(1 - \frac{D_{max}}{32.5} \right) \quad (I.8)$$

B est une constante dépendant des proportion de mélange du béton (valeur courante 1,8).

D_{max} : taille du plus gros granulat en mm.

L'utilisation de plastifiant et de superplastifiant permet d'augmenter les pourcentages de fibres introduites en ayant un rapport eau sur ciment qui conserve de bonnes propriétés à la matrice. Le rajout d'eau dans la matrice pour augmenter le pourcentage de fibres peut annuler pratiquement les gains de résistance mécanique obtenus avec les fibres.

I.3.6 Propriétés des bétons de fibres :

On observe une différence de comportement sous sollicitation du béton renforcé de fibres et du béton traditionnel. Leurs courbes effort-déformation sont très différentes. Il en résulte certaines modifications dans les propriétés du béton. La courbe dépend des paramètres suivants.

- Pourcentage de fibres
- Longueur des fibres (ou rapport de la longueur sur le diamètre).
- Forme de la section dont dépend la surface latérale d'adhérence et notamment du rapport de la section sur le périmètre.
- Forme des fibres (à crochets, ondulées, plates, droites).
- Nature des fibres.
- Béton de la matrice (formation, dimension de granulats, teneur en ciment, maniabilité).
- Orientation des fibres vis-à-vis de la direction de l'effort.

I.3.6.1 Propriétés mécaniques:

I.3.6.1.2 Résistance a la compression :

La résistance à la compression simple qui est déterminée par la valeur maximum de l'effort appliqué, est la caractéristique de base des bétons employés dans les structures. Dans le cas du béton de fibres, l'introduction des fibres dans la matrice peut avoir deux effets contradictoires : d'une part maintenir les fissures, ce qui est favorable pour la phase post pic, mais d'autre part créer des défauts supplémentaires à l'interface fibre- matrice. Ces défauts peuvent servir d'amorce à l'endommagement et donc limiter la charge maximale.

Généralement, la plupart des résultats de la littérature qui comparent un béton normal à un béton de fibres, montrent une légère augmentation de l'effort maximum de compression avec la teneur en fibres. Dans certain cas, on a une légère augmentation de la contrainte ultime (Balaguru 1992, Banthia 1995, Paskova 1997, Yin 1988) et comme l'illustre la figure (I.21) tirée d'une publication de Johnson W. et Al 1974 où on montre le gain de 15% de la résistance à la compression. Dans d'autres cas (figure (I.22)) une légère diminution (Rossi 1994 et Dardar J 1975) est montrée cette diminution à partir de $V_f=0.5\%$ pour des fibres de polypropylène. On peut aussi négliger l'effet de fibre en compression si le volume de fibre est inférieur à 0.75% Chez Balaguru 1992 et inférieur à 1% chez Pascova 1997. Le changement du module d'élasticité est aussi négligeable.

La présence de fibres change le mode de rupture de béton. Il devient plus ductile. Cette ductilité dépend des facteurs volume fraction de fibre, géométrie des fibres, et composition de la matrice. L'addition de fibres augmente la déformation au sommet puis la courbe descend lentement comme le montre Gapalaratnan VS et Shah S.P 1985 dans leurs résultats statiques en

compression, que la présence de fibres (d'acier) dans la matrice augmente la résistance à la rupture de 35% pour 1.5% de fibres, et la déformation correspondante à la résistance maximale augmente de 38% (figure 1.23) éprouvette cylindrique de diamètre 76 mm et 152 mm de hauteur).

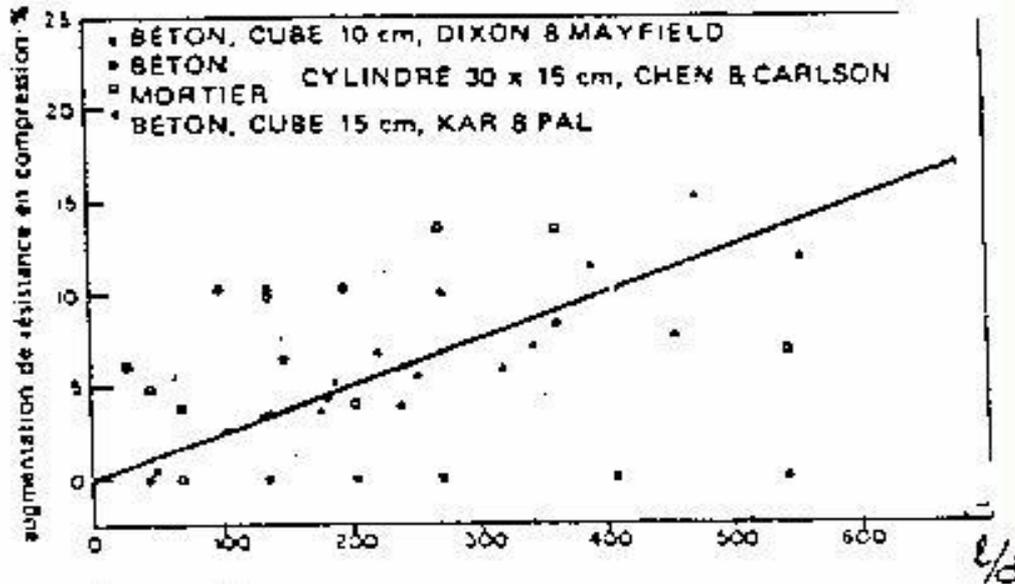


Figure (I.21) : Augmentation de la résistance en compression en pourcentage d'un béton ou mortier armé de fibres d'acier en fonction des paramètres L/d (Johenson W. et Al 1974)

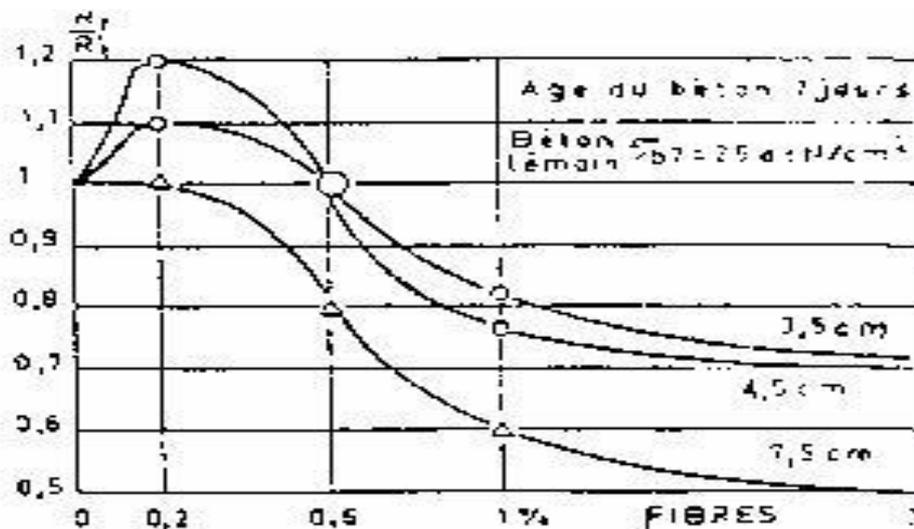


Figure (I.22) : Influence de la longueur et de pourcentage de fibres sur la résistance à la compression du béton armé de fibres de polypropylène (Dardar 1975)

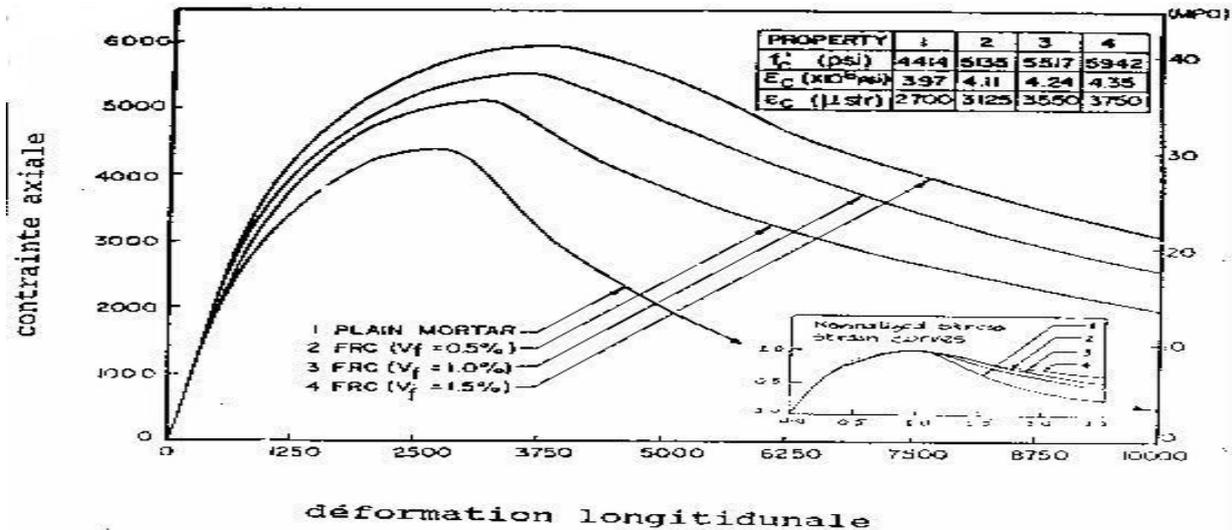


Figure (I.23): relation entre la déformation longitudinale et la contrainte axiale en compression
(Gopalaratnam V.S et Shah S.P 1985) (Fibres $L = 2.54$ cm)

I.3.6.1.3 Résistance a la traction :

Comme il a été illustré au dessus, les fibres modifient principalement le comportement après fissuration. Les fibres ont deux rôles: d'une part elles sont susceptibles de retarder l'apparition de la macrostructure de la matrice et d'autre part, elles réalisent une couture sur les lèvres de la fissure formé dans l'éprouvette, ceci augmente de la "ductilité" au matériau. Durant la première phase, la microfissuration se répartit uniformément dans le volume. Le matériau est caractérisable par une loi de comportement. Pour augmenter la résistance à la fissuration. Il semble logique en utilisant un fort pourcentage de fibres courtes. Conditions aux limites du corps d'éprouve. Des fibres longues bien ancrée et ductiles offriront une bonne résistance à l'ouverture des fissures (Houari 1992)

Les fibres sont introduites dans le béton pour compenser la fragilité du matériau en traction par une couture de la macrofissuration. En revanche, le comportement postfissuration est fortement lié à la teneur en fibres, à leur orientation et à leur mode de fonctionnement. Mais la contrainte postfissuration n'est pas directement proportionnelle à la quantité de fibres introduite.

Plusieurs méthodes expérimentales ont été développées pour quantifier l'action des fibres sur le contrôle de la fissuration. Ce sont l'essai de fendage et de module de rupture (qui ne donnent accès qu'à une valeur pic qualifiée de résistance, l'essai de flexion (avec mesure de la flèche et du comportement postfissuration) et l'essai de traction uniaxiale. Cependant, la plupart de ces essais ne permettent pas de déterminer un comportement intrinsèque du matériau. En effet, les résultats dépendent généralement de la taille des éprouvettes et font intervenir des effets structuraux qu'il est difficile d'analyser en terme de comportement en traction (Casanova 1996)

Les augmentations de résistance en traction dues aux fibres sont variables. La plupart des chercheurs proposent qu'il y a une légère augmentation de la contrainte ultime et présence d'une phase post pic. Balaguru (1992) propose que l'on puisse négliger l'effet de fibre en on peut dire que les améliorations constatées dépendent essentiellement de la forme des éprouvettes, des paramètres liés à la géométrie et au pourcentage volumique des fibres utilisées.

D'autres chercheurs comme Johnson C. et Coleman R.A 1974 indiquent sur les figures (I.24.a et I.24 b) que l'augmentation relative de la résistance en traction du béton renforcé de fibres est donnée par la formule suivante.

$$\frac{\sigma_c - \sigma_m}{\sigma_m} = 0.015 V_F \left(\frac{L}{d}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (I.9)$$

Avec L : Longueur de fibre.

d : diamètre de fibre

V_F : volume de fibres.

La résistance à la traction du composite s'exprimant par :

$$\sigma_c = \left(1 + 0.015 V_F \left(\frac{L}{d}\right)^{\frac{3}{2}}\right) \sigma_m \quad (I.10)$$

Cette formule a l'intérêt de mettre en évidence les deux paramètres qui jouent un rôle primordial dans la résistance à la traction.

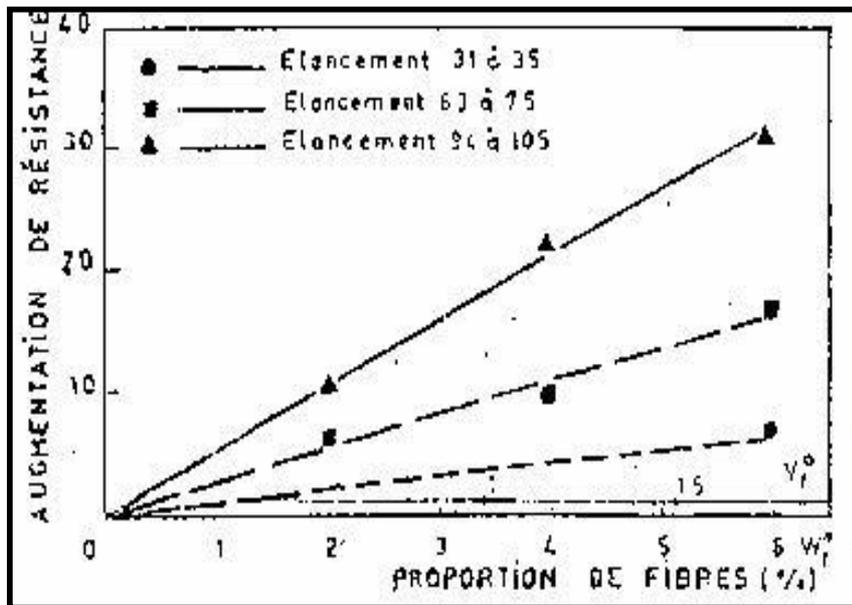


Figure (I.24) a : augmentation de la résistance $\frac{\sigma_c - \sigma_m}{\sigma_m}$ à la traction d'un mortier armé de fibres d'acier en

fonction du volume de fibre (Johnson et Coleman 1974)

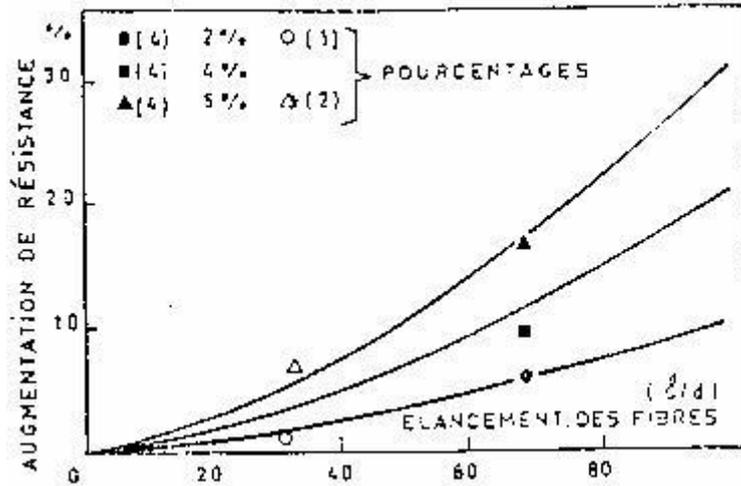


Figure (I.24 b) : augmentation de la résistance à la traction $\frac{\sigma_c - \sigma_m}{\sigma_m}$ d'un mortier armé de fibres d'acier en fonction de l'élançement des fibres (Johnson et Colman 1974)

Cependant, le rôle de la longueur apparaît clairement dans toutes les recherches, comme le montre (Majumdar 1975) dans son article dont est extraite la courbe suivante (figure 1.25) :

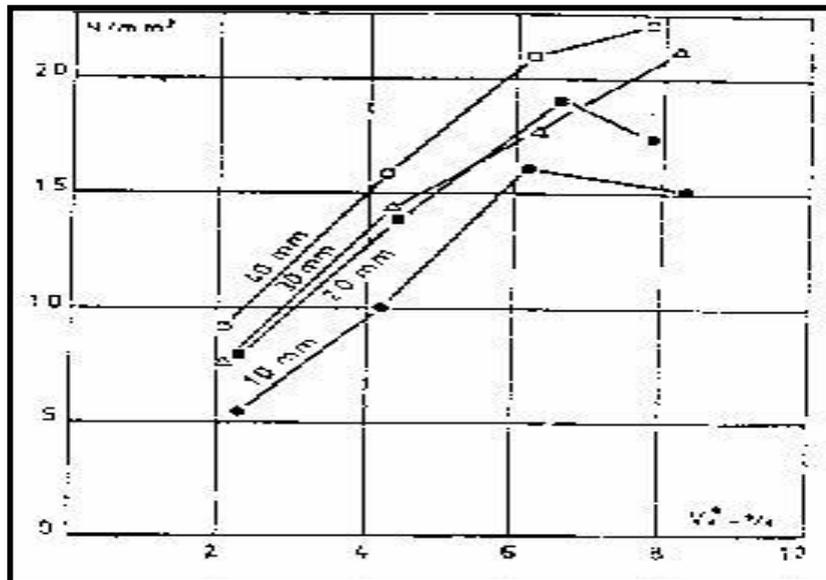


Figure (I.25): Résistance à la traction du ciment armé de fibres de verre en fonction du pourcentage en volume de fibres V_f et pour différentes longueurs de fibres (Majumdar 1975)

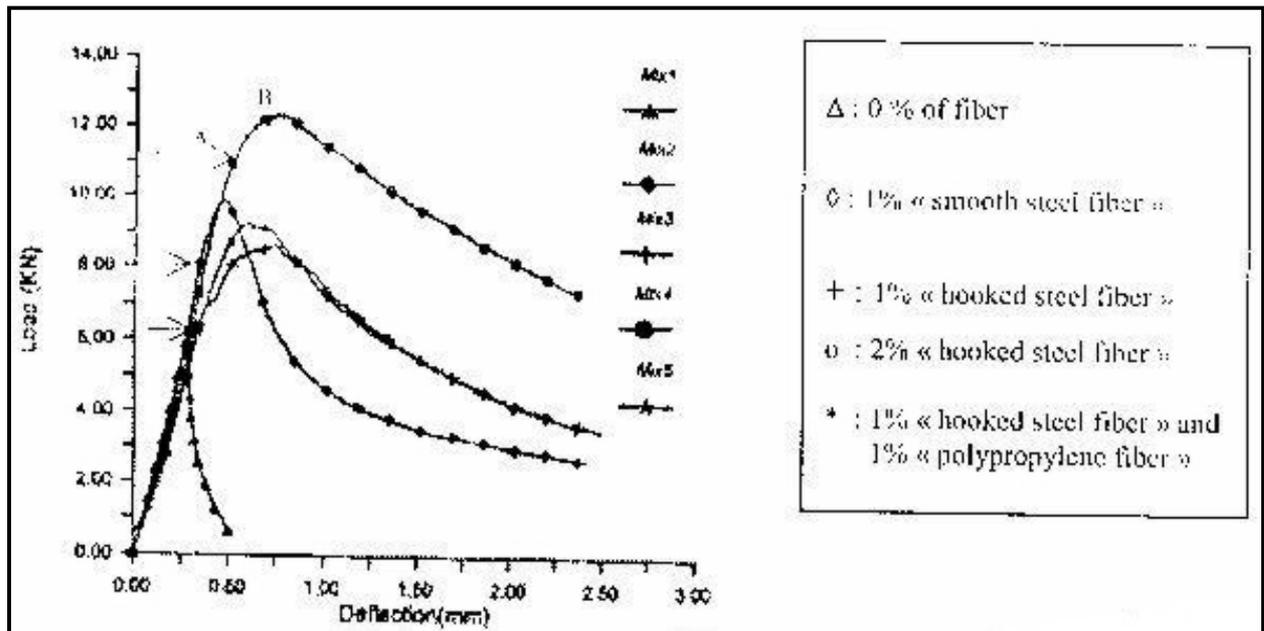
I.3.6.1.4 Résistance en flexion :

Le comportement en flexion est l'aspect le plus important pour un béton de fibre car ce matériau composite subit le plus souvent ce type de chargement dans ses applications. On ajoute des fibres dans la matrice pour améliorer la ductilité et fournir un contrôle du mécanisme de fissuration. L'amélioration de la résistance de première fissuration est ordinairement un gain secondaire. En flexion, la structure fissurée peut reprendre des efforts bien supérieurs à ceux relevés lors de l'apparition de la première fissure.

La figure (I.26) donne la courbe charge- flèche qui représente les deux comportements :

- Partie linéaire (entre O et A), le point A est la limite de proportionnalité et correspond à la première fissuration de la matrice. Nous notons F_f cette charge de fissuration à laquelle correspond une contrainte σ , calculée avec la théorie élastique.

Dans la partie développement de fissuration (entre A et B), les fibres jouent le rôle d'armatures dans les zones fissurées. Le point B correspond à la charge maximale reprise par l'élément de structure. On désigne cette charge par F_{max} . Avec cette valeur et les caractéristiques géométriques de l'éprouvette, il est possible de calculer un module de rupture (MOR), déterminé en supposant le matériau élastique jusqu'à rupture. Le module de rupture est une grandeur commode pour comparer des composites ou pour les dimensionner. Cependant, à partir de cette grandeur, il n'est pas possible de connaître l'état de contrainte et de déformations dans le composite avec la seule théorie élastique



La figure (1.26): courbe de charge – flèche en flexion (Masdar Helmi Juin 1998)

Le diagramme charge- flèche intègre à la fois un comportement de matériau et un comportement de structure en fonction du type de fissuration à se développer. L'analyse de ce résultat expérimental permet de caractériser la ténacité du matériau avec le calcul d'indices basés sur des considérations énergétiques

I.3.6.1.5 La ténacité :

Le concept de l'indice de la ténacité du 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

Le béton de fibres est plus ductile qu'un béton normal, c'est à dire qu'une grande énergie est demandée pour pouvoir fissurer le béton de fibres et spécialement pour faire augmenter la fissure jusqu'à la rupture.

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 appelé indice de ténacité.

Généralement, la ténacité est représentée par les aires sous les diagrammes charge flèche en flexion. Mais les chercheurs ont essayé d'identifier la ténacité sur une base numérique au lieu de la base graphique. Pour cela, la question qui a été posée est : comment doit on interpréter la relation graphique (charge- flèche) par des nombres qui peuvent donner une identification significative au concept de la ténacité.

Des chercheurs ont essayé de quantifier la ténacité par un indice qui permet de mesurer et de comparer la capacité d'absorption énergétique des divers bétons de fibres. Pour cela toutes les méthodes ont été basées sur des essais de flexion.

- **La méthode ACI comite 544** (1978) définit la ténacité par un indice unidimensionnel. Cet indice est calculé en utilisant l'aire défini par la courbe charge- flèche d'une éprouvette testée en flexion. Il est égal au rapport entre l'énergie totale absorbée par l'obtention d'une flèche au centre de 1.9 cm et l'énergie absorbée jusqu'à l'apparition de la premier fissure.

- **La méthode japonaise (JCI)** : qui définit la ténacité comme l'aire comprise entre la courbe charge- déformation et l'axe horizontal indiquant la déformation jusqu'à une déformation de 1/50, ou I est la portée de la poutre. L'éprouvette utilisée est une poutre de 150x150x 450 ou bien 100x100x300, chargée au milieu.

L'indice de ténacité est calculé avec la formule suivante :

$$\bar{\sigma}_b = \frac{T_b I}{\delta_t . b . h} \quad (I.11)$$

Où

$\bar{\sigma}_b$: L'indice de ténacité (N/mm²)

T_b : La ténacité par flexion (J)

δ_t : La déformation correspondant avec L/150

- **La méthode ASTM C1018 /**

définit l'indice de ténacité comme le rapport entre l'aire OAB et l'aire OACD (figure (I.27)). Dans cette méthode les éprouvettes sont double tranchant, soumises à une force excentrée de compression.

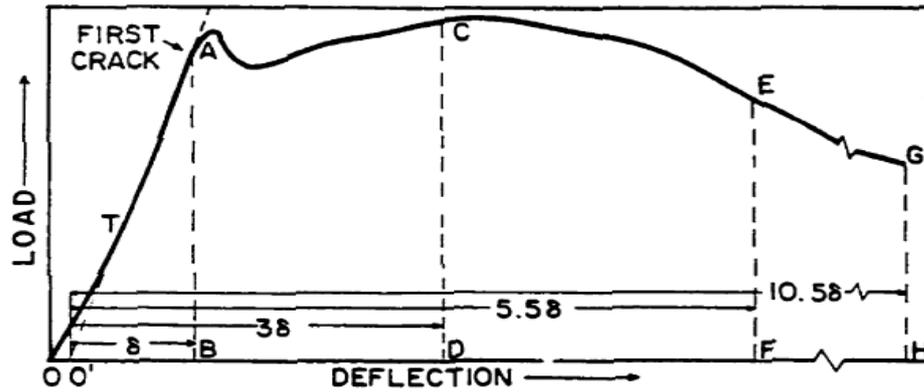


Figure (I.27): Courbe De Calcul De L'indice De Ténacité Par La Méthode ASTM C1018

I.3.6.1.6 Résistance aux chocs :

Le cas de chargement dynamique, tel que le choc, remet en question les modélisations et les lois de comportement du béton fibreux sous chargement statique ou quasi-statique. La structure interne hétérogène fait que chaque composant se déforme différemment et que l'interaction inter granulaire engendre des frictions internes différentes pour chaque niveau de contrainte.

Gopalaratnam V.S et Shah S.P (1985) ont effectué un certain nombre d'essais avec un appareil de type Charpy pour le B.A.F de fibres d'acier. Ils ont montré que pour un même type de chargement (flexion) le rapport résistance statique à la résistance dynamique est égale à 0.79 , 0.99 et 1.11 pour des pourcentages de fibres de 0.5 , 1 et 1.5 % respectivement (Pourcentage des fibres en volume).

Krenchel H a trouvé dans ses essais aux chocs en compression, que la résistance dynamique du béton renforcé par de fibres d'acier varie en fonction du pourcentage de fibres et du rapport L/d. Le (tableau (I.7)) suivant montre ses résultats :

Tableau (I.7):la résistance dynamique en fonction du pourcentage de fibres

Par Krenchel H. (1974)

$V_f = 0$	$\sigma_c = 2.9 \text{ KNm/mm}^2$	
$V_f = 2\%$	$\sigma_c = 20 \text{ KNm/mm}^2$	L/d= 85
$V_f = 1\%$	$\sigma_c = 30 \text{ KNm/mm}^2$	L/d=170

(Parimi S. et J. Rao J. 1974) proposent de calculer la résistance aux chocs en additionnant la résistance de la matrice et l'apport des fibres par la formule :

$$T_F = \left(\frac{L}{E}\right) \cdot V_F \left(\frac{L}{d}\right)^2 \quad \text{Avec} \quad T_C = T_m + T_f \quad (\text{I.12})$$

(Kaxamura N. 1984) a montré qu'en flexion dynamique, le mortier sans fibres n'a aucune résistance après la limite élastique, ce qui n'est pas le cas pour le béton de fibres. Au-delà de cette limite, il a montré que la flèche augmente alors que la résistance reste constante, et elle augmente quand le pourcentage de fibres augmente Tableau (I.8)

Tableau (I.8): La résistance à la flexion et aux chocs en fonction du pourcentage de fibres (Kaxamura .1984)

Matériau	Résistance à la flexion MN/m ²	Résistance aux chocs MN/m ²
Ciment en pâte pure	8	1.7
Ciment+ 1% de fibres polypropylène l=51 mm	5.9	18.6
Ciment+ 5% de fibres verres l=32 mm	41.5	16.7
Ciment+ 1% de fibres polypropylène +5% de fibres de verres	33.4	35.4

I.3.6.2 Autres propriétés du béton de fibres :

a) Retrait :

Le durcissement du béton dans l'air s'accompagne d'une variation de son volume apparent : le retrait dont les causes ont fait l'objet de nombreuses hypothèses et théories et dont les conséquences sont importantes pour la fissuration. Si le retrait est gêné, ce qui est le cas courant, le béton est mis en traction et la fissuration se produit lorsque la résistance du béton est insuffisante.

Le retrait est un phénomène complexe d'équilibre hygrométrique, qui dépend, non seulement des facteurs internes tels que la nature et le dosage du ciment, la compacité et la granulométrie du mortier ou du béton, mais aussi de facteurs extérieurs, tel que hygrométries ambiants. Si l'atmosphère est sèche, il y a évaporation en surface : le retrait augmente. Si l'atmosphère devient humide, de la vapeur se condense dans les capillaires : le retrait diminue.

En règle générale, le retrait du béton, avec ajout de fibre, est plus faible que celui du béton témoin sans fibres.

Des essais sur des bétons de fibres de fonte par exemple, que le premier retrait d'hydratation, dû à la prise et au début du durcissement du béton les premières heures qui suivent le gâchage, ainsi que le retrait de dessiccation après durcissement du béton, sont inférieurs à ceux du béton témoin, sans fibres, de même composition.

Cette diminution du retrait, en présence de fibres, est d'autant plus remarquable que le départ d'eau du béton est accéléré par la présence de fibres.

Ce phénomène peut être expliqué par le fait que la présence de fibres dispersées augmente la grosseur des pores dans le matériau ainsi que leur volume, en diminuant ainsi l'intensité des étreintes capillaires, tout en facilitant l'évaporation de l'eau libre.

Pour conclure donc, la présence de fibres dans le béton diminue notablement le risque de fissuration due au retrait de dessiccation.

b) Comportement Au Fluage :

Contrairement au mortier et béton conventionnel, les éprouvettes renforcées de fibres sont moins sensibles aux phénomènes de fluage en compression par rapport à la traction. P.N .Swamy a mis ceci en évidence en étudiant le comportement au fluage d'éprouvettes en béton soumises à une sollicitation de flexion. La (figure (I.28) illustre ce constat :

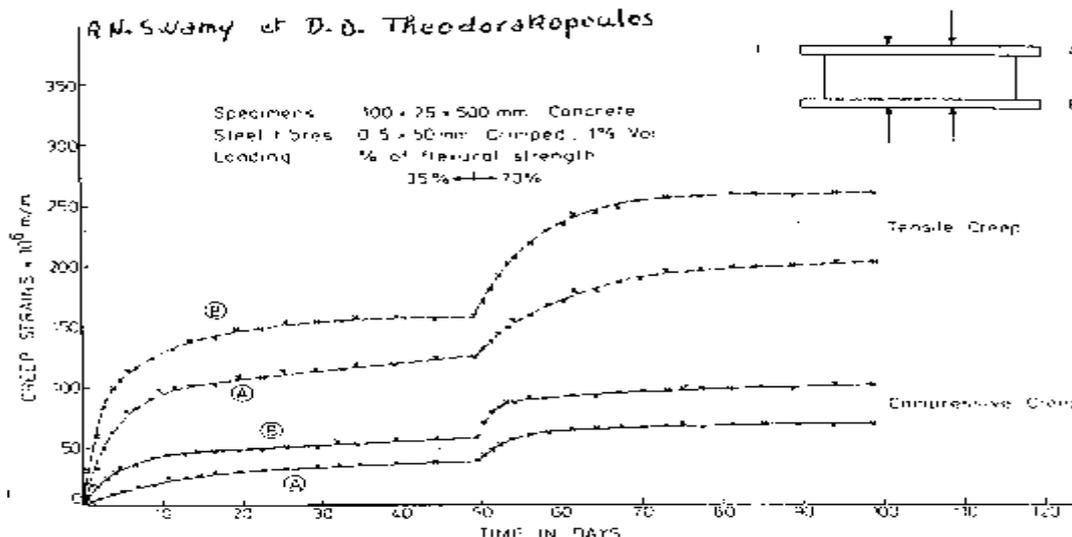


Figure (I.28): Comportement au fluage d'éprouvettes de béton de fibres soumises à une sollicitation de flexion par Swamy .P.N et Theodropoulos

I.3.7 Les avantages du béton de fibres par domaines d'applications :

On peut distinguer deux modes d'utilisation des fibres :

- Le béton renforcé de fibres seules
- Le béton renforcé avec des armatures traditionnelles dans lequel on introduit des fibres (application structurale des bétons de fibre)

Dans le premier cas on utilise les propriétés des bétons de fibre, qui seront liées au type de matrice utilisée, à celui des fibres, et à la méthode de mise en œuvre retenue.

- Utilisation des propriétés de flexion, pour réaliser des coques minces.
- Amélioration de la tenue des pièces au jeune âge.
- Modification des variations dimensionnelles, lutte contre les fissurations.

Dans le cas des applications structurales soumises à la flexion :

- On diminue de 40% l'ouverture des fissures.
- Augmentation de la rigidité après fissuration.

- Peu d'augmentation de la résistance ultime.
- Augmentation de la résistance au cisaillement.

Dans le cas de structure à la compression :

- Amélioration de la charge ultime.
- Pas de rupture catastrophique.

Dans le cas des structures soumises à des sollicitations combinées :

- Amélioration de la résistance et de la rigidité obtenues sous sollicitations simples mais qu'on ne retrouve pas forcément dans le cas du comportement des structures sous sollicitations combinées.

Dans le cas de portique :

- Augmentation de la rigidité d'ensemble de 25%.
- Augmentation de 100% de la capacité de dissipation d'énergie.
- Meilleure résistance aux déterminations face aux chargements cycliques.
- Modification des modes de rupture : cisaillement, flexion.
- Pour des valeurs de rigidité identiques les phénomènes de fissuration sont moins importants.
- La résistance à la destruction locale est meilleure dans le cas de bétons de fibre qu'avec le béton seul.

Dans le cas de sollicitation de type choc :

- Par rapport au béton : la loi de comportement du matériau est fortement modifiée, l'énergie absorbée est plus importante, la durée de choc est augmentée, et les modes de rupture sont différents (localisation, flexion- cisaillement- poinçonnement).

I.4 Conclusion:

En résumé, nous abordons, à travers la bibliographie, d'abord des problèmes liés à l'élaboration du matériau. Nous précisons que:

- Sous l'appellation "Béton de fibres" il existe une grande famille de matériaux très différents.
- D'un point de vue générale et simple, le béton de fibres est constitué en trois phases:
 - la matrice cimentaire.
 - Les fibres.
 - La zone de transition (interface) fibres- matrice.
- Le rôle des fibres dans la matrice cimentaire sur les différentes phases de comportement du matériau est fonction de différents paramètres.
- La liaison fibre- matrice est souvent une zone de faiblesse, difficilement caractérisable mécaniquement: de plus une bonne adhésion fibre- matrice ou une bonne résistance au glissement n'apporte pas les mêmes propriétés au composite.
- Il convient de compléter notre bibliographie centrée sur les propriétés mécanique de béton de fibres en notant l'importance des opérations et des conditions de mise en oeuvre qui conditionnent la structuration du matériau, pouvant créer une anisotropie de comportement (Debicki G. 1988)
- Les fibres limitent les phénomènes de propagation rapide et instable de la rupture du béton. Elles modifient les cheminements des fissures dans les structures.
- La ténacité des éprouvettes est nettement augmentée par la présence des fibres. Elle est caractérisée principalement par des mesures énergiquement globales de l'élément de structure que constitue l'éprouvette.
- Les caractéristiques des fibres et de la matrice jouent un rôle important sur la réponse mécanique du matériau.
- On remarque que le béton de fibres est très utile et son application est très large surtout dans le cas de sollicitation dynamiques

CHAPITRE II :

LES ESSAIS NON DESTRUCTIVES

Le niveau élevé atteint par la physique vers le milieu du **XX^e** siècle s'est manifesté également dans les méthodes d'essai des constructions. un vieux désir du constructeur, celui de prévoir la charge qui provoquerait la rupture d'une structure ou d'un élément sans les détruire et même sans les altérer commençait à se matérialiser. Ainsi apparaît les essais non destructifs qui contrôle la qualité directe de la construction. Pour cela on va décrire dans ce chapitre les principales méthodes non destructives en soulignant leurs avantages et leurs inconvénients.

II.1. Introduction:

Les problèmes de qualité rencontrés dans les structures en béton apparaissent à différentes phases de la réalisation des ouvrages, si pour cette raison que depuis longtemps il y a une demande accrue pour des méthodes plus précises et, en même temps , plus souples d'évaluation de la qualité du béton.

Pour cela on recourt aux essais non destructifs (END) du béton qui a une grande importance scientifique et pratique. Le sujet a suscité une attention croissante pendant des années ; particulièrement le besoin de caractérisation de qualité des constructions endommagées faites en béton, en utilisant des méthodes non destructives

Les avantages de ces essais par rapport aux autres peuvent être résumés comme suit :

- Essai d'une construction sans la détruire, ni nuire à sa capacité de service ;
- Possibilité d'obtenir des informations dans des domaines inaccessibles aux méthodes classiques (par exemple : observation in situ du durcissement du béton dans l'ouvrage, détermination et observation dans le temps du degré de corrosion des ouvrages) ;
- Supplément d'informations de caractère local, sous forme de données se rapportant à un grand volume de matériau, donc possibilité d'obtenir un tableau plus complet de l'homogénéité du matériau dans l'ouvrage ;
- Economie de matériaux, de temps et d'outillages d'essai par la possibilité de faire les essais sur le matériau dans l'ouvrage même ou sur une seule éprouvette un nombre pratiquement infini de fois, due à la rapidité de l'exécution de ce type d'essais et aussi

au fait qu'on peut remplacer certains outillages coûteux et dont la manipulation est délicate par des appareils simples et transportables.

II.1.1 Historique:

Williams en (1936) a lancé le premier essai non destructif, Après ça et pendant le développement de domaine de la construction, une gamme d'essais non destructifs in-situ, a été développée, par tant de chercheurs dans ce domaine comme : Ernest Schmilt (1948), Jones (1962), Whitehurst (1966), Malhotra (1976). Bungey (1982) a présenté une enquête complète de littérature pour les méthodes non destructives normalement utilisées pour l'essai et l'évaluation du béton,. Au milieu des années soixante Skramtaev et Leshchinsky (1966) ont proposé pour la première fois l'utilisation de deux méthodes non destructifs ensembles. Le travail le plus fondamental à ce sujet a été présenté par Facaoaru (1969). En (1991) Leshchinsky a récapitulé les avantages des essais non destructifs comme la réduction de la consommation de travail de l'essai, une diminution de la consommation de travail des travaux préparatoires, peu de dommages structuraux, l'utilisation d'équipement d'essai moins cher, par rapport à l'essai destructif. Ces avantages sont sans valeur si les résultats ne sont pas fiables.

Au cours de cette période, plusieurs méthodes non destructives d'évaluation ont été mises au point.

II.1.2 Définition des essais non destructifs:

Les essais non destructifs (END) représentent des méthodes de reconnaissance couramment appliquées aux structures de bâtiments, ouvrage d'art ou de génie civil.

Comme leur nom l'indique il s'agit de mesures n'endommageant pas les constructions. Etant entendu que quelques désordres mineurs peuvent être apportés à la structure sans toutefois modifier ni sa performance ni son apparence. Une importante caractéristique des essais non destructifs est qu'ils peuvent être refaits au même endroit ou presque, ce qui permet de suivre les changements des propriétés du béton dans le temps.

Les essais non destructifs peuvent jouer un rôle exceptionnel dans la garantie de la qualité du béton et dans le développement ultérieur de la technologie de construction. La signification de ces essais se développera considérablement à l'avenir, parce que sa technologie de mesure automatisée et la réduction de la taille de l'appareillage de mesure ouvriront des applications entièrement nouvelles. Ces essais sont rapides et légers à mettre en œuvre, et apportent de surcroît une réponse globale à l'échelle d'une structure ou d'un ouvrage, dans le cadre des contrôles d'ouvrages neufs ou en construction et comme diagnostic d'état d'ouvrages anciens.

II.2 Les méthodes d'essais :

Il existe deux genres de méthodes pour l'estimation de la résistance de compression du béton. Les premiers, englobent les méthodes qui ne mesurent pas directement la résistance mais d'autres propriétés du béton, à partir, desquels, une estimation de la résistance peut être obtenue. Ces méthodes incluent les tests tel que

- ✓ Méthode de dureté superficielle ou essai au scléromètre
- ✓ Méthode de pénétration.
- ✓ Méthode ultra son.
- ✓ Méthode par carottage.

Les seconds types de tests sont ceux qui mesurent quelques propriétés de résistance, à partir desquels on peut faire une estimation de résistance du béton. Ces méthodes englobent des tests tel que l'essai d'arrachement.

II.2.1. Essai au scléromètre:

II..2.1.2 Introduction

La méthode de dureté superficielle consiste essentiellement à une auscultation du béton par une manière standard, en utilisant une masse donnée activée par une certaine énergie puis mesurer ensuite le rebondissement. Cette méthode est connue sous le nom de scléromètre Schmidt.

Cet essai est l'un des plus vieux essais non destructifs et il est encore très utilisé de nos jours il a été développé par Ernst Schmidt en (1948) et est connu sous le nom l'essai au marteau Schmidt ou essai au scléromètre. Le marteau de Schmidt (photo II.1) est resté le seul instrument connu qui utilise le principe de rebondissement pour les essais sur le béton selon R.F Feldman (1977). En (1984) Akashi. T et Amasaki .S ont déclaré que malgré son apparente simplicité, l'essai au scléromètre sous-tend des problèmes complexes d'impact et de propagation de l'onde qui lui sont associés.



Photo (II.1): Marteau de Schmidt ou le Scléromètre

II.2.1.2. Principe

Le principe de base de l'essai au scléromètre est que le rebond d'une masse élastique dépend de la dureté de la surface sur laquelle frappe la masse, comme présenté sur la figure (II.1).

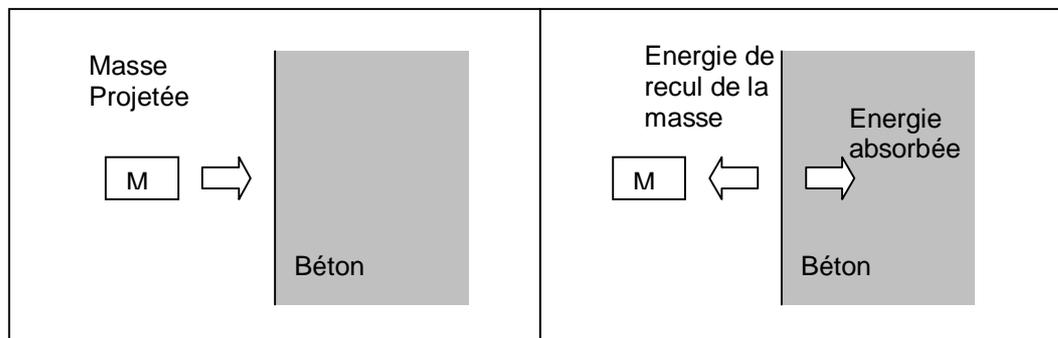


Figure (II.1): Principe du Scléromètre

Dans l'essai au scléromètre une masse approximative de 1.8 kg montée sur un ressort a une quantité potentielle fixe d'énergie qui lui est transmise par un ressort tendu à partir d'une position fixe, ce que l'on obtient en pressant la tête du marteau contre la surface du béton mis à l'essai. Lors de son relâchement, la masse rebondit depuis la tête, toujours en contact avec la surface du béton et la distance qu'elle parcourt, exprimée en pourcentage de l'extension initiale du ressort est appelée l'indice de rebondissement. Cet indice est indiqué par un curseur qui se déplace le long d'une règle graduée.

En utilisant la méthode de dureté superficielle ou essai au scléromètre il faut tenir compte des éléments suivant :

- Dans le choix des zones d'essai, éviter la surface de coulée ou la face opposée, faire l'essai sur les surfaces parfaitement planes et lisses (sans rugosités) et préférablement une surface moulée. Un béton à texture ouverte ne peut donc pas être soumis à l'essai sclérométrique. Les surfaces lissées à la truelle doivent être poncées avec une pierre de carborundum (La pierre à polir).
- La zone choisie doit être représentative de l'élément soumis à l'essai et comprendre les régions fortement sollicitées et les régions soupçonnées d'être faibles dans l'élément. Si le béton soumis à l'essai ne fait pas parti intégrant d'un élément de grande dimension, il doit être supporté de façon rigide, car un déplacement en cours d'essai se traduit par un indice de rebondissement plus faible.
- Dans le choix des points d'essai, éviter les régions proches des arrêtes de l'élément (à moins de 5 cm pour les coffrages en bois et à moins de 3cm pour les coffrages métalliques) la distance entre les points d'essai doit être d'au moins 2cm. Il ne faut pas faire l'essai dans les pores visibles, l'essai au scléromètre est sensible aux variations locales dans le béton. Par exemple, la présence d'un gros granulat directement sous la tête du marteau donne un indice de

rebondissement anormalement élevé, à l'inverse, la présence d'un vide à la même position entraîne un résultat très faible. De plus, et selon ACI dans le manuel de béton partie 2 (1994) l'énergie absorbée par le béton est liée à la fois à sa rigidité et à sa résistance de sorte que c'est la combinaison de ces deux caractéristiques qui régit l'indice de rebondissement. W.E Grieb (1982) a utilisé le scléromètre pour estimer la résistance à la compression du béton lourd et a trouvé que la rigidité du béton est influencée par le type de granulat utilisé la figure (II.2) montre la relation entre la résistance à la compression mesurée sur cylindre et l'indice de rebondissement pour des bétons confectionnés avec différents granulats (W.E Grieb (1958))

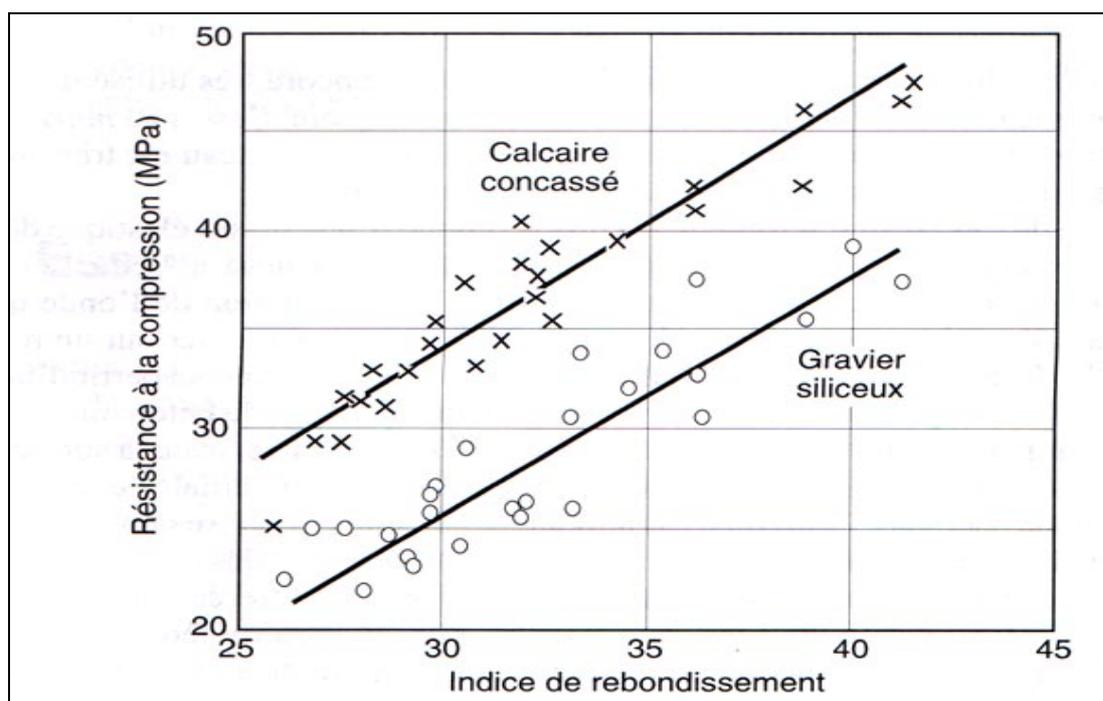


Figure (II.2) : La relation entre la résistance à la compression mesurée sur cylindre et l'indice de rebondissement pour des bétons confectionnés avec différents granulats (W.E Grieb (1958))

- La tête du marteau doit toujours être positionnée de façon perpendiculaire à la surface du béton, mais la position du marteau par rapport à la verticale aura effet sur l'indice de rebondissement en raison de la gravité qui agit sur le déplacement de la masse du marteau.
- L'indice de rebondissement doit être déterminé en plusieurs points rapprochés (en général de 6 à 12) pour une pièce bien déterminé en raison de la variabilité de la dureté du béton sur une petite surface, mais suivant la norme ASTM C 805-85 leur distance ne doit pas être inférieure à 25mm. La norme BS 1881 :partie202 :1986 recommande de faire l'essai en suivant le dessin d'une grille dont les points sont espacés de 20 à 50mm à l'intérieur d'une surface ne

dépassant pas 300*300mm ce qui permet de réduire la distorsion des données attribuables à l'opérateur.

II.2.1.3 Les étapes:

- 1- Après avoir déterminé l'indice de rebondissement en plusieurs points on calcul les indice moyens.
- 2- Procéder à une correction d'étalonnage.
- 3- Faire une correction à la position de scléromètre, montré sur la figure (II.3) et le tableau (II.1)

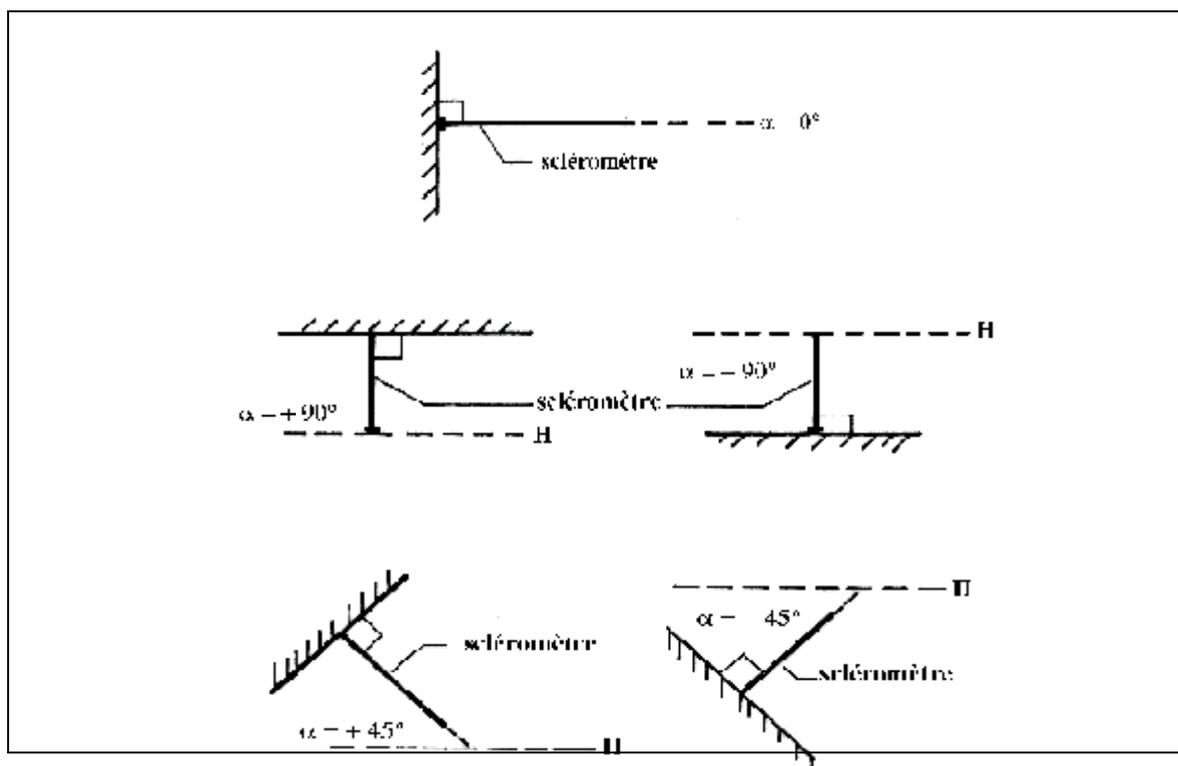


Figure (II.3): Élément à tester par le scléromètre

Tableau (II.1) : Correction de la valeur de l'indice de rebondissement en fonction de l'angle d'inclinaison

Indice de rebondissement	Correction de la valeur de l'indice de rebondissement pour les différents angles d'inclinaison de l'appareil			
	Essais vers le haut		Essais vers le bas	
	+90°	+45°	-90°	-45°
20	Non valable	Non valable	+2,4	+3,2
>20	-5,4	-3,5	+2,4	+3,4
>30	-4,7	-3,3	+2,3	+3,1
>40	-3,9	-2,0	+2,0	+2,7
>50	-3,1	-2,1	+1,6	+2,2

1- Correction de l'humidité du béton : Béton humide 1.10

Béton normal 1.00

Béton sec 0.95

- 2- Correction: résistance cubique/résistance cylindrique.
- 3- déterminé la résistance minimale et moyenne.

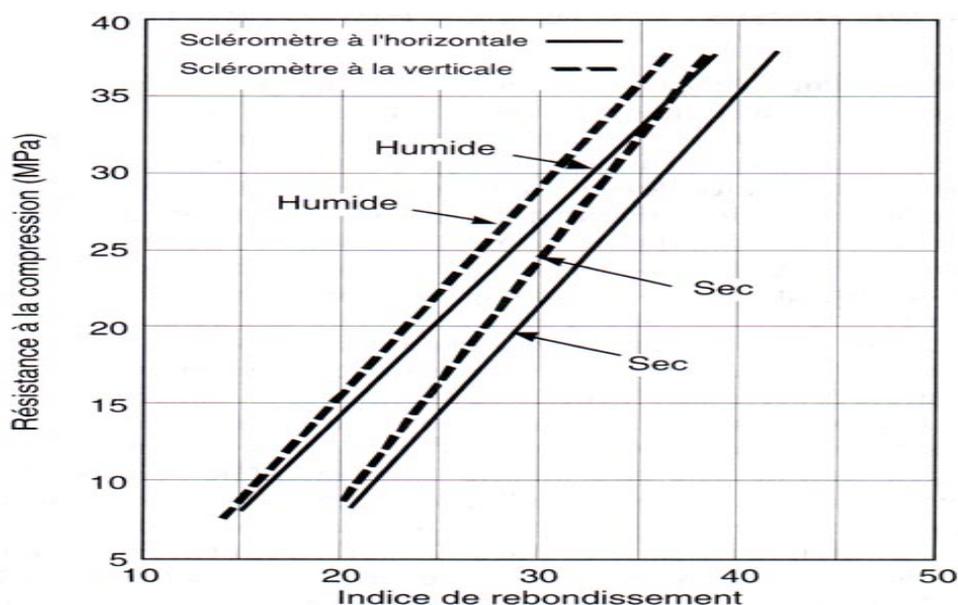
Nota : Dans le cas de béton plus de trois mois d'âge il est obligatoire de décaper d'une couche de 2cm du béton avant de faire les essais

II.2.1.4. Les avantages :

- C'est une méthode peu coûteuse, simple et rapide. Feldman (1977).
- L'essai au scléromètre est comparatif, il est utile pour évaluer l'homogénéité du béton dans une structure ou lors de la fabrication d'éléments semblables des éléments préfabriqués. (Neville 2000)
- L'essai peut aussi être utilisé pour vérifier si la valeur de l'indice de rebondissement a atteint la valeur désirée correspondant à la résistance du béton, ce qui peut aider à décider du moment où l'on peut mettre la structure en service.
- Une utilisation de cet essai est de pouvoir vérifier si le développement de la résistance d'un béton a été affecté par le gel au jeune âge. (Selon la norme ASTM C 805-85 un béton encore gelé peut donner un indice de rebondissement très élevé).
- Une application particulière de l'essai au scléromètre consiste à évaluer la résistance à l'abrasion des planchers de béton, qui dépend largement de la dureté de surface.

II.2.1.5 Les inconvénients

- Une précision entre ± 15 et $\pm 20\%$ n'est possible qu'avec des éprouvettes qui ont été coulées et soumises à un traitement de cure et à des essais dans les conditions pour lesquelles les courbes d'étalonnage ont été établies. (Feldman 1977).
- Les résultats sont influencés par des facteurs tels que l'égalité de la surface, la grosseur et la forme de l'éprouvette, le degré d'humidité du béton, le type de ciment et de gros granulats W.E.Grieb (1958) et le degré de carbonatation de la surface.
- La résistance obtenue n'est que celle de la peau de béton, elle ne renseigne pas sur le béton à l'intérieur de la masse de l'ouvrage. Selon la norme BS 1881 :partie202 :1986, l'épaisseur concernée par cet essai est d'environ 30mm. Les changements qui n'affectent que la surface du béton, comme la degré de saturation en surface (qui abaisse l'indice de rebondissement) C.H.Willetts (1958) figure (II.4) ou la carbonatation (qui augmente cet indice) S.Amasaki (1991) ont peu d'influence sur les propriétés du béton en profondeur.



Figure(II.4): La relation entre la résistance à la compression mesurée sur cylindre et l'indice de rebondissement d'un scléromètre utilisé à l'horizontale et à la verticale sur des surfaces de béton sèches et humides. C.H. Willetts (1958).

- On ne peut juger définitivement qu'une partie d'ouvrage à partir des indications du scléromètre.
- Bien que l'essai au scléromètre soit utile, il ne constitue en aucune façon une mesure de la résistance et l'on ne devrait pas accepter la revendication exagérée de son emploi en remplacement des résultats de l'essai de compression.

II.2.2. Essai d'auscultation dynamique :

Connu depuis longtemps cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton.

II.2.2.1. Principe :

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue. Les principales caractéristiques de tous les appareils comprennent un générateur d'impulsions et un récepteur d'impulsions. Photos (II.2)

Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc des cristaux semblables, elles sont utilisées dans le récepteur (Jons.R et Facoararu (1969)). La fréquence de générateur d'ondes est comprise entre 10 et 150 HZ, le temps de propagation des ondes dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques.

Les normes ASTM C 97-83 (ré approuvée en 1991) et BS 1881 : partie 203 :1986 décrivent la méthode d'essai. En France, les normes P 18-414 de 1993 et P 18-418 de 1989 spécifient les méthodologies des différentes méthodes.

Les essais consistent à mesurer la vitesse de propagation des impulsions peuvent être effectués sur des éprouvettes de laboratoire comme sur des ouvrages en béton terminés. Certains facteurs influent toutefois sur la prise de mesures :

- 1- Les ondes sonores se déplacent plus vite à travers un vide rempli d'eau qu'à travers un vide rempli d'air. Par conséquent les conditions d'humidité du béton influencent la vitesse des ondes sonores selon Sturup, Vecchio et Caratin (1984).
- 2- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire entre le béton et les transducteurs. Les matériaux d'interposition sont la vaseline de commerce, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de Glycérol. Lorsque la surface de béton est très rugueuse, il est nécessaire de poncer et d'égaliser la partie de la surface où le transducteur sera fixé.
- 3- Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau; entre 5 et 30°C, la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température. Feldman (1977).
- 4- La présence d'acier d'armature dans le béton en particulier l'armature qui suit le trajet de l'onde entraîne une augmentation de la vitesse Bungey (1989). Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de choisir des parcours d'impulsions qui ne sont pas influencés par la présence d'acier d'armature ou d'effectuer des corrections si de l'acier se trouve sur le parcours de l'impulsion.

Photo (II.2) :
Appareil d'auscultation sonore
58-E48 avec oscilloscope



II.2.2 .2 La vitesse de propagation des ultrasons:

La vitesse de propagation des ondes dans le béton est liée essentiellement à la masse volumique et le coefficient dynamique du béton comme l'indique l'équation suivante dans les normes en vigueur ;

$$v^2 = \frac{E_d \cdot (1 - \nu)}{\rho(1 + \nu) \cdot \nu} \quad (\text{II.1})$$

Où

E_d est le module d'élasticité dynamique du béton

ρ est la masse volumique du béton

ν est le coefficient de poisson

La relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasonique et la résistance à la compression est affectée par un nombres de variables tel que l'age du béton, les condition d'humidité, le rapport entre les granulats et le ciment, le type des granulats et la localisation des aciers et les fissures. La technique ne peut pas être employée pour la détermination de la résistance de béton fabriqué par différents matériaux dont on ne connaît pas les proportions.

Ces facteurs représente un désavantage majeurs des essais non destructifs dans lequel la propriété du béton que l'on mesure est affecté par divers facteurs dont l'influence est différente de ce qu'elle est dans la résistance du béton. Cette technique pour l'estimation de la résistance du béton in situ n'est pas encore considérée, dans la pratique, comme un outil de remplacement au cylindre standard et aux cubes, mais peut être utilisée comme une technique additionnel , quand elle sera exécuté avec des essais de carottage.

Une vitesse élevée de propagation des impulsions indique généralement un béton de bonne qualité. Leslie et Cheesman (1949) ont donné une relation générale entre la qualité du béton et la vitesse de diffusion des impulsions Cette relation est décrite au tableau (II.2)

Tableau (II.2): Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions selon Leslie et Cheesman (1949)

Qualité	Vitesse de propagation des impulsions, pi/s
Excellente	supérieure à 15 000
Bonne	12 000-15 000
Douteuse	10 000-12 000
Mauvaise	7 000-10 000
Très mauvaise	inférieure à 7 000

Beaucoup des interprétations des résultats de mesures aux ultrasons sont données dans la littérature. Par exemple Les résultats obtenus en appliquant la courbe de la RILEM sont donnés dans le cas où le béton testé est considéré comme homogène, isotrope et élastique et les résistances ne correspondent pas toujours à la résistance réelle du béton in situ. Ces résistances ne sont utilisées par l'ingénieur que pour donner un avis qualitatif du béton in situ.

Selon le chercheur allemand Wesche

- $2500 \text{ m/s} \leq V < 3200 \text{ m/s}$ béton de faible résistance,
- $3200 \text{ m/s} \leq V < 3700 \text{ m/s}$ béton de moyenne résistance,
- $3700 \text{ m/s} \leq V < 4200 \text{ m/s}$ béton à haute résistance,
- $V \geq 4200 \text{ m/s}$ béton à très haute résistance.

II.4.2.3. Manières de mesure :

La détermination de la vitesse de propagation des ultrasons se fait de trois manières, suivant le type de l'élément à tester :

a - Mesures En Transparence (Directe) :

Les mesures en transparence sont utilisées dans le cas des éprouvettes, des poteaux ou de certaines poutres. Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester. Comme la montre la figure (II.5)

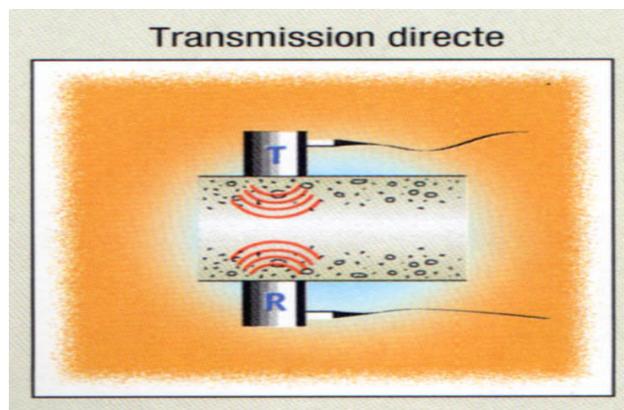


Figure (II.5) - Mesures en transparence (directe)

b - Mesures en surface (indirecte) :

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les dalles et éléments en longueur, montré sur la figure (II.6).

L'émetteur est maintenu en un point fixe, le récepteur est déplacé successivement à des distances marquées à l'avance.

Après avoir relevé le temps correspondant à un point considéré, on passe au point suivant.

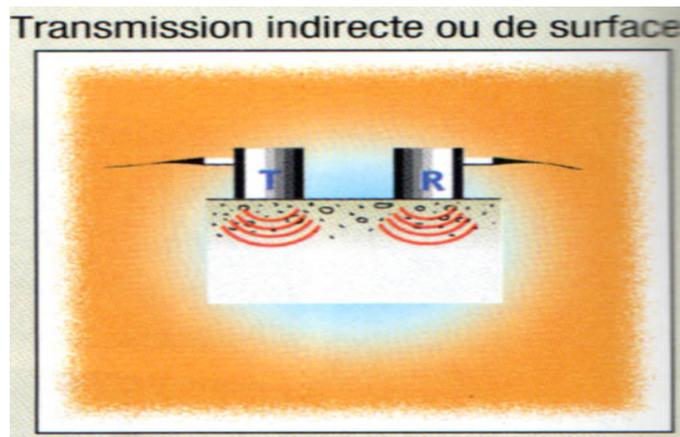


Figure (II.6) : Mesures en surface

c – Mesures semi directe :

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les éléments de structure ou on peut pas utilisé les deux autres manières.

Figure (II.7)

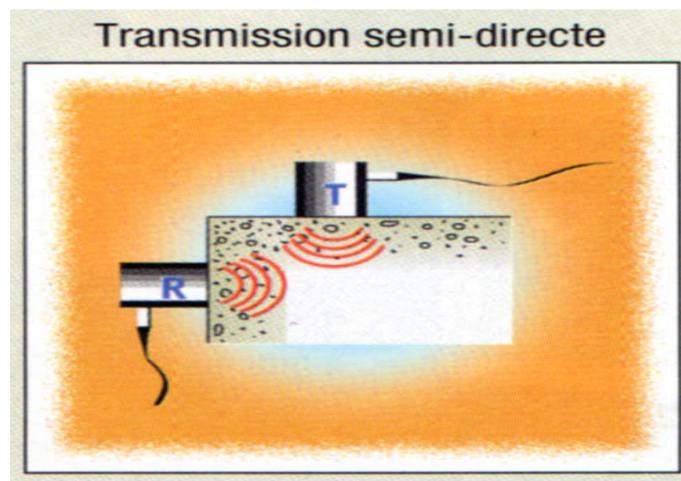


Figure (II.7) : Mesures semi directe

II.2.2.4 Les avantages :

- C'est une méthode idéale pour déterminer l'homogénéité du béton.
- L'essai peut être utilisé autant sur les ouvrages complétés que sur ceux en construction.
- La mesure des ondes sonores présente l'énorme avantage de donner des informations sur l'intérieur d'un élément de béton. Selon Chung et Law (1983) l'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour détecter la fissuration (mais les fissures parallèles au déplacement de l'onde), les vides, les détériorations dues au gel ou de feu et l'uniformité du béton dans des éléments semblables. L'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour suivre les changements microstructuraux dans un élément par exemple à la suite de cycles répétés de gel/dégel.

- Elvery et Ibrahim (1976) et pendant leurs études sur la relation de la vitesse et la résistance dans plusieurs âges ont montrés que l'essai peut aussi être utilisé pour évaluer la résistance du béton à très jeune âge, à partir de trois heures et plus, ce qui peut être intéressant dans le domaine de la préfabrication du béton ou comme outil de décision pour déterminer le moment adéquat des opérations de décoffrage

II.2.2.5 Les inconvénients :

- Ces essais ne sont toutefois pas aussi efficaces pour évaluer la résistance à cause du grand nombre de variables influençant la relation entre la résistance et la vitesse de propagation des impulsions.
- La précision des résultats est fonction de la précision de l'étalonnage et de l'uniformité de la composition du béton de l'ouvrage et du béton des éprouvettes utilisées pour l'étalonnage.
- Dans l'essai de propagation des ultrasons la propriété du béton que l'on mesure est affectée par divers facteurs dont l'influence est différente de ce qu'elle est dans la résistance effective du béton.
- L'utilisation de cette méthode, si elle a bénéficié de grandes simplifications n'est donc justifiée que pour les personnes compétentes en matière d'appareillage et de connaissance du matériau de béton et aussi au courant des précautions à prendre.

II.2.3. Méthodes combinées :

II.2.3.1.1. Introduction

Il est possible de combiner deux ou plusieurs méthodes non destructives à la fois et dont les résultats, introduits dans un traitement unique garantissent au résultat final obtenu une précision supérieure. A titre d'exemple Mamillan et Bouineau (1980) on déduit de leur recherche sur ce sujet une méthode combinée qui permet une appréciation de la résistance de béton in situ en relation avec l'indice sclérométrique et la vitesse de son. Indépendamment du type d'essai non destructif utilisé, les données proportionnées et fiables de corrélation avec des données standard de la résistance à la compression en 28 jours sont habituellement nécessaires pour évaluer l'exactitude de la méthode non destructive. En outre, la corrélation avec des résistances à la compression en place employant des carottes de un ou deux endroits peut fournir des conseils en interprétant des résultats d'essai non destructifs; ceux-ci peuvent alors être employés pour examiner de plus grandes parties de la structure. Le soin devrait être pris pour considérer l'influence des tailles et des endroits variables des éléments structuraux

Cette solution est particulièrement avantageuse lorsque des variations des propriétés du béton conduisent à des résultats contradictoires. Par exemple, lorsqu'une augmentation du taux

d'humidité augmente la vitesse de son, mais diminue l'indice de rebondissement enregistré avec l'essai au scléromètre Bellander (1977) montré sur la figure (II.8). La RILEM (1993) propose des recommandations sur l'utilisation combinée d'essais non destructifs

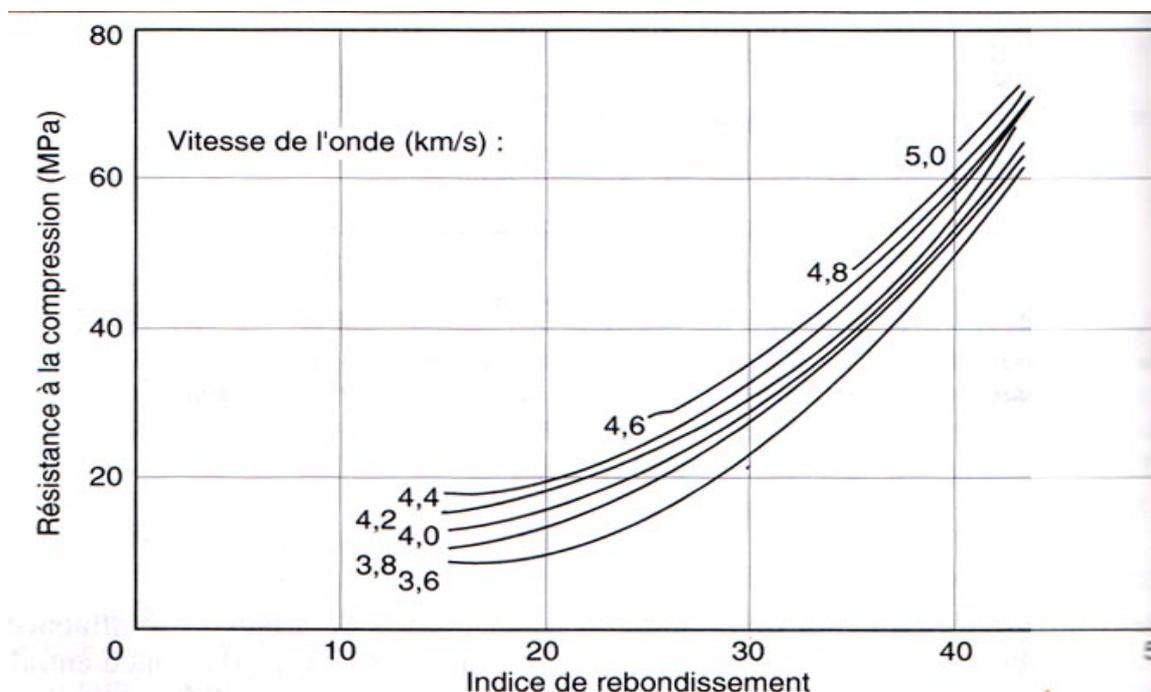


Figure (II.8): Courbe d'estimation de la résistance à la compression in situ par utilisation conjointe de la mesure de propagation d'ondes ultrasoniques et des résultats d'essai au scléromètre selon U. Bellander (1977)

II.2.3.2 Principe :

Dans notre étude on s'est basé sur la combinaison de deux essais non destructifs le plus largement répandus; essai de vitesse ultrason et l'essai de scléromètre. Le principe de cette méthode consiste à déterminer la résistance en compression du béton à partir des abaques donnant la variation de la résistance du béton en fonction de la vitesse des ultrasons et de l'indice de rebondissement $[R(V, N)]$. Cette résistance est corrigée par des valeurs des coefficients d'influences des différents constituants et de leur nature. Ou bien à partir des formules d'estimation d'après les résultats des essais en laboratoires.

Cette technique est utilisée pour la détermination de la résistance en compression en tenant compte à la fois vitesse de propagation de son et l'indice de rebondissement c'est la méthode combinée ; elle permet d'atteindre une précision accrue. Le principe reste identique et on a recours à un béton standard qui possède une courbe d'étalonnage spécifique.

La méthode a été développée pour essayer d'augmenter la fiabilité des essais non destructifs en détectant la résistance du béton.

II.2.3.3 Principe de développement de corrélation entre les paramètres de la résistance Et les résultats des essais non destructifs in-situ :

La relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasonique ou l'indice de rebondissement et la résistance à la compression est affectée par un nombres de variables tel que l'age du béton, les condition d'humidité, le rapport entre les granulats et le ciment, le type des granulats et la localisation des aciers et les fissures. La technique ne peut pas être employée pour la détermination de la résistance de béton fabriqué par différents matériaux dont on ne connaît pas les proportions. Ces facteurs représentent un désavantage majeur des essais non destructifs dans lequel la propriété du béton que l'on mesure est affectée par divers facteurs dont l'influence est différente de ce qu'elle est dans la résistance du béton. Cette technique pour l'estimation de la résistance du béton in situ n'est pas encore considérée, dans la pratique, comme un outil de remplacement au cylindre standard et aux cubes, mais peut être utilisée comme une technique additionnelle , quand elle sera exécutée avec des essais de carottage.

Aucun des essais mentionnés ci-dessus ne peut procure un excellent moyen pour établir et évaluer l'uniformité ou la qualité du béton, à moins que des corrélations au laboratoire soient établies entre les paramètres de la résistance et les résultats des essais non destructifs in situ.

La relation générale entre la résistance et l'indice sclérométrique est de la forme :

$$f_{cy} = A_0 + A_1 R^n \quad (\text{II.2})$$

Puisque le rapport $n=1$, la relation peut être considérée linéaire

$$f_{cy} = A_0 + A_1 R \quad (\text{II.3})$$

La relation générale entre la résistance et la vitesse de son est de la forme :

$$f_{cy} = A_2 V^B \quad (\text{II.4})$$

Ou $f_{cy} = a_1 e^{bV} \quad \dots(\text{II.5})$

f_{cy} = résistance à la compression de cylindre

R = l'indice sclérométrique

V = vitesse du son

A_0, A_1, A_2, B, a, b = Constantes

Samarin et Meynink (1981) ont trouvé que pour la majorité de béton commercialement utilisée en Australie la valeur de B peut être pris en tant que 4 que et l'équation de multi régression devient ainsi

$$f_{cy} = A_0 + A_1 R + A_2 V^4 \quad \dots(\text{II.6})$$

La deuxième variable (V^4) est transformée de sorte qu'une expression linéaire puisse être employée.

La corrélation est développée en utilisant des essais standard de résistance à la compression sur des éprouvettes examinés au laboratoire juste avant de les écraser.

1- L'équation pour le béton standard:

Un béton avec une proportion indiquée de mélange est défini en tant que béton standard, se rapportant à la méthode Roumaine pour l'essai non destructif combiné. L'expression suivante est appliquée par Tanigawa, Yamada, Baba et Kosaka(1982) pour estimer la résistance à la compression de mélange standard de béton :

$$f_c = k R + 22 V_{pc} - 94 \quad (\text{II.6})$$

k est le facteur de correction lié à l'âge du béton.

Le béton standard a été défini comme suit :

Type de ciment : ciment de Portland ordinaire

Dosage en ciment : 300 kg/m^3

Type d'agrégat : sable et gravier de fleuve

Taille maximum d'agrégat : 20 millimètres

Volume unitaire d'agrégat : 390 l/m^3

2- l'équation pour l'autre béton que le béton standard:

La résistance à la compression du béton avec d'autres proportions de mélange que celle de mélange standard de béton est estimée par l'équation suivante :

$$f_c = C(k R + 22 V_{pc} - 94) \quad (\text{II.7})$$

$$C = C_\phi \cdot C_V \cdot C_c \cdot C_k \quad (\text{II.8})$$

C : facteur total de correction lié aux proportions de mélange de béton

Avec :

C_c : facteur de correction lié au dosage en ciment

C_k : facteur de correction lié au du type de granulas

C_ϕ : facteur de correction lié à la taille maximum d'agrégat

C_V : facteur de correction lié au Volume unitaire d'agrégat

II.2.3.3. Les avantages

- L'utilisation combinée d'essais non destructifs garantit au résultat final obtenu une précision supérieure. Elle permet d'annuler des effets parasites. Par exemple lorsque des variations des propriétés du béton conduisent à des résultats contradictoires Bellander (1977)

- Cette technique est utilisée afin d'essayer d'augmenter la fiabilité des essais non destructifs en détectant la résistance du béton.
- Évaluer la qualité du béton in situ, avec un minimum de connaissance antérieure au sujet du béton examiné.

II.2.3.4. Les inconvénients :

- La technique ne peut pas être employée pour la détermination de la résistance de béton fabriqué par différents matériaux dont on ne connaît pas les proportions. La propriété du béton que l'on mesure est affectée par divers facteurs dont l'influence est différente de ce qu'elle est dans la résistance du béton.
- Cette technique pour l'estimation de la résistance du béton in situ n'est pas encore considéré, dans la pratique, comme un outil de remplacement au cylindre standard et aux cubes.

II.2.4 Essai par Carottage :

En vue d'effectuer des essais divers sur béton durci, le carottage par couronne diamantée procure un moyen intéressant d'investigation. Mais il est coûteux et souvent difficile à réaliser en raison de la proximité des armatures.

L'endroit carotté dépend du but de l'essai : on peut vouloir estimer la résistance d'une partie critique de la structure ou d'une partie que l'on présume endommagée par exemple par le gel. On peut également chercher à avoir une valeur représentative de la totalité de la structure, auquel cas les endroits à carotter sont choisis de façon aléatoire. Le carottage peut aussi être utilisé pour détecter de la ségrégation ou la présence de nids d'abeille, pour vérifier l'adhérence aux joints de construction ou pour vérifier l'épaisseur du revêtement.

Les carottes sont prélevées à l'aide d'un carottier à diamant on obtient ainsi une éprouvette cylindrique qui contient parfois des morceaux d'armature et dont les extrémités ne sont généralement ni planes ni d'équerre. Conformément aux normes BS 1881 : partie 120 :1983 et les normes ASTM C 42-90, la carotte devrait être placée dans l'eau, surfacée et mise à l'essai de compression à l'état humide, alors que la norme ACI 318-89 (révisée en 1992) spécifie des conditions d'humidité correspondant aux conditions en service. En France, les normes NF P 18 405 : 1970 la carotte devraient être enfermée après carottage dans un sac de polyane étanche.

Selon les études japonaises S.Yamane, et Al (1979), les essais effectués dans des conditions sèches donnent des valeurs de résistance généralement plus élevées de 10% par rapport à celles observées sur des carottes mises à l'essai à l'état humide.



Photo (II.3) : Carottage électrique à la couronne diamantée de 20 à 110 mm de diamètre

Équipement complet pour les prélèvements : carotteuse, scie diamantée

II.2.4.1. Facteurs Influençant La Résistance Des Carottes Mellas (2003)

Les résultats des essais dépendent de plusieurs facteurs. Ces facteurs ont une influence directe sur la qualité du béton. Les essais par carottage sont généralement utilisés pour la détermination des propriétés du béton in situ à un certain âge tel que la résistance et la porosité. Le carottage peut être utilisé pour détecter la ségrégation ou la présence de nids d'abeilles, pour vérifier l'adhérence aux joints de construction ou pour vérifier l'épaisseur de revêtement. Les résultats obtenus par cet essai ont besoin d'une interprétation minutieuse, car la résistance du béton d'où il est prélevé dépend de :

- ✓ La qualité du béton
- ✓ L'emplacement dans la structure
- ✓ Condition de cure
- ✓ La température sur site

L'estimation de la résistance à la compression peut être obtenue conformément aux normes BS 1881, partie 120, (1983) ou ASTM C42-90 ACI 318-89. Cette estimation dépend de :

- ✓ Du diamètre de la carotte
- ✓ du rapport hauteur/diamètre de la carotte
- ✓ De la direction de prélèvement
- ✓ De la présence des armatures

II.2.4.2. Diamètre

Le diamètre recommandé par BS 1881, partie 120, (1983) est de 100 mm ou 150 mm. Les carottes de petit diamètre sont généralement prévues pour donner des meilleurs résultats mais éparpillés. L'effet du diamètre sur la résistance a été rapporté dans le rapport N° 11 (Concrète

Society Technical Report 11 "CSTR 11"), Bellander (1976), Bungey (1979), Ramirez et Barcena (1979) et Keiller (1984). Les résultats obtenus par ces auteurs ont montré que la résistance n'est pas affectée par la taille des carottes avec de petits diamètres donnant des résultats variables pour un rapport hauteur/diamètre donné. Les recommandations spécifiant des carottes de diamètre des 100 mm ou 150 mm sont liées à la taille maximale des granulats utilisés. Le diamètre de la carotte doit être au moins trois fois la taille nominale des gros granulats [CSTR11, BS 1881 (1983)].

II.2.4.3 Elancement

En plus du diamètre de la carotte, la résistance estimée dépend, aussi, du rapport hauteur/diamètre appelé élancement. Les cylindres normalisés ont une hauteur égale à deux fois le diamètre mais on trouve dans des cas des carottes présentant d'autres proportions où cet élancement varie de 1 à 2. Le diamètre de la carotte dépend du carottier mais la hauteur dépend de la hauteur de la dalle ou de l'élément carotté. Manday et Ravinda (1984) rapporta que pour un élancement inférieur à 2 la résistance possède un taux croissant, tandis que pour un élancement entre 2 et 3 la résistance reste sensiblement constante; par contre pour un élancement au delà de 3 on remarque une nette réduction dans le taux de croissance. Plusieurs essais ont été élaborés par l'ASTM et le BS avec des élancement variant entre 1 et 2, en recommandant des coefficients de corrections. Meininger et al (1977) ont trouvé que ce facteur était le même pour des cylindre mis à l'essai à l'état humide ou sec mais plus faible que celui spécifié par la norme ASTM C 42-90. Des carottes dont l'élancement sont inférieures à 1 donne des résultats peu fiable. La norme BS 6089: 1981 exige une valeur minimale de 0.95 avant le surfacage, et selon BS 1881: partie 120, 1983, la coiffe ne doit pas excéder en aucun point 10 mm d'épaisseur.

II.2.4.4 Orientation de prélèvement

L'orientation de la carotte a un grand effet sur la résistance. Les carottes prélevées dans la direction verticale donne des résultats supérieurs à celles dans le sens horizontal. Graham (1969) rapporta que les carottes prélevées dans le sens horizontal ont une résistance inférieure de 8%. Les recommandations de CSTR11 BS 1881 (1983) distinguent les carottes horizontales des carottes verticales, le rapport des résistances des premières à celle des secondes étant de 0.92. L'effet de l'orientation du prélèvement des carottes rapportée par plusieurs auteurs a conduit aux recommandations du BS 1881 (1983), Cependant, Keiller (1984) rapporta que les carottes verticales donne des résistances sensiblement différentes à celles prélevées horizontalement.

II.2.4.5 Résistances

La résistance des carottes prélevée d'une structure finie est, aussi, affectée par la présence des armatures. Elle est affectée par la direction, la quantité, et la position des armatures dans la carotte.

Par ailleurs et pour ne pas aller plus loin dans les détail, il est convenable de connaître certaines définitions liée aux essais par carottage;

- a) Résistance standard : c'est la résistance d'un spécimen de forme cubique, curé et testé en concordance avec une méthode standard tel que BS 1881 (1983).
- b) Résistance actuelle : la résistance actuelle estimée et définie comme étant la résistance d'un échantillon de béton prélevé d'un élément et testé en accord avec les procédures décrites par CSTR11 et BS 1881 (1983).

$$\left[\begin{array}{l} \text{résistance} \\ \text{in situ} \\ \text{estimé} \end{array} \right] = \frac{D}{1.5 + 1/\lambda_c} \left[\begin{array}{l} \text{résistance à la} \\ \text{compression} \\ \text{de la carotte} \end{array} \right] \quad (\text{II.9})$$

Où:

D= 2.5 pour une carotte prélevée horizontalement

D= 2.3 " " " " verticalement

λ_c rapport de la longueur (après préparation)/ diamètre

Résistance potentielle

La résistance potentielle estimée est définie comme étant la résistance à la compression d'un béton frais, en accord avec la réglementation décrite au BS 1881 (1983). Le résultat est la valeur de la résistance estimée du béton d'un élément de structure exprimé en fonction de la résistance à la compression à 28 jours suivant les normes.

La résistance potentielle est donnée par la formule suivante :

Résistance potentielle = 1.3 x Résistance actuelle.

Cette formule est utilisée pour des prélèvement des carottes dans le sens horizontal comme dans le sens vertical [CSTR 11 (1976)]

II.3 Conclusion:

Dans l'état actuel les habitudes d'évaluation de la qualité du béton dans les domaines de la construction, consistent à faire des essais destructifs à la compression ou la traction sur des éprouvettes (cubiques ou cylindriques) confectionnées lors de la réalisation de l'élément structural ou sur des carottes prises directement de la structure. On a aussi recours à d'autres méthodes appelées essai non destructifs. Comme leur nom l'indique il s'agit de mesures n'endommageant pas les constructions par exemple le marteau de Schmidt et des méthodes ultrasoniques de vitesse d'impulsion et d'autres qui n'ont pas été décrite dans notre mémoire :
Comme Essai de résistance à la pénétration, Essai d'arrachement , Essai de la fréquence de résonance, Essai pour la mesure de l'adhérence, et méthodes électriques ...etc.

Ainsi il y a un besoin énorme des outils efficaces de méthodes END d'évaluer les éléments en béton dans les structures. On le prévoit souvent dans ce point de technologie qu'un ingénieur devrait pouvoir faire quelques mesures sur le terrain rapides et pouvoir diagnostiquer l'état de la structure. Ceci peut être une réalité dans un proche avenir.

CHAPITRE III: MATERIAUX, MELANGES ET PROCEDURES

III.1 Introduction :

Ce chapitre présente les divers matériaux mis en œuvre pour confectionner nos mélanges, ou il est nécessaire de connaître les caractéristiques physico-chimiques des constituants d'un béton de fibres avant de faire l'étude de la composition de ce dernier. On va présenter après la composition des différents mélanges utilisés dans cette étude, et le mode de conservation et les procédures de mesures

III.2 Matériaux:

III.2.1 Ciment:

Le ciment utilisé est de type ciment Portland composé CPJ-CEM provenant de la cimenterie de Ain-Touta, dont les caractéristiques physique, chimique et minéralogique sont données sur les tableau (III.1, III.2 et III.3)

Tableau (III.1): Caractéristiques de ciment

Nomination	CPJ-CEM II/42,5 A
Caractéristiques	
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.215
Masse volumique Absolu (g/cm ³)	3.150
Surface spécifique (Blaine) (g/cm ³)	3371
Temps de début de prise (heure:minute)	2h: 03
Temps de fin de prise (heure:minute)	3h : 00
La résistance à la compression à 28 jours (MPA)	47

Tableau (III.2): Composition chimique du ciment

Composition chimique (%): CPJ-CEM II/42,5 A											
Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl ⁻	CaO libre	Perte au feu	Résidus insolubles
19.34	5.37	3.00	61.69	1.80	0.76	0.14	2.20	0.027	0.97	5.03	1.12

Tableau (III.3): Composition minéralogique de ciment

Composition minéralogique de ciment CPJ-CEM II/42,5 A			
C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF
58.3	14.6	8.7	11.26

III.2.2. Granulats:

On appelle “granulats “ les matériaux inertes, sables, graviers ou cailloux qui entrent dans la composition des bétons.

III.2.2.1 Le sable:

Le sable utilisé dans tous les mélanges du béton de fibres provient de la région de Lioua (wilaya de Biskra). son analyse granulométrique est donné dans le tableau (III.4), suivie de ses propriétés.

Tableau (III.4) : Analyse granulométrique du sable

Ouvertures des mailles (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumule (g)	Refus cumule (%)	Tamisât (%)
5 .000	0.00	0.00	0.00	100
2.500	227.00	227.00	11.35	88.65
1.250	218.00	445.00	22.25	77.75
0.630	607.00	1052.00	52.60	47.40
0.315	602.00	1654.00	82.60	17.40
0.160	138.00	1792.00	89.60	10.40
0.080	196.00	1988.00	99.30	0.70
fond	11.00	1999.00	99.90	0.10

a)- Propriété physique du sable :

- Masse volumique apparente = 1678 kg/m³
- Masse volumique absolue = 2572 kg/m³
- Module de finesse. = 2.58
- Equivalent de sable = ES visuel 86.2 %, ES piston = 79.3 % (Sable propre)

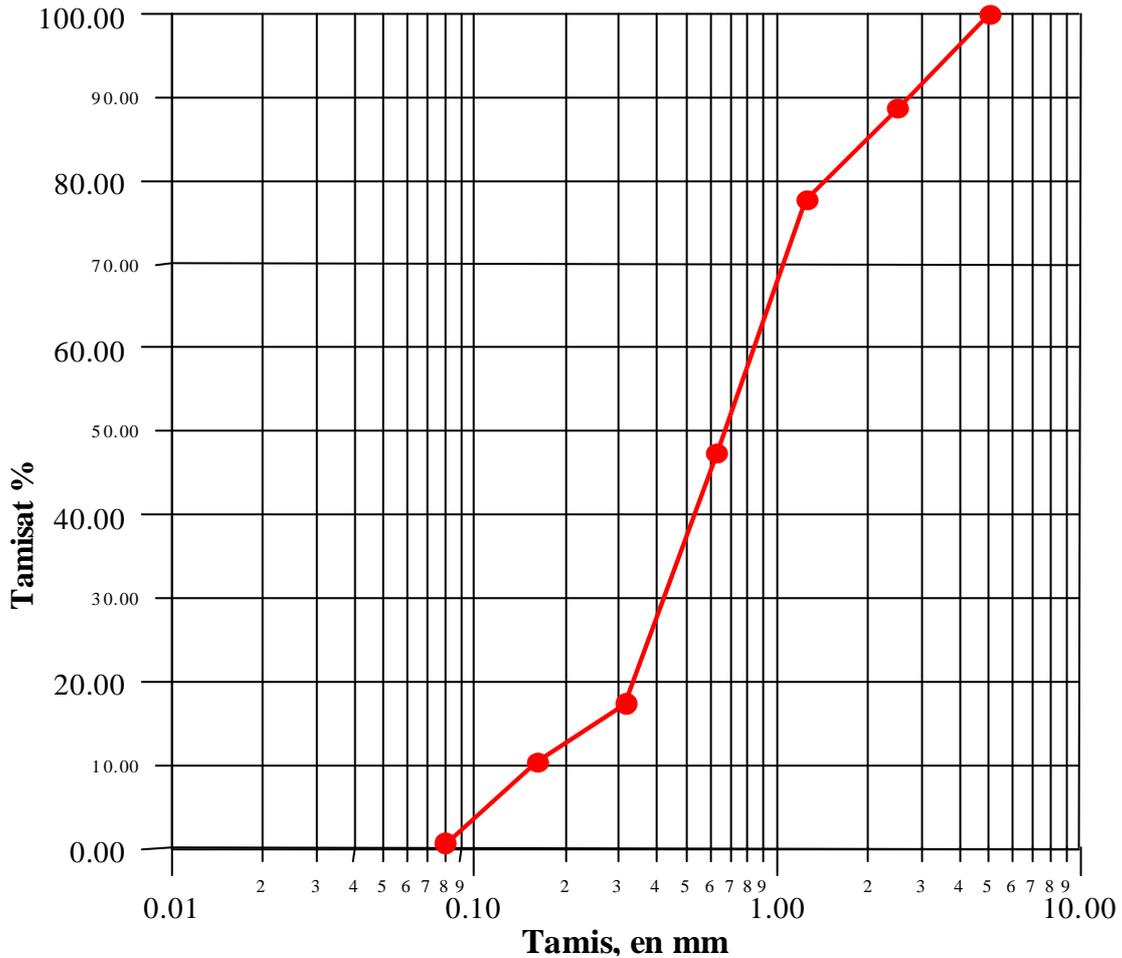


Figure (III.1): Courbe granulométrique du sable

III.2.3 Les Graviers :

Nous avons utilisé des pierres concassées de la région de Biskra, le tableau suivant nous montre leur analyse granulométrique .

Tableau (III.5): Analyse granulométrique du gravier 7/15

Ouvertures des mailles (mm)	Refus partiel (%)	Refus cumule (%)	Tamisât (%)
	7/15	7/15	7/15
25.00	0.00	0.00	100
20.00	0.00	0.00	100
16.00	1.24	1.24	98.76
12.50	48.16	49.4	50.60
10.00	31.36	80.76	19.24
8.00	13.32	94.08	5.92
6.30	5.2	99.28	0.72
5.00	0.24	99.52	0.48
Le font	0.48	100	0.00

Tableau (III.6): Analyse granulométrique du gravier 3/7

Ouvertures des mailles (mm)	Refus partiel (%)	Refus cumule (%)	Tamisât (%)
	3/7	3/7	3/7
10.00	0.00	0.00	100
8.00	18.74	18.74	81.26
6.30	38.36	56.10	43.90
5.00	35.45	91.55	8.45
4.00	1.79	96.34	3.66
3.15	0.65	98.05	1.95
2.50	1.30	98.70	1.30
Le font	3.71	100	0.00

a) Propriété physique du gravier :

- Propriété physique du gravier (3/7)
- Masse volumique apparente = 1308
- Masse volumique absolue = 2608
- Coefficient de Los Angeles = 22%
- Propriété physique du gravier (7/15)
- Masse volumique apparente = 1330 kg/m³
- Masse volumique absolue = 2590 kg/m³
- Coefficient de Los Angeles = 22 %

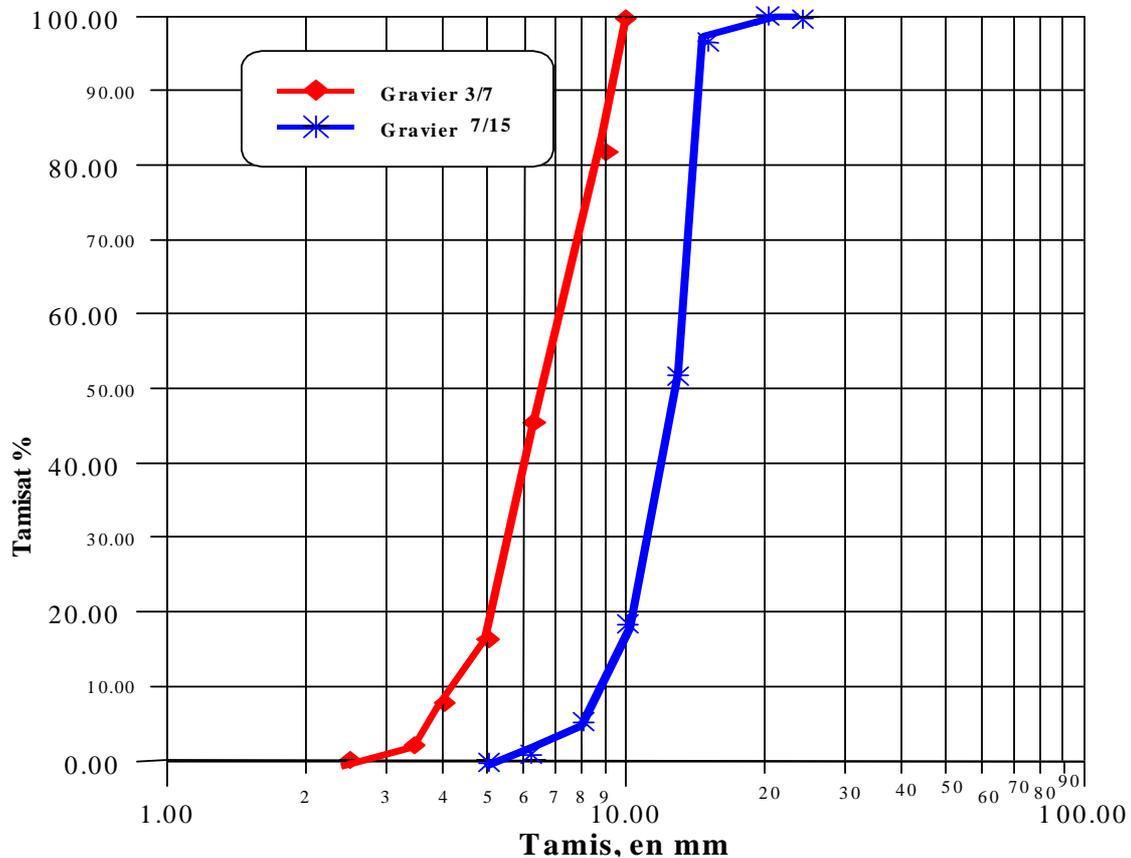


Figure (III.2): Courbe granulométrique du Gravier

III.2.4 Adjuvant

Dans notre étude nous avons utilisé l'adjuvant MEDFLUID (SF) Proviens de GRANITEX – Oued Smar-, c'est un fluidifiant. Grâce à ses propriétés le MEDFLUID (SF) permet d'augmenter les résistances mécaniques du béton, augmenter le slump et la fluidité et donc de faciliter sa mise en œuvre et d'éviter la formation de nids d'abeilles

Bétons confectionnés avec du ciment CPJ 45 et dosés à 350 kg/m³.

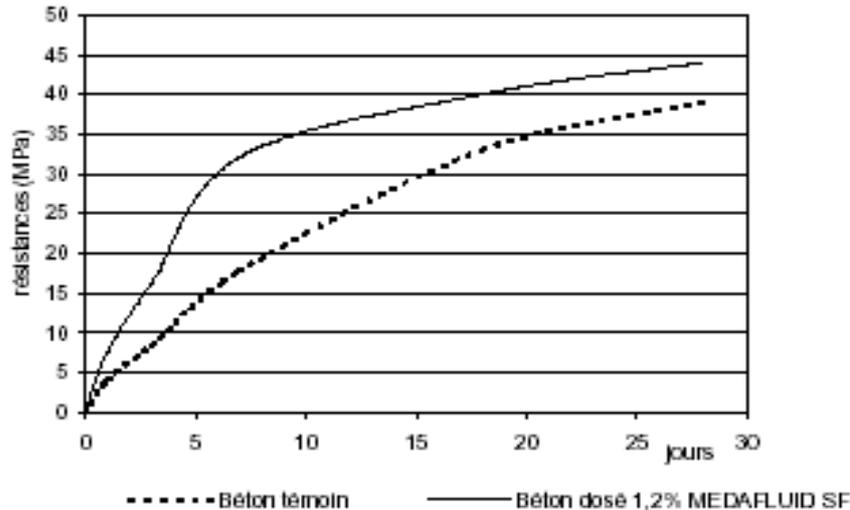


Figure (III.4): Evolution de la résistance à la compression avec le MEDFLUID (SF)
CNERIB (2000)

III.2.5 Les fibres :

Les fibres utilisées dans notre étude sont des fibres polypropylène, les principales caractéristiques fournies par le fabricant sont:

- Longueur des fibres : 12 mm
- Masse volumique : 0.9 Kg/m³

III.2.6 Eau de gâchage :

Pour la confection nos mélanges, nous avons utilisé de l'eau de robinet.

III.3. Mélanges :

La préparation des échantillons de béton de fibres, a été réalisée au niveau de laboratoire de génie civil, pour la détermination de la résistance à la compression, l'indice sclérométrique et la vitesse du son.

III.3.1. Codification des mélanges:

Les mélanges utilisés lors de cette étude sont codifiés afin de faciliter la lecture. Le système retenu est composé d'une lettre M qui signifie mélange puis suivie d'un chiffre qui représente le pourcentage des fibres utilisées dans notre étude par exemple M_1 la lettre signifie le mélange contenant 1% des fibres sauf le mélange avec 0% qui est appelé M_T c.à.d béton témoin

III.3.2 Composition des mélanges :

Des cubes de 100 mm de cotés sont moulés avec la méthode de Scramtaiv avec des rapports eau/ciment de 0.45, 0.55, 0.65. Ce choix a été fait de telle sorte que les seule variables sont : le rapport eau/ ciment(E/C) et le dosage des fibres. Le tableau (III.7) présente la composition des différents types du béton détaillées.

Tableau (III.7) : Récapitulation de la composition des différents types du béton

Matériels	M_0	$M_{0.5}$	M_1	$M_{1.5}$
Granulats	1269kg	1269kg	1269kg	1269kg
Sable	De 468 kg à 581.5kg	De 485.5 kg à 593.7kg	De 485.5 kg à 593.7kg	De 485.5 kg à 593.7kg
Ciment	De 323 kg à 466kg	307.7 à 444kg avec 2% d'adjuvant	307.7 à 444kg avec 2% d'adjuvant	307.7 à 444 kg avec 2% d'adjuvant
Eau	210	200	200	200
Fibres	0%	0.5%	1%	1.5%
E/C	De 0.45 à 0.65	De 0.45 à 0.65	De 0.45 à 0.65	De 0.45 à 0.65

Remarque: En confection on doit prendre en considération la quantité d'eau se trouve dans l'adjuvant sous forme liquide.

III.4. Procédure :

III.4.1 Préparation de béton:

Tous les mélanges ont été fabriqués dans un malaxeur d'une capacité maximale de 50 L; le même procédure de gâchage a été utilisée pour tous le béton (même pour le béton sans fibre ou la dernière étape est éliminé)

1. On introduit le gravillon, ciment, sable, On mélange à sec d'au moins 1 min.
2. Le malaxage doit être ensuite poursuivi pendant au moins 2 min On introduisant l'eau de gâchage et l'adjuvant.
3. puis on introduit les fibres est on malaxe pendant 2 min

III.4.2.Procedure des essais:

III.4.2.1 Essai sur matériaux :

Les essais réalisés selon les normes présentées au tableau (III.8).

Tableau (III.8) : Liste des normes relatives aux essais réalisés sur les matériaux

Matériau	Essai	Norme
Sable	Analyse granulométrique	NFP 18-560
	Masse volumique	NFP 18-554
	Equivalent de sable	NFP 18-598
Gravier	Analyse granulométrique	NFP 18-560
	Masse volumique	NFP 18-554
	Coefficient de Los Angles	NFP 18-573
Ciment	Masse volumique	NFP 18-558

III.4.2.2 Essai sur le béton durci :

III.4.2.2.1 Résistance à la compression :

a)- Par écrasement:

Les essais de résistance à la compression (R_c) par écrasement ont été effectué sur des éprouvettes cubique 10x10x10 cm conformément à la norme NFP 18-406. La résistance à la compression est calculée à partir de la moyenne de 3 essais réalisés sur des éprouvettes identiques (même composition, mise en œuvre et condition de conservation en air ou à l'eau). L'écrasement des éprouvette est fait sur une presse hydraulique de force 1300 KN et répendant aux normes NFP 18-411, NFP 18-412

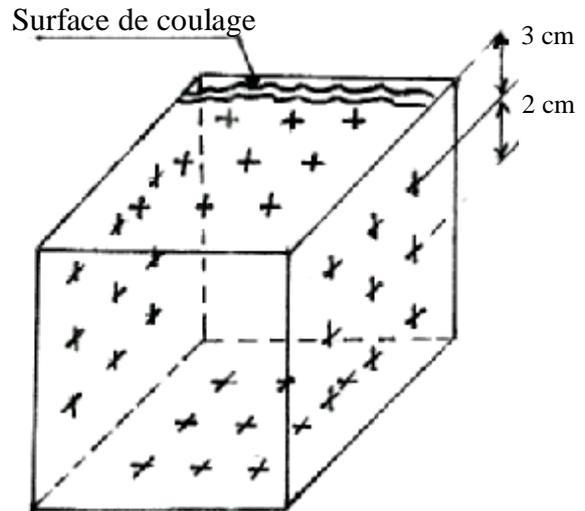
La résistance à la compression R_c sera calculée par la formule suivante

$$R_c = \frac{P_{\max}}{S}$$

b) Par la méthode combinée (la vitesse du son et scléromètre) :

- Scléromètre à béton :

On a fait une série de **6 points de mesures** sur chaque zone d'essai. La distance entre deux mesures est de **2 cm** au moins, et aucune mesure n'est effectuée à moins de **3 cm** des bords de la surface testée. On fait ensuite la moyenne de ces **6 mesures**. Les valeurs qui correspondent à des anomalies doivent être éliminées.



Figure(III.5):Points de mesures scléromètre

Remarque:

- L'angle d'inclinaison de l'appareil par rapport à l'horizontal = 0° .
- Les zones d'essai sont la face de coulage et la face opposée qui nous donne les indices sclérométriques verticaux (R_v) puis les deux faces de cotées qui nous donne les indices sclérométriques horizontaux (R_h)

La vitesse du son :

Les mesures sont en transparence **3 points de mesures** sur chaque zone d'essai. On a fait les mesures entre la face de coulé et la face opposée (V_h). Puis entre deux faces de cotées (V_v).

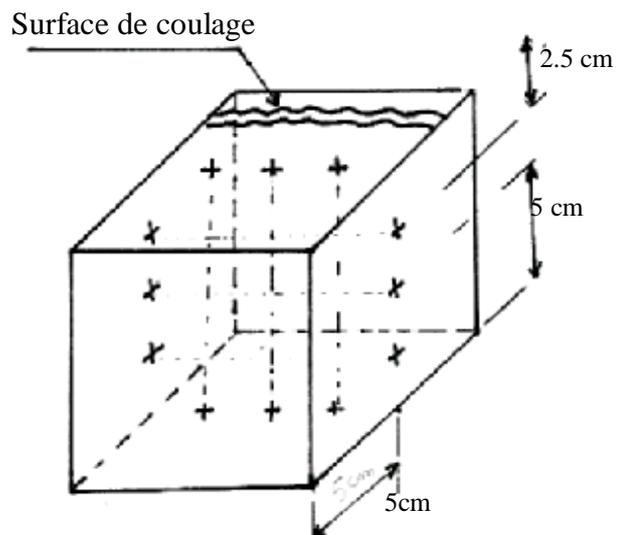


Figure (III.6): Points de mesures ultrason

III.5 Présentation de travail in situ :

Fabrication d'une dalle en béton de fibres avec $E/C = 0.45$ et 0.5% de fibres, carrée de (60x60) cm avec une épaisseur de 10 cm (voir figure III.7) fabriquée en chantier. Puis à l'aide d'une carotteuse on extrait deux carottes qui ont les dimensions suivantes : 10 cm de diamètre et une hauteur de 10 cm, d'autre côté et avec la même formule de béton en remplit six moules de dimensions 10 x 10 cm

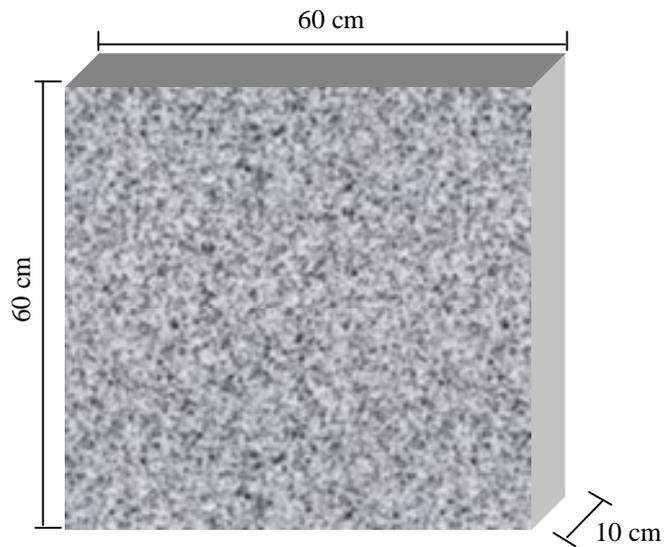


Figure (III.7) : dimension de la dalle à carotter

III.6 Conclusion:

La présentation des caractéristiques des matériaux utilisés, la composition des mélanges et les procédures de mesure va ne permettre de mieux analyser les résultats et faciliter la compréhension de l'influence de différents paramètres étudiés dans notre mémoire.

CHAPITRE IV: RESULTATS ET ANALYSES

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons les résultats obtenus pour la résistance à la compression, l'indice sclérométrique et la vitesse du son.

Ainsi qu'une analyse qui nous permette d'établir une corrélation entre la résistance à la compression et l'indice sclérométrique, et entre la résistance à la compression, et la vitesse du son.

Et enfin obtenir une formule générale représentant la résistance à la compression du béton de fibres en employant la méthode combinée d'essai de vitesse de propagation de son et l'indice sclérométrique.

IV.2 Résistance et masse volumique :

Les valeurs de la résistance à la compression et les masses volumiques des différents cubes de béton suivant l'âge et les conditions de conservation sont reportés aux tableaux (IV.1), (IV.2), (IV.3), et (IV.4).

Ces tableaux sont directement suivis des figures (IV.1), (IV.2), (IV.3), (IV.4) et (IV.5) montrant la résistance à la compression en fonction de l'âge de chaque type de béton en prenant en considération les deux conditions de conservation.

Tableau (IV.1) : Résistance à la compression et masse volumique du béton témoin M_T

E/C	Âge (jours)	Condition de conservation	Masse volumique (kg/m^3)		Résistance (N/mm^2)	
			Moy	S	Moy	S
0.45	7	Eau	2431.66	22.54	24.33	3.05
	14		2456.33	14.46	30.66	0.81
	28		2474.50	62.50	42.83	2.56
	60		2482.33	12.50	45.00	3.00
	7	Air	2375.33	44.09	22.53	1.60
	14		2394.33	17.13	23.83	4.07
	28		2356.00	07.00	32.00	2.00
	60		2387.00	07.03	35.33	5.50
0.55	7	Eau	2235.66	23.79	19.36	0.70
	14		2408.33	25.65	21.00	2.00
	28		2456.66	20.78	26.50	1.08
	60		2525.00	20.61	32.25	2.75
	7	Air	2141.00	52.37	15.90	0.85
	14		2333.33	15.27	18.43	3.29
	28		2431.33	45.55	26.66	1.92
	60		2405.00	21.00	28.25	1.25
0.65	7	Eau	2402.67	06.43	16.55	0.55
	14		2416.33	12.50	18.53	1.35
	28		2425.66	33.66	19.00	5.19
	60		2431.67	36.17	23.67	3.21
	7	Air	2332.67	10.41	13.00	1.05
	14		2335.00	05.00	14.43	2.32
	28		2373.33	05.54	15.36	1.52
	60		2388.33	07.64	20.00	0.57

Tableau (IV.2) : Résistance à la compression et masse volumique du béton avec 0.5 % de fibres $M_{0.5}$

E/C	Âge (jours)	Condition De conservation	Masse volumique (kg/m^3)		Résistance (N/mm^2)	
			Moy	S	Moy	S
0.45	7	Eau	2429.33	40.07	24.50	2.29
	14		2445.00	22.91	32.03	1.25
	28		2528.66	24.19	43.33	6.65
	60		2512.66	11.02	45.50	8.76
	7	Air	2354.55	23.55	22.00	3.00
	14		2373.00	26.62	29.85	2.34
	28		2361.67	30.02	33.33	4.01
	60		2397.00	22.65	41.00	3.00
0.55	7	Eau	2401.67	22.73	30.00	5.15
	14		2416.00	14.73	36.00	4.58
	28		2425.33	28.54	37.33	4.72
	60		2454.00	10.54	38.33	3.05
	7	Air	2328.33	05.51	23.00	5.16
	14		2387.00	32.19	26.53	2.59
	28		2356.33	15.04	32.00	0.00
	60		2371.00	02.33	33.16	3.88
0.65	7	Eau	2442.50	12.50	14.00	1.73
	14		2564.50	32.50	16.46	1.67
	28		2568.00	12.00	18.25	1.44
	60		2456.50	28.50	23.66	4.41
	7	Air	2187.50	01.50	10.33	0.57
	14		2242.00	12.00	11.66	1.10
	28		2244.75	04.25	14.66	1.52
	60		2382.50	16.50	20.66	1.15

Tableau (IV.3) : Résistance à la compression et masse volumique du béton de fibres avec 1% de fibres M₁

E/C	Âge (jours)	Condition De conservation	Masse spécifique (kg/m ³)		Résistance (N/mm ²)	
			Moy	S	Moy	S
0.45	7	Eau	2388.67	28.01	22.83	5.25
	14		2399.00	33.05	24.66	0.90
	28		2475.33	04.16	34.66	0.57
	60		2476.67	25.17	44.00	1.35
	7	Air	2231.33	05.03	22.33	2.20
	14		2268.67	41.40	23.83	3.23
	28		2350.00	19.06	26.16	2.75
	60		2390.66	12.33	32.63	6.33
0.55	7	Eau	2319.33	07.37	13.80	0.72
	14		2338.33	16.07	14.71	1.44
	28		2371.67	48.05	16.03	1.00
	60		2378.67	05.13	22.33	2.51
	7	Air	2233.33	05.77	10.03	0.95
	14		2244.83	04.25	12.08	2.12
	28		2297.33	33.42	14.66	3.79
	60		2318.33	07.64	16.56	1.52
0.65	7	Eau	2300.00	03.87	12.75	0.09
	14		2282.33	02.00	13.26	3.23
	28		2254.67	10.05	14.76	2.06
	60		2326.66	20.81	19.66	2.53
		Air	2191.00	04.69	11.05	0.58
			2257.50	14.50	12.26	0.07
			2218.67	07.00	14.00	2.00
			2260.33	10.00	15.33	1.15

Tableau (IV.4) : Résistance à la compression et masse volumique du béton avec 1.5% de fibres M_{1,5}

E/C	Âge (jours)	Condition De conservation	Masse spécifique (kg/m ³)		Résistance (N/mm ²)	
			Moy	S	Moy	S
0.45	7	Eau	2309.00	08.16	18.50	1.26
	14		2329.67	25.93	21.83	2.89
	28		2367.33	32.13	32.83	2.30
	60		2400.00	10.45	34.06	1.50
	7	Air	2238.67	5.250	16.50	2.55
	14		2255.55	10.40	18.06	5.25
	28		2292.67	32.52	21.33	1.25
	60		2330.55	14.01	22.50	1.32
0.55	7	Eau	2243.33	40.41	12.66	2.08
	14		2288.33	12.58	14.00	0.57
	28		2375.00	09.54	16.66	2.94
	60		2383.33	28.87	21.66	6.81
	7	Air	2270.00	20.00	10.30	0.60
	14		2323.33	15.28	13.66	0.57
	28		2326.67	25.17	14.33	0.57
	60		2341.67	15.17	14.66	2.08
0.65	7	Eau	2330.00	10.00	14.41	1.66
	14		2331,33	05,13	15.33	3.51
	28		2344.33	29.77	15.70	0.60
	60		2363.33	28.87	21.00	2.64
	7	Air	2226.67	25.17	12.50	2.78
	14		2266.00	01.00	13.00	2.00
	28		2296.00	01.00	13.85	1.46
	60		2321.67	18.93	14.66	0.41

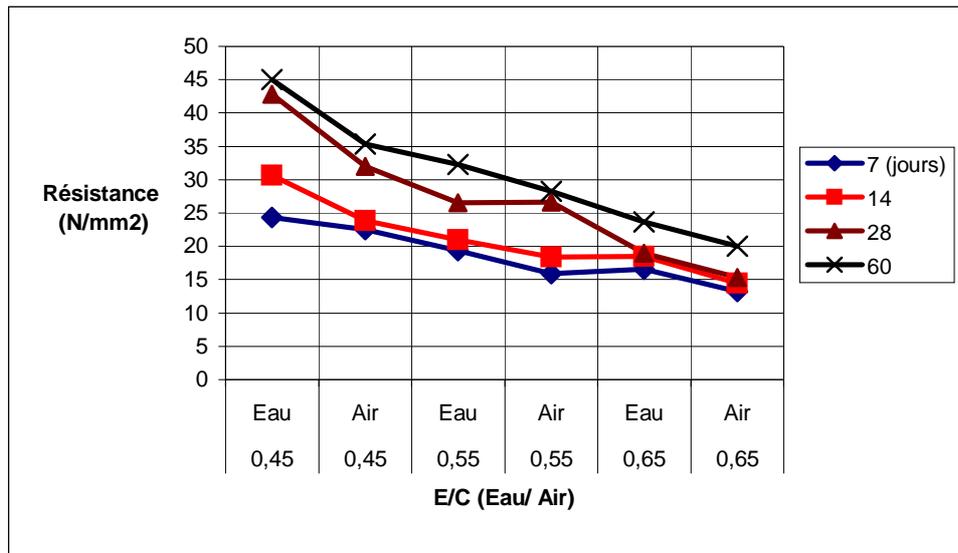


Figure IV.1: Résistance à la compression du béton témoin M_T en fonction de l'âge.

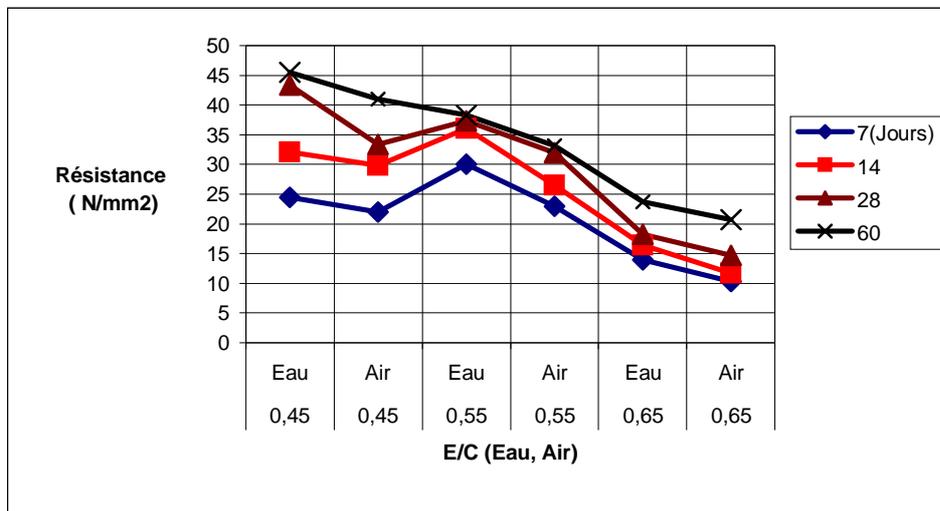


Figure IV.2: Résistance à la compression du béton du fibres $M_{0,5}$ en fonction de l'âge.

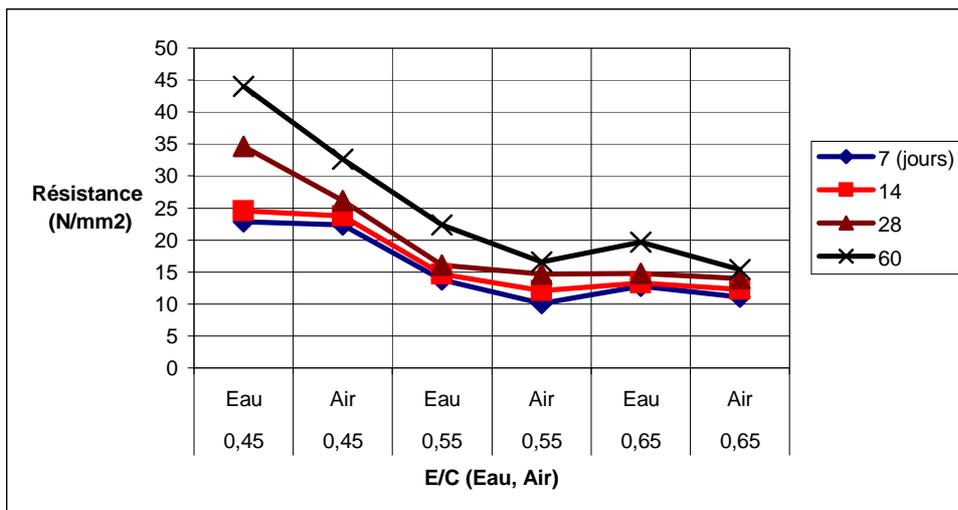


Figure IV.3: Résistance à la compression du béton de fibres M_1 en fonction de l'âge .

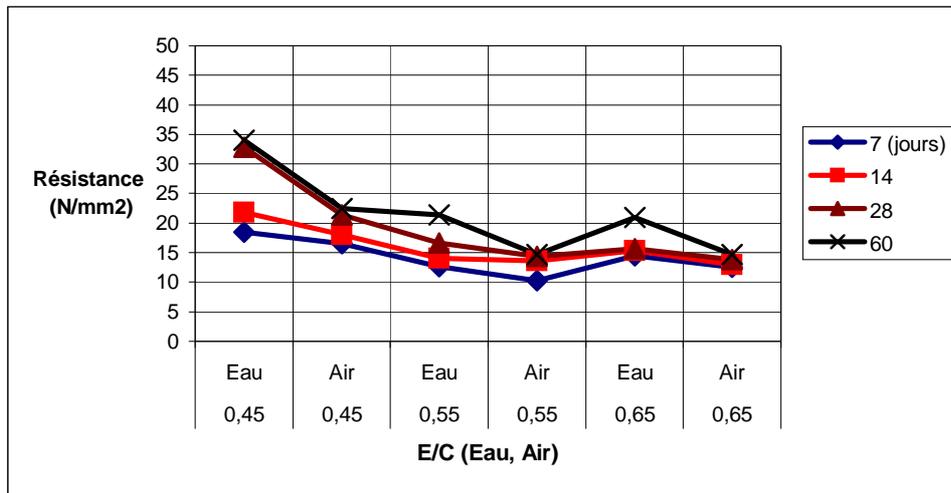


Figure (IV.4): Résistance à la compression du béton de fibres $M_{1,5}$ en fonction de l'âge.

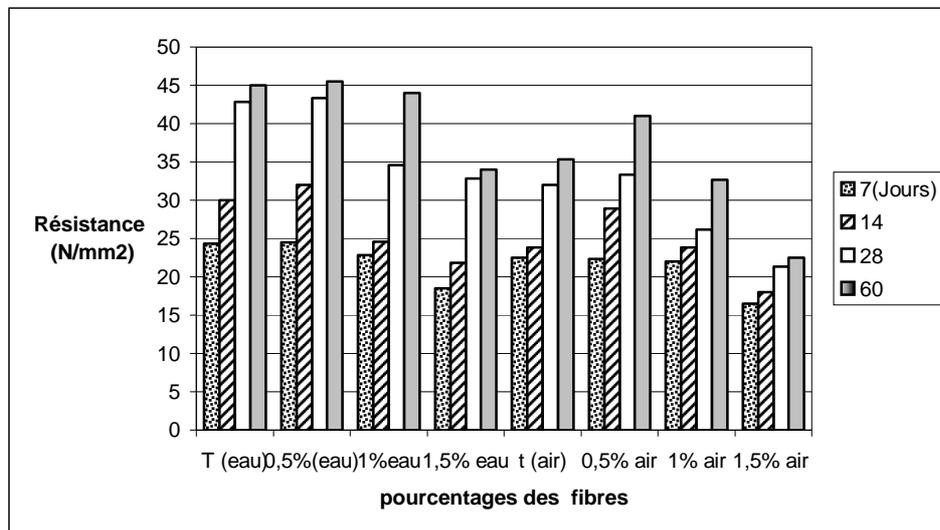


Figure (IV.5) : Influence de Pourcentage des fibres sur la résistance à la compression en fonction de l'âge dans les deux conservation (l'air et l'eau) pour $E/C = 0.45$

Commentaires :

D'après les résultats obtenus et les figures , nous constatons que :

- La variation de la résistance à la compression entre les deux condition de conservation (dans l'eau et dans l'air), est considérable pour tous les bétons quelque soit le pourcentage de fibres (0%,0.5%,1%,1.5%). Ceci est montré par des courbes parallèles (ont presque la même allure) pour les deux conditions de conservations dans l'eau et à l'air libre, la résistance à la compression diminue avec l'accroissement du rapport E/C dans les deux conservation et les deux types de bétons (témoins et de fibres)
- La figure (IV.5) nous montre que :
 - il y'a une certaine amélioration de la résistance R_c dans le cas ou le pourcentage de fibres est 0.5% et ça quelque soit le E/C .
 - L'augmentation du pourcentage des fibres diminue la résistance R_c .

IV.3 La vitesse du son :

On a pris des mesures de vitesse de son dans deux positions verticale et horizontale V_v et V_h a cause de différentes positions de mesure dans la pratique selon l'élément à tester poteau, poutre éprouvette, ou dalle...

Les valeurs de la vitesse du son des différents cubes de béton suivant l'âge et les conditions de conservations et la position de mesure, sont reporté aux tableaux (IV.5), (IV.6), (IV.7), (IV.8), (IV.9) puis elles seront présenter sur les figures (IV.6), (IV.7), (IV.8), (IV.9), (IV.10), (IV.11), (IV.12), (IV.13) montrent la vitesse du son en fonction de l'âge de chaque type de béton en prenant en considération les deux conditions de conservation dans les deux positions de mesures.

Pour mieux présenter les résultats de la vitesse de son la figure (IV.14) représente l'influence du pourcentage de fibres (0%,0.5%,1% et 1.5%) sur la vitesse de son en fonction de l'âge dans les deux conditions de conservation pour $E/C=0.45$ ainsi que la figure (IV.15) monteront la vitesse du son d'un échantillon du béton avec 0.5% de fibres pour ($E/C=0.45$) en fonction de la position, l'âge et les conditions de conservation du béton.

N.B : V_v : la vitesse du son entre la face de coulage et la face opposée (mesure verticale).

V_h : la vitesse du son entre les faces de cotés (mesure horizontale).

Tableau (IV.5): la vitesse du son d'un échantillon du béton $M_T(E/C=0.45)$ en fonction de la position, l'âge et les conditions de conservation du béton.

Conservation dans l'eau	La vitesse du son (Km/s)				Conservation à l'air	la vitesse du son (Km/s)			
	Position	V_v	Position	V_h		Position	V_v	position	V_h
7 jours	Haut	3.91	Haut	3.95	7 jours	Haut	3.85	Haut	3.90
	Milieu	3.90	Milieu	3.95		Milieu	3.90	Milieu	3.95
	Bas	4.00	Bas	4.10		Bas	3.97	Bas	4.01
14 jours	Haut	4.17	Haut	4.41	14 jours	Haut	4.03	Haut	4.15
	Milieu	4.29	Milieu	4.34		Milieu	4.02	Milieu	4.29
	Bas	4.22	Bas	4.33		Bas	3.91	Bas	4.27
28 jours	Haut	4.35	Haut	4.41	28 jours	Haut	4.12	Haut	4.29
	Milieu	4.33	Milieu	4.44		Milieu	4.24	Milieu	4.24
	Bas	4.35	Bas	4.48		Bas	4.27	Bas	4.20
60 jours	Haut	4.48	Haut	4.55	60 jours	Haut	4.17	Haut	4.33
	Milieu	4.44	Milieu	4.51		Milieu	4.31	Milieu	4.27
	Bas	4.53	Bas	4.57		Bas	4.33	Bas	4.31

Tableau (IV.6): la vitesse du son du béton Témoin M_T

E/C	Âge (jours)	Condition de conservation	la vitesse du son V _v (Km/s)		la vitesse du son V _h (Km/s)	
			V _v Moy	S	V _h moy	S
0.45	7	Eau	3.937	0.055	4.000	0.087
	14		4.277	0.060	4.343	0.012
	28		4.343	0.012	4.423	0.067
	60		4.483	0.045	4.543	0.031
	7	Air	3.907	0.060	3.953	0.055
	14		3.987	0.067	4.237	0.076
	28		4.210	0.079	4.243	0.045
	60		4.270	0.087	4.303	0.031
0.55	7	Eau	4.133	0.035	4.080	0.053
	14		4.150	0.044	4.267	0.025
	28		4.280	0.026	4.343	0.031
	60		4.410	0.022	4.380	0.044
	7	Air	3.813	0.091	3.997	0.121
	14		4.013	0.046	4.117	0.035
	28		4.103	0.067	4.127	0.050
	60		4.265	0.055	4.280	0.026
0.65	7	Eau	3.577	0.103	3.758	0.033
	14		3.787	0.055	3.808	0.098
	28		4.087	0.161	4.008	0.151
	60		4.263	0.137	4.279	0.292
	7	Air	3.477	0.055	3.563	0.081
	14		3.521	0.075	3.685	0.065
	28		3.737	0.221	3.828	0.044
	60		3.850	0.147	3.860	0.099

Tableau (IV.7): la vitesse du son du béton avec 0.5% de fibres M_{0,5}

E/C	Âge (jours)	Condition de conservation	la vitesse du son V _v (Km/s)		La vitesse du son V _h (Km/s)	
			V _v Moy	S	V _h moy	S
0.45	7	Eau	4.017	0.133	4.117	0.060
	14		4.223	0.190	4.221	0.066
	28		4.390	0.072	4.470	0.052
	60		4.530	0.064	4.667	0.020
	7	Air	3.930	0.046	3.987	0.040
	14		4.001	0.050	4.070	0.035
	28		4.153	0.076	4.243	0.025
	60		4.360	0.036	4.370	0.053
0.55	7	Eau	4.233	0.064	4.220	0.081
	14		4.343	0.088	4.345	0.055
	28		4.363	0.064	4.366	0.032
	60		4.382	0.055	4.380	0.066
	7	Air	3.985	0.055	4.043	0.040
	14		4.160	0.017	4.170	0.035
	28		4.267	0.025	4.224	0.022
	60		4.299	0.183	4.301	0.047
0.65	7	Eau	3.827	0.031	3.820	0.120
	14		3.847	0.015	3.850	0.017
	28		4.050	0.020	4.057	0.012
	60		4.100	0.044	4.103	0.04
	7	Air	3.750	0.118	3.707	0.205
	14		3.817	0.051	3.800	0.067
	28		3.833	0.067	3.850	0.060
	60		3.860	0.035	3.880	0.055

Tableau (IV.8): la vitesse du son du béton avec 1% de fibres M₁

E/C	Âge (jours)	Condition de conservation	la vitesse du son V _v (Km/s)		la vitesse du son V _h (Km/s)	
			V _v Moy	S	V _h moy	S
0.45	7	Eau	4.073	0.110	4.140	0.104
	14		4.117	0.015	4.143	0.032
	28		4.350	0.053	4.377	0.012
	60		4.460	0.078	4.467	0.067
	7	Air	3.917	0.031	3.919	0.035
	14		3.947	0.035	3.953	0.038
	28		4.110	0.026	4.130	0.000
	60		4.213	0.074	4.257	0.015
0.55	7	Eau	3.950	0.035	3.907	0.093
	14		3.977	0.153	3.980	0.173
	28		4.090	0.113	4.110	0.100
	60		4.117	0.110	4.123	0.112
	7	Air	3.680	0.062	3.720	0.017
	14		3.770	0.082	3.775	0.092
	28		3.810	0.062	3.820	0.052
	60		3.910	0.018	3.920	0.010
0.65	7	Eau	3.923	0.045	3.887	0.031
	14		4.033	0.057	4.097	0.062
	28		4.060	0.029	4.080	0.087
	60		4.100	0.053	4.137	0.013
	7	Air	3.600	0.225	3.610	0.226
	14		3.833	0.075	3.843	0.077
	28		3.827	0.145	3.837	0.146
	60		3.927	0.021	3.973	0.017

Tableau (IV.9): la vitesse du son du béton avec 1.5% de fibres M_{1,5}

E/C	Âge (jours)	Condition de conservation	la vitesse du son V _v (Km/s)		la vitesse du son V _h (Km/s)	
			V _v Moy	S	V _h moy	S
0.45	7	Eau	4.007	0.032	4.010	0.026
	14		4.120	0.022	4.125	0.025
	28		4.311	0.029	4.341	0.023
	60		4.321	0.006	4.372	0.005
	7	Air	3.740	0.079	3.747	0.062
	14		3.820	0.055	3.955	0.050
	28		3.950	0.125	3.970	0.235
	60		4.040	0.025	4.067	0.035
0.55	7	Eau	3.870	0.046	3.917	0.199
	14		4.027	0.026	4.060	0.045
	28		4.073	0.088	4.098	0.055
	60		4.130	0.077	4.150	0.065
	7	Air	3.600	0.062	3.607	0.051
	14		3.750	0.021	3.760	0.012
	28		3.847	0.036	3.850	0.040
	60		3.970	0.012	3.980	0.011
0.65	7	Eau	3.813	0.047	3.837	0.012
	14		3.937	0.121	3.939	0.093
	28		3.970	0.072	3.975	0.075
	60		4.077	0.006	4.103	0.040
	7	Air	3.597	0.061	3.607	0.103
	14		3.780	0.044	3.787	0.055
	28		3.833	0.051	3.837	0.050
	60		3.920	0.036	3.950	0.033

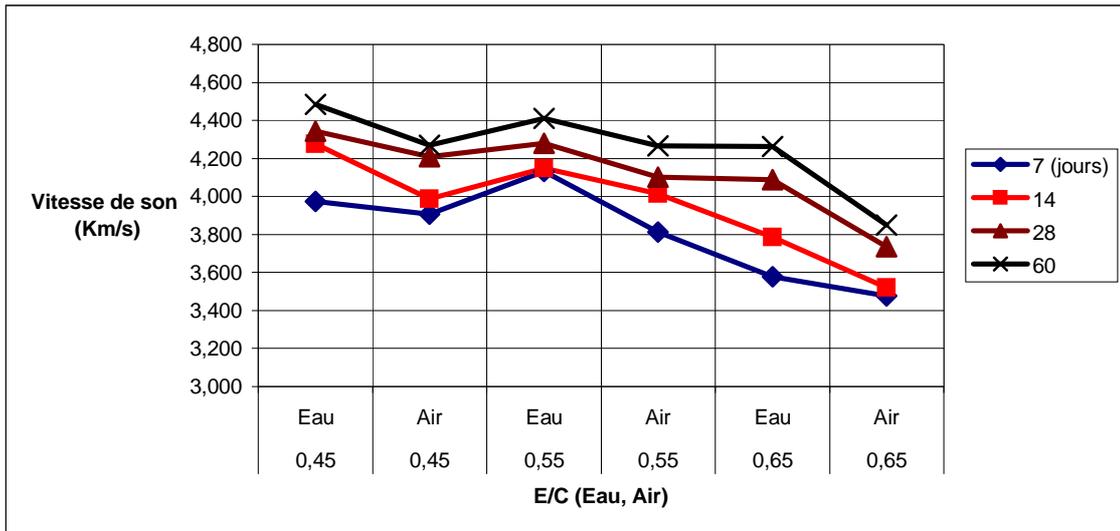


Figure (IV.6): La vitesse du son V_v du béton témoin M_T en fonction de l'âge .

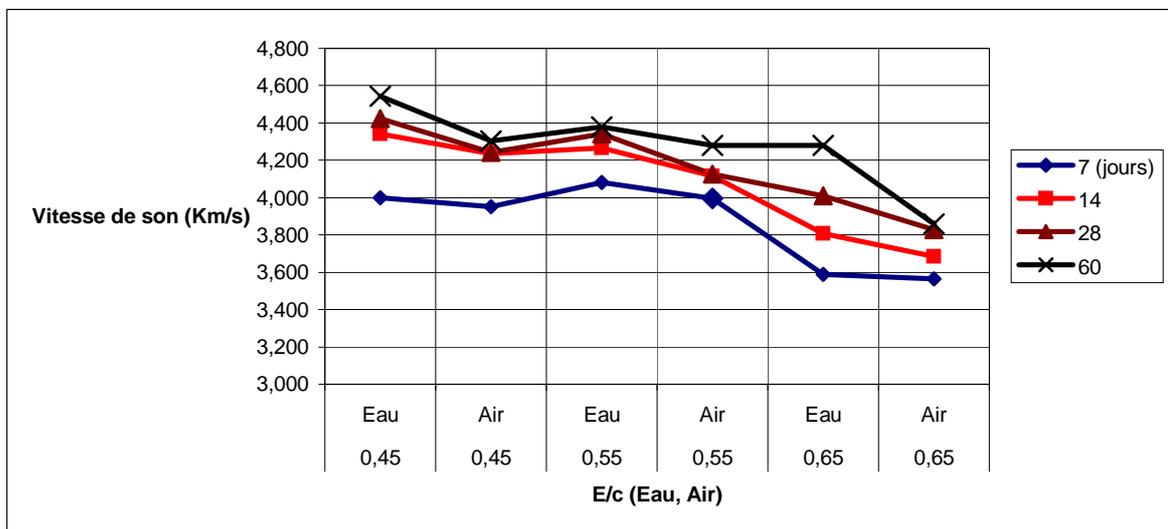


Figure (IV.7) : La vitesse du son V_h du béton témoin M_T en fonction de l'âge .

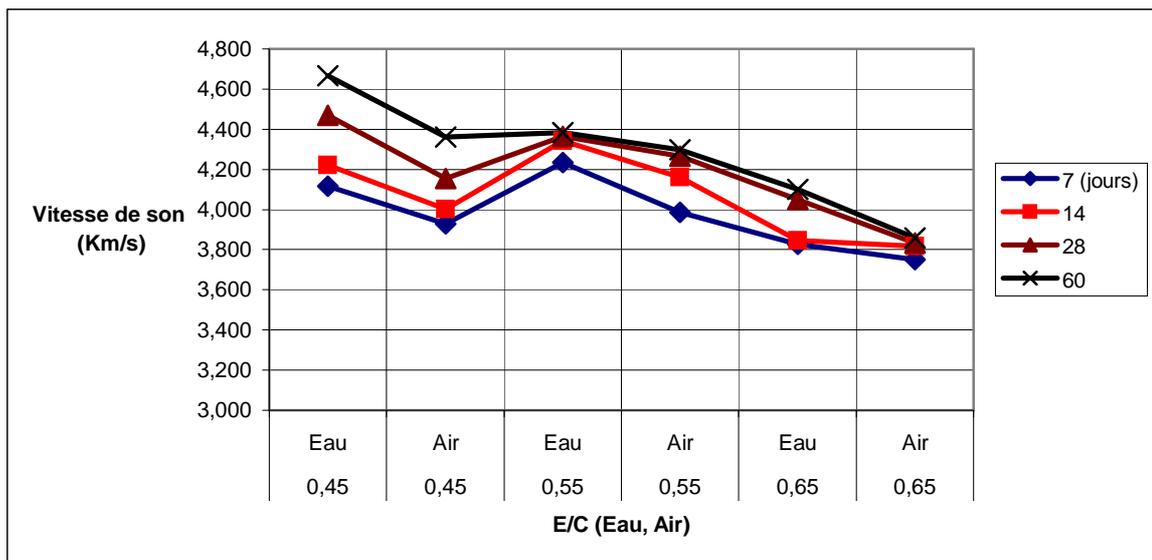


Figure (IV.8) : la vitesse du son V_v du béton de fibres $M_{0,5}$ en fonction de l'âge .

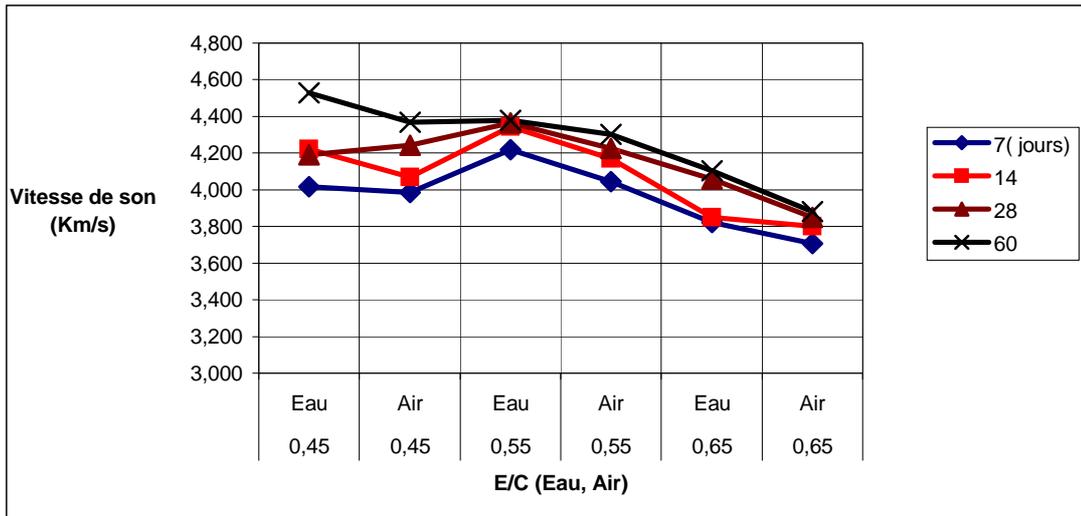


Figure (IV.9) : La vitesse du son Vh du béton de fibres M_{0,5} en fonction de l'âge .

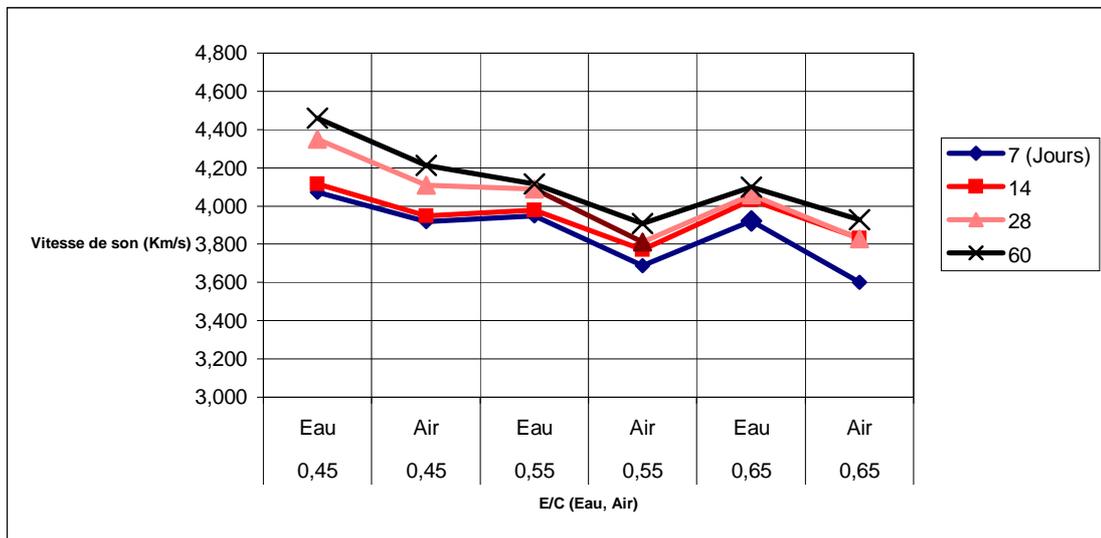


Figure (IV.10) : La vitesse du son Vv du béton de fibres M₁ en fonction de l'âge.

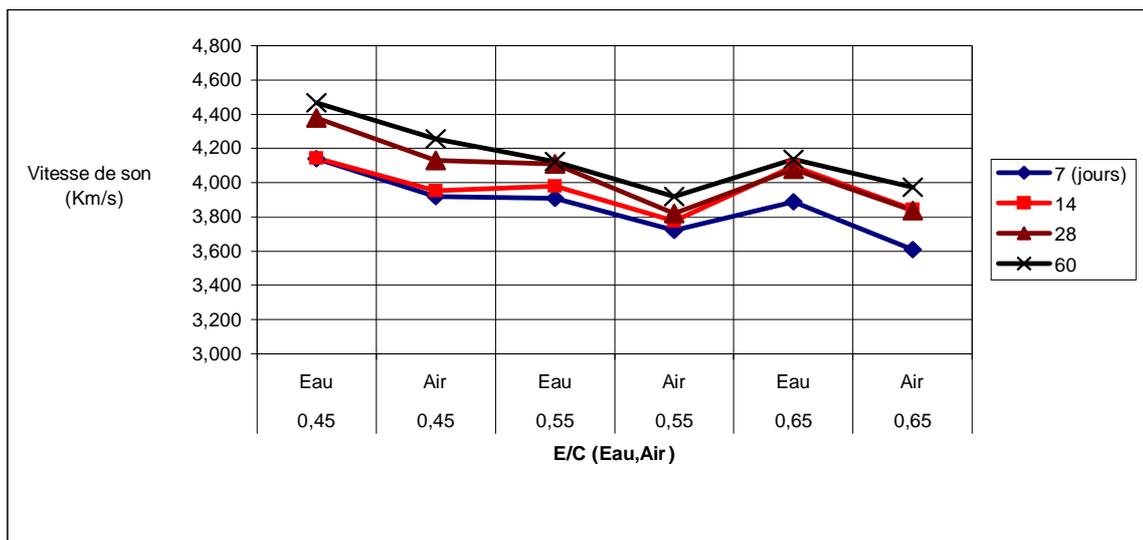


Figure (IV.11) : La vitesse du son Vh du béton de fibres M₁ en fonction de l'âge .

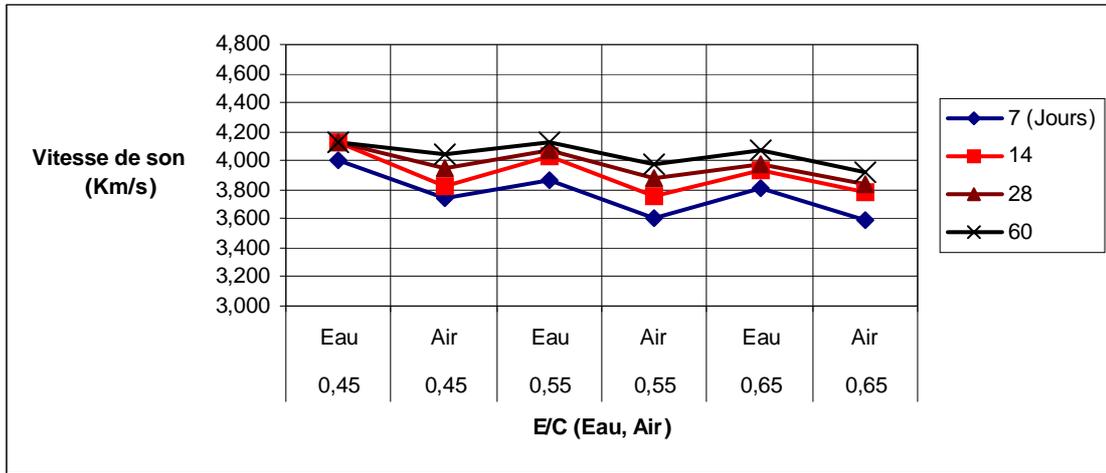


Figure (IV.12) : La vitesse du son V_h du béton de fibres $M_{1.5}$ en fonction de l'âge .

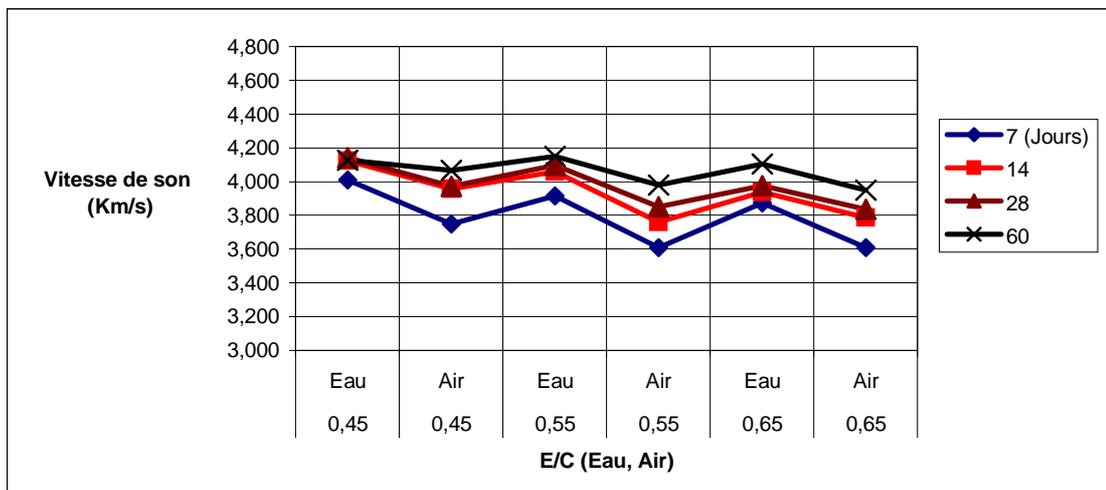
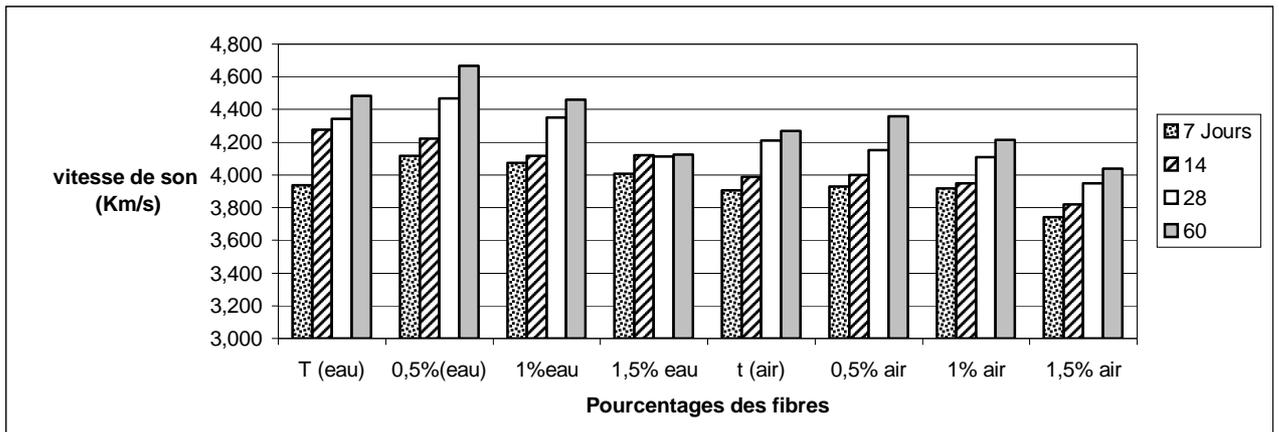
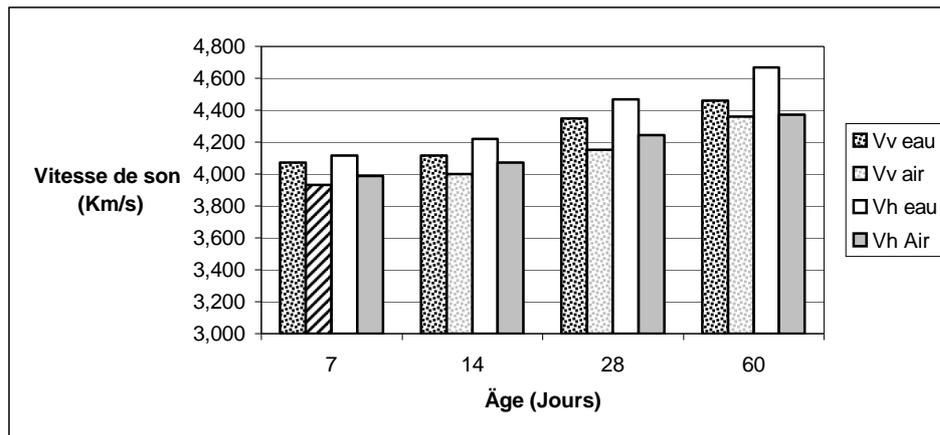


Figure (IV.13) : La vitesse du son V_v du béton de fibres $M_{1.5}$ en fonction de l'âge .



Figure(IV.14): Influence de pourcentage de fibres (0%,0,5%,1% et 1,5%) sur la vitesse de son en fonction de l'âge dans les deux condition de conservation pour $E/C=0.45$



Figure(IV.15): La vitesse du son d'un échantillon du béton avec 0.5% de fibres pour ($E/C=0.45$) en fonction de la position, l'âge et les conditions de conservation du béton.

Commentaires :

D'après les résultats obtenus, nous constatons que :

- La vitesse de son du béton augmente avec l'augmentation de l'âge du béton quelque soit le type de béton, mais diminue avec l'augmentation de la valeur du rapport eau-ciment et ainsi que le pourcentage de fibres.
- La vitesse de son du béton conservé à l'eau est plus haute que celle du béton conservé à l'air quelque soit le pourcentage de fibres (0%,0.5% ,1%,1.5%). Cette augmentation de vitesse de son est attribuée au fait que les impulsions ultrasoniques voyagent par les pores remplis par l'eau et pas tout autour des bords de pore comme elles le font dans un état sec. En conséquence le chemin de voyage diminue et la vitesse de son augmente.
- On remarque que l'introduction des fibres change le comportement des impulsions ultrasoniques et c'est ce que nous montre sur la figure (IV.14) où les valeurs de la vitesse de son pour $E/C = 0.45$ et un pourcentage de fibres 0.5% est plus grande que le béton témoin le fait que notre béton est plus ferme, plus compacté alors que le béton avec 1.5% de fibres a une vitesse de son très faible à cause des vides créés à l'intérieur de béton ce qui a causé une difficulté de mise en œuvre .
- Les vitesses du son déterminées à partir des faces de coulage et des faces opposées des cubes sont inférieures ou égales à celle déterminée entre les faces de côtés de chaque cube ayant subi une conservation dans l'eau où la conservation des cubes était à l'air libre (la figure (IV.15)). Ceci s'explique par qu'au départ la face de coulage perd une quantité d'eau plus grande que la face opposée et ne permettant pas une hydratation similaire de même ordre dans toutes les faces Mellas (2003).
- De tableau (IV.5), nous constatons qu'il y a une variation de la vitesse du son entre le haut, le milieu et le bas des différents cubes qui ont subi une conservation dans l'eau et

ceux conservés à l'air libre. Mais cette variation est négligeable et elle n'est pas constante des fois la haute supérieure que le milieu et le bas des fois le contraire. Ceci s'explique par la non homogénéité de béton dans les cubes.

Nous concluons que l'estimation de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son représente une certaine fiabilité quelque soit le type de béton et explique le la réalité du comportement de béton suivant l'âge, la position et les conditions de conservation des échantillons utilisés.

VI.4 L'indice sclérométrique :

Commencent par donner un exemple de l'indice sclérométrique d'un échantillon de béton témoin M_T pour $E/C=0.45$ en fonction de la position (de face de coulage et la face opposée (Face1 et Face2) et de face de cotés (Face3 et Face4)), l'âge et les conditions de conservation du béton, représenté dans le tableau (IV.10) .Puis présenter les valeurs de l'indice sclérométrique des différents cubes de béton suivant l'âge et les conditions de conservation et la position de mesure sur les tableaux (IV.10), (IV.11), (IV.12), (IV.13), (IV.14).

Les résultats groupés dans les tableaux et présentés sur les figures (IV.16), (IV.19), (IV.20), (IV.21) ,(IV.22),et (IV.23), montrent l'indice sclérométrique en fonction de l'âge de chaque type de béton en prenant en considération les deux conditions de conservation dans les deux positions de mesure.

Pour mieux présenter les résultats de la vitesse de son la figure (IV.24) montre l'indice sclérométrique d'un échantillon du béton avec 0.5% de fibres $M_{0,5}$ ($E/C=0.45$) en fonction de la position, l'âge et les conditions de conservation du béton. et la figure (IV.25) montre l'influence de pourcentage de fibres (**0%,0.5%,1% et 1.5%**) sur l'indice sclérométrique R_v en fonction de l'âge dans les deux conditions de conservation pour $E/C=0.45$

N.B: les deux positions de mesure sont:

R_v : l'indice sclérométrique de face de coulage et la face opposée (Face1 et Face2).

R_h : l'indice sclérométrique de face de cotées (Face3 et Face4).

Tableau (IV.10) : l'indice sclérométrique d'un échantillon du béton Témoin M_T (E/C=0.45).

Conservation dans l'eau	l'indice sclérométrique				Conservation à l'air	l'indice sclérométrique			
	Rv		Rh			Rv		Rh	
	Face 1	Face 2	Face 3	Face 4		Face 1	Face 2	Face 3	Face 4
7 jours	16.00	16.00	18.00	19.00	7 jours	14.00	16.00	16.50	17.00
	14.00	17.00	16.00	16.00		14.50	16.00	18.00	16.00
	12.00	15.00	19.00	16.50		12.00	14.50	15.00	15.00
	11.00	18.00	18.00	14.00		12.50	16.00	14.00	12.50
	13.50	20.00	15.50	18.00		16.00	18.00	16.00	20.00
	12.00	19.00	20.00	12.00		16.50	16.00	20.00	16.00
14 jours	22.00	18.00	24.00	20.00	14 jours	18.00	18.00	17.00	16.00
	19.00	22.00	20.00	22.00		16.00	18.00	16.00	17.50
	23.00	20.00	22.00	19.50		16.00	16.00	18.00	19.0
	22.50	24.00	24.00	20.00		22.00	16.50	19.00	14.00
	28.00	20.00	21.00	22.00		18.00	14.00	20.00	16.0
	22.00	22.00	22.50	24.00		16.00	18.50	14.50	14.50
28 jours	27.00	30.00	34.00	28.00	28 jours	21.00	28.00	30.00	30.00
	30.00	32.00	25.00	28.00		19.00	25.00	26.00	26.00
	28.00	31.00	35.00	32.00		18.00	26.00	29.00	28.00
	30.00	34.00	32.00	29.00		24.00	32.00	30.00	30.00
	25.00	29.00	30.00	30.00		22.00	29.00	31.00	31.00
	28.00	32.00	29.00	31.00		30.00	26.00	32.00	26.00
60 jours	36.00	39.00	38.00	39.00	60 jours	25.00	28.00	31.00	24.00
	38.00	40.00	36.00	40.00		33.00	29.00	31.00	27.00
	38.00	36.00	36.00	41.00		26.00	30.00	32.00	25.00
	34.00	39.00	38.00	38.00		32.00	35.00	33.00	33.00
	39.00	41.00	40.00	41.00		30.00	24.00	25.00	32.00
	30.00	38.00	40.00	42.00		29.00	31.00	27.00	30.00

Tableau (IV.11) : l'indice sclérométrique du béton témoin M_T

E/C	Âge (jours)	Condition de conservation	l'indice sclérométrique Rv		l'indice sclérométrique Rh	
			Moy	S	moy	S
0.45	7	Eau	17.05	2.08	17.15	2.21
	14		22.15	1.57	22.65	2.45
	28		32.00	3.36	33.00	3.29
	60		36.40	3.19	35.80	3.50
	7	Air	15.15	2.33	15.95	1.94
	14		17.95	1.86	17.75	1.96
	28		28.00	1.67	27.90	1.66
	60		33.90	3.37	34.20	3.08
0.55	7	Eau	16.50	2.21	16.55	2.14
	14		21.00	1.56	21.30	1.82
	28		25.16	2.04	25.33	2.33
	60		30.16	2.04	30.00	2.09
	7	Air	15.33	1.52	16.66	0.57
	14		20.20	1.31	21.00	1.56
	28		24.20	4.15	24.40	3.80
	60		29.20	2.00	29.02	2.74
0.65	7	Eau	18.80	1.75	18.70	1.70
	14		21.83	1.60	21.50	1.76
	28		23.83	22.22	23.50	2.66
	60		28.33	2.25	27.66	2.87
	7	Air	15.10	2.72	15.00	2.62
	14		18.05	1.34	18.25	1.47
	28		22.00	1.67	21.91	1.68
	60		28.00	2.25	26.50	1.77

Tableau (IV.12) : l'indice sclérométrique du béton avec 0.5% de fibres M_{0,5}

E/C	Âge (jours)	Condition de conservation	l'indice sclérométrique Rv		l'indice sclérométrique Rh	
			Moy	s	moy	S
0.45	7	Eau	17.50	1.08	17.75	1.87
	14		23.10	2.05	23.30	2.20
	28		31.30	1.51	34.50	2.05
	60		37.20	2.09	37.00	2.42
	7	Air	16.58	1.08	16.75	1.31
	14		18.10	2.13	18.50	2.46
	28		25.83	1.32	24.16	1.32
	60		35.83	3.7	36.00	3.00
0.55	7	Eau	21.20	3.29	21.30	3.26
	14		22.40	2.30	22.60	2.98
	28		31.70	2.71	31.90	2.64
	60		32.40	2.71	32.10	3.03
	7	Air	17.10	2.30	16.90	2.69
	14		23.60	2.63	23.90	2.84
	28		26.20	3.50	26.00	3.39
	60		31.50	3.01	32.60	2.99
0.65	7	Eau	15.20	1.73	15.80	1.21
	14		18.10	2.64	18.33	2.50
	28		21.00	1.73	20.00	1.00
	60		28.70	1.05	29.10	1.44
	7	Air	14.85	1.66	14.95	1.89
	14		17.50	2.05	17.60	2.15
	28		19.80	1.99	19.90	1.80
	60		28.10	2.28	28.50	2.12

Tableau (IV.13) : l'indice sclérométrique du béton avec 1% de fibresM₁

E/C	Âge (jours)	Condition de conservation	l'indice sclérométrique Rv		l'indice sclérométrique Rh	
			Moy	S	moy	S
			0.45	Eau	7	18.50
14	23.80	2.14			23.00	2.00
28	33.10	2.37			33.30	2.16
60	36.30	3.91			36.70	3.61
Air	7	17.2		1.99	17.40	2.36
	14	22.70		1.94	22.10	1.85
	28	28.40		3.33	28.00	3.62
	60	31.10		3.84	31.00	3.68
0.55	Eau	7	23.00	3.36	22.90	3.44
		14	24.10	3.29	24.20	3.35
		28	25.20	4.23	25.40	4.00
		60	32.20	2.20	32.30	2.11
	Air	7	20.90	3.34	20.70	3.40
		14	21.00	2.74	21.20	2.57
		28	23.50	3.86	23.70	4.16
		60	30.80	3.15	31.00	3.43
0.65	Eau	7	18.10	1.85	18.00	1.88
		14	18.90	1.66	18.80	1.75
		28	21.40	2.50	22.10	2.72
		60	30.40	3.23	31.00	2.35
	Air	7	15.20	1.93	15.60	2.06
		14	16.70	0.67	16.80	0.78
		28	20.30	1.25	20.50	1.35
		60	28.40	2.79	28.20	2.57

Tableau (IV.14) : l'indice sclérométrique du béton avec 1.5% de fibresM_{1,5}

E/C	Âge (jours)	Condition de conservation	l'indice sclérométrique Rv		l'indice sclérométrique Rh	
			Moy	S	moy	S
			0.45	Eau	7	17.20
14	21.60	2.27			22.40	2.95
28	27.30	2.16			27.60	2.50
60	33.00	2.82			33.20	2.65
Air	7	16.10		2.23	18.90	3.14
	14	19.00		2.21	20.10	1.39
	28	24.70		3.00	26.10	3.66
	60	26.50		4.42	26.70	4.24
0.55	Eau	7	20.20	1.87	20.60	2.22
		14	21.50	1.64	21.20	2.29
		28	23.50	2.91	26.10	4.45
		60	27.10	2.46	27.50	2.22
	Air	7	15.20	2.04	16.30	2.35
		14	22.50	2.17	23.30	1.76
		28	24.10	2.13	24.60	2.17
		60	25.50	1.64	25.70	1.56
0.65	Eau	7	20.80	1.75	20.00	1.85
		14	21.10	0.99	21.00	0.94
		28	24.30	3.40	23.60	2.95
		60	26.30	2.62	26.70	2.70
	Air	7	17.00	1.94	17.20	1.93
		14	19.70	1.76	19.90	1.78
		28	20.10	4.38	20.70	3.33
		60	24.22	3.54	24.95	3.18

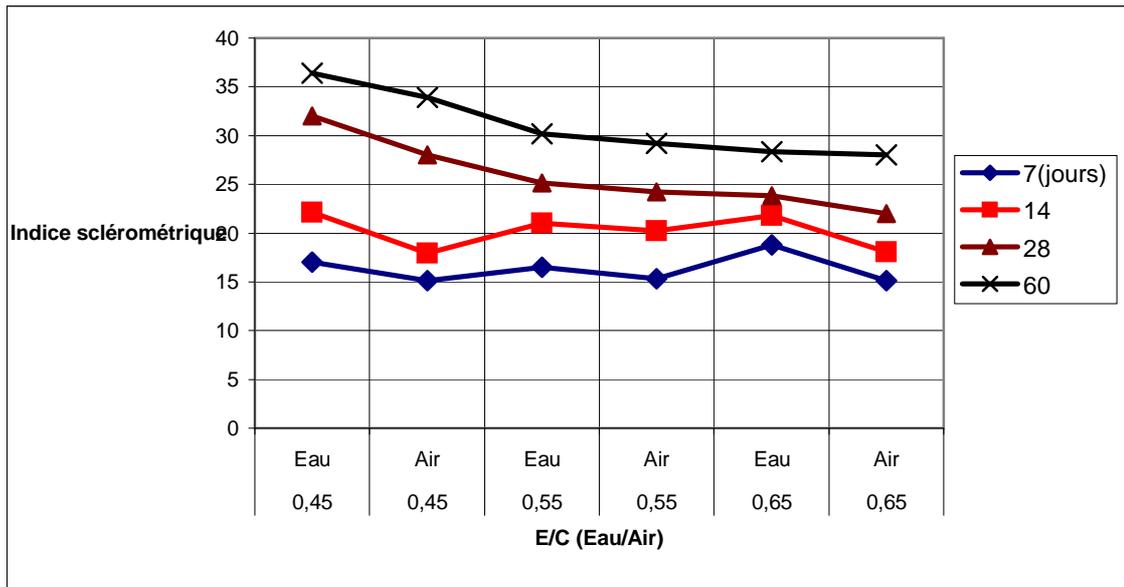


Figure (IV.16): L'indice sclérométrique Rv du béton Témoin M_T en fonction de l'âge .

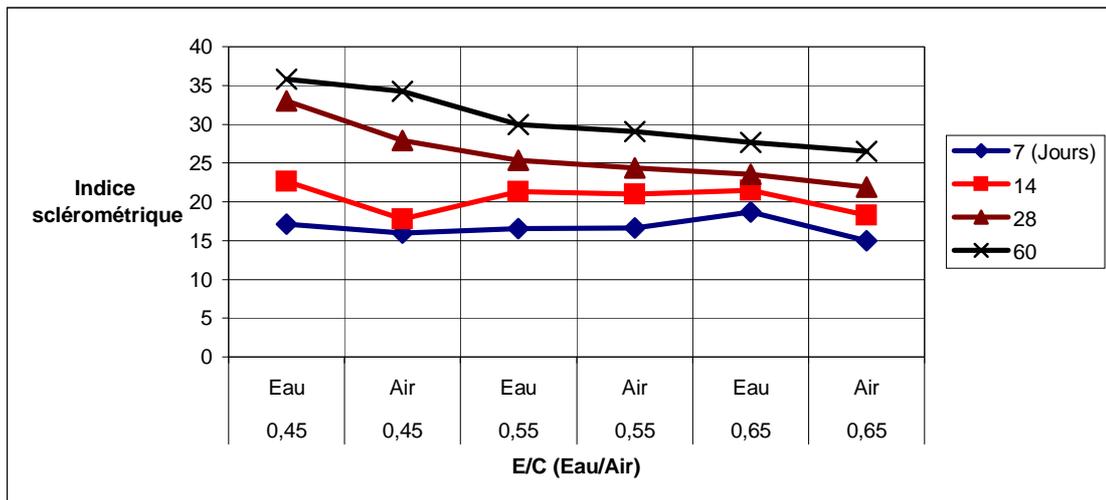


Figure (IV.17) : L'indice sclérométrique Rh du béton Témoin M_T en fonction de l'âge.

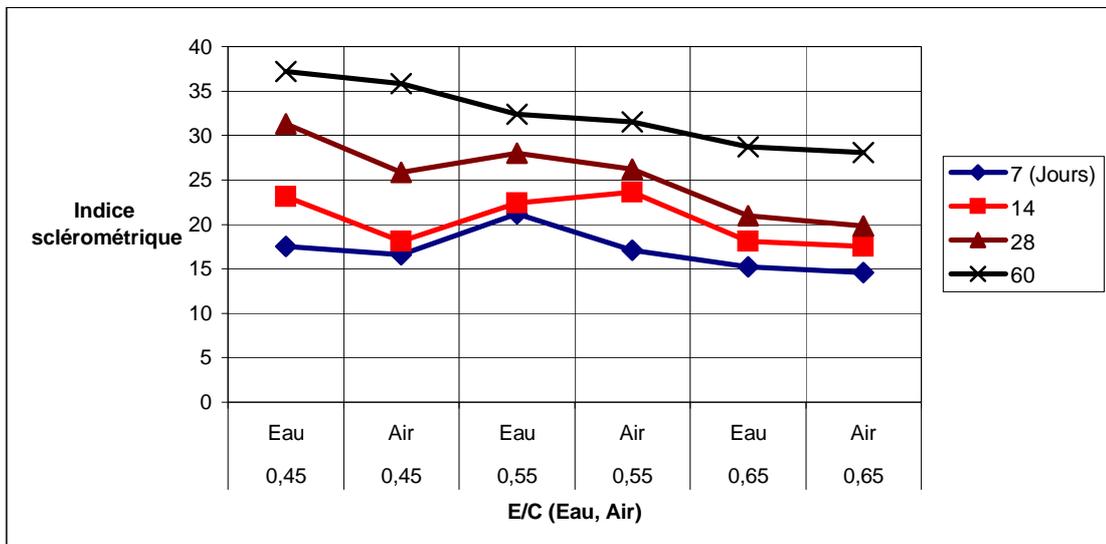


Figure (IV.18): L'indice sclérométrique Rv du béton avec 0.5% de fibres M_{0.5} en fonction de l'âge.

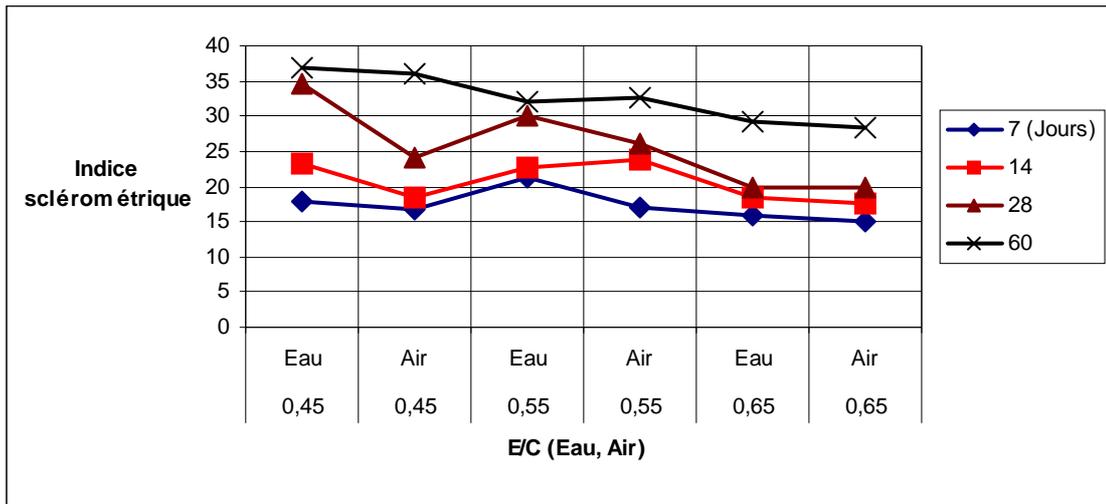


Figure (IV.19) : L'indice sclérométrique Rh du béton avec 0.5% de fibres M_{0,5} en fonction de l'âge .

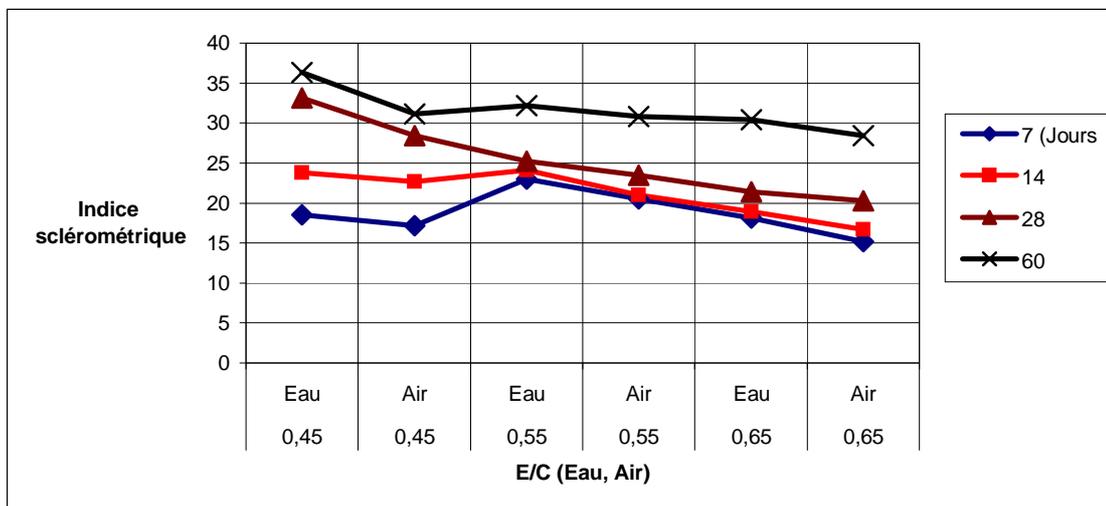


Figure (IV.20) : L'indice sclérométrique Rv du béton avec 1% de fibres M₁ en fonction de l'âge .

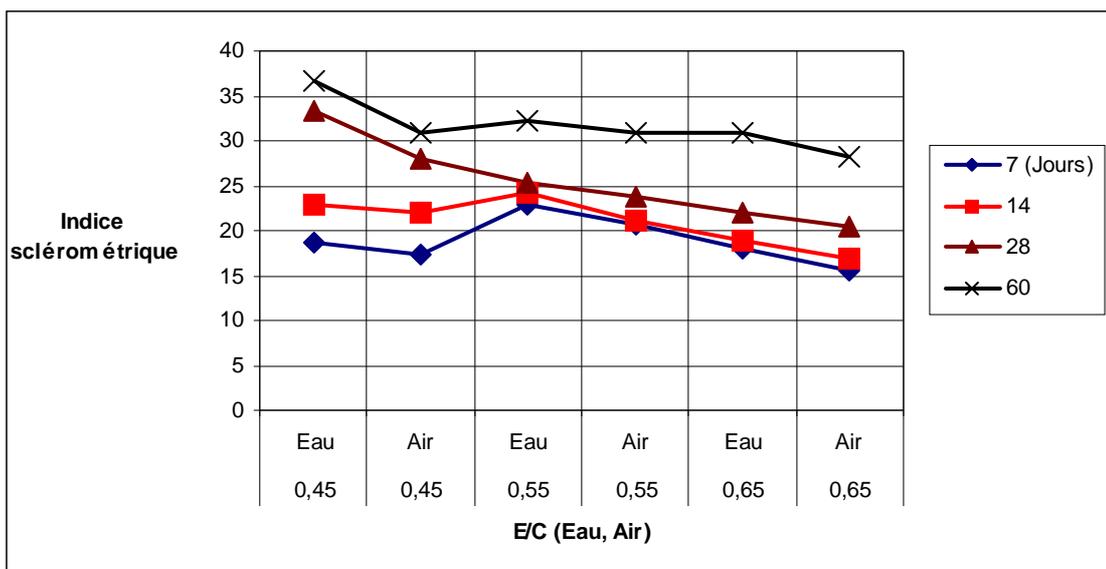


Figure (IV.21) : L'indice sclérométrique Rh du béton avec 1% de fibres M₁ en fonction de l'âge.

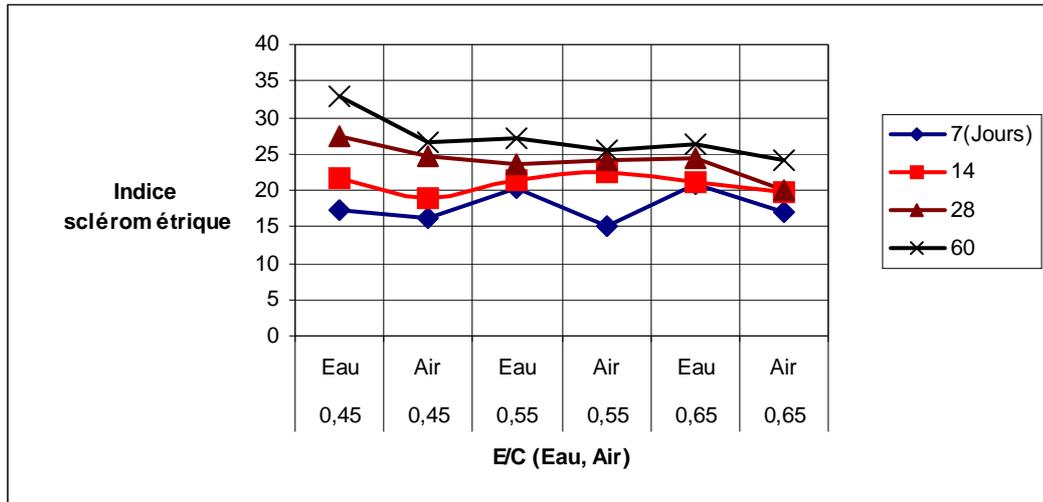


Figure (IV.22) : L'indice sclérométrique Rv de béton avec 1.5% de fibres M_{0,5} en fonction de l'âge .

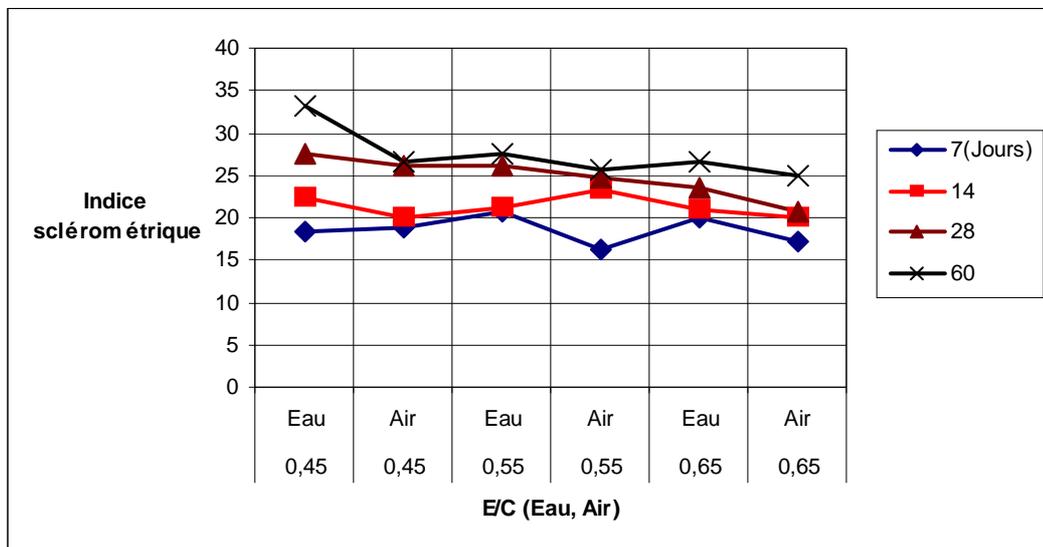
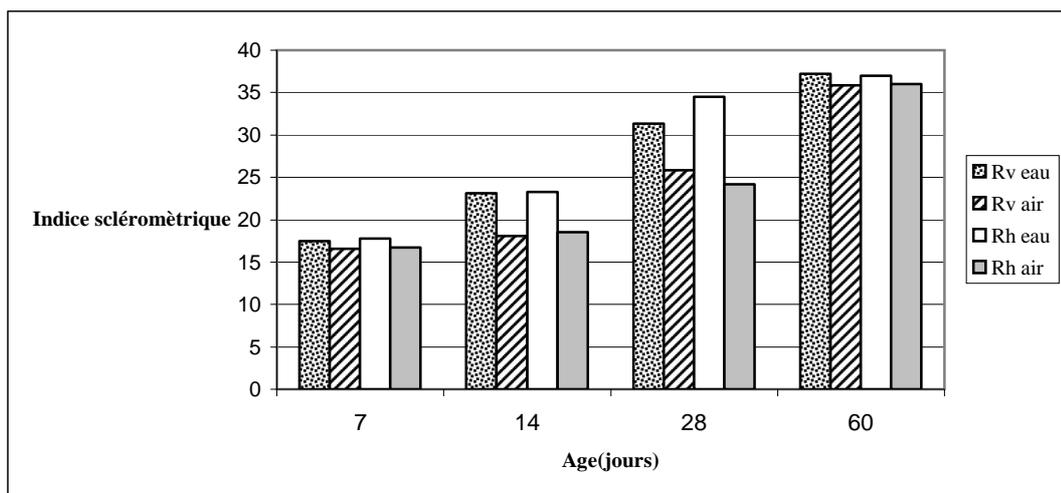


Figure (IV.23) : L'indice sclérométrique Rh du béton avec 1.5% de fibres M_{1,5} en fonction de l'âge .



Figure(IV.24) : L'indice sclérométrique d'un échantillon du béton avec 0.5% de fibres M_{0,5} (E/C=0.45) en fonction de la position, l'âge et les conditions de conservation du béton.

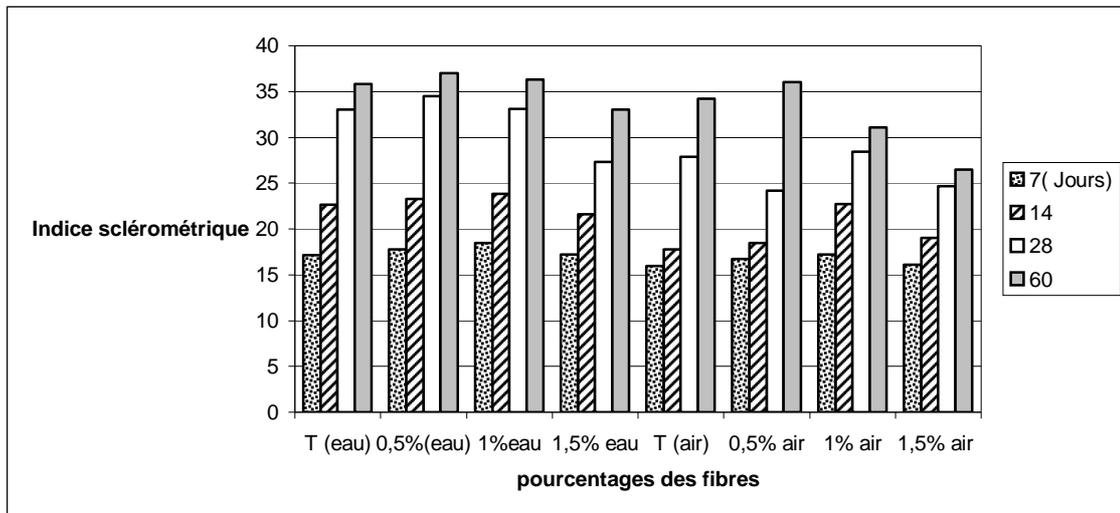


Figure (IV.25): Influence du pourcentage de fibres (0%,0.5%,1% et 1.5%) sur l'indice sclérométrique Rv en fonction de l'âge dans les deux conditions de conservation pour E/C=0.45

Commentaires :

D'après les résultats obtenus, nous constatons que

- L'indice sclérométrique augmente avec l'augmentation de l'âge du béton de fibres, mais diminue avec l'augmentation du rapport d'eau-ciment quelque soit le type de béton.
- La résistance à la compression du béton quelque le pourcentage conservé à l'eau est plus haute que celle du béton conservé à l'air à un indice sclérométrique donné.
- Nous constatons que la variation de l'indice sclérométrique entre la face de coulage et la face opposée dans chaque cube est très variable dans le cas de conservation dans l'air, contrairement à la conservation dans l'eau. Ceci s'explique par l'hydratation similaire de même ordre dans toutes les faces dans le cas de conservation dans l'eau, et le contraire dans le cas de conservation à l'air libre car la face qui sera sur la terre prendra le temps d'hydratation

Nous concluons que l'estimation de la résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique représente une certaine fiabilité du moment qu'il reflète la réalité du comportement de béton suivant l'âge, la position et les conditions de conservation des échantillons utilisés.

IV.5 Relation entre la résistance et les résultats des essais non destructifs :

IV.5.1 Relation entre la résistance et la vitesse du son :

La relation entre la résistance à la compression et la vitesse de son en fonction du temps, pour les mélanges de béton M_T , $M_{0,5}$, M_1 et $M_{1,5}$ et dans les deux directions de mesures (horizontale et verticale) pour voir l'influence de différents facteurs : conditions de conservation, rapport E/C, et le pourcentage des fibres sur les résultats des essais non destructifs.

la relation entre la résistance à la compression et la vitesse de son les courbes sont de forme exponentielle pour obtenir une meilleure précision.

Ou :

Y : représente la résistance à la compression

X : représente la vitesse de son

r : coefficient de corrélation

a)- Condition de conservation :

Les tableaux (IV.15), (IV.16), (IV.17), (IV.18) présentent les équations qui relier entre la résistance à la compression et la vitesse de son en fonction du temps. Ces équations sont présenter sur les figures (IV.26), (IV.27), (IV.28), (IV.29) montrant la relation entre la résistance à la compression et la vitesse de son en fonction du temps et les conditions de conservation, pour les mélanges de béton M_T et $M_{0,5}$, dans les deux directions de mesure (horizontale et verticale).

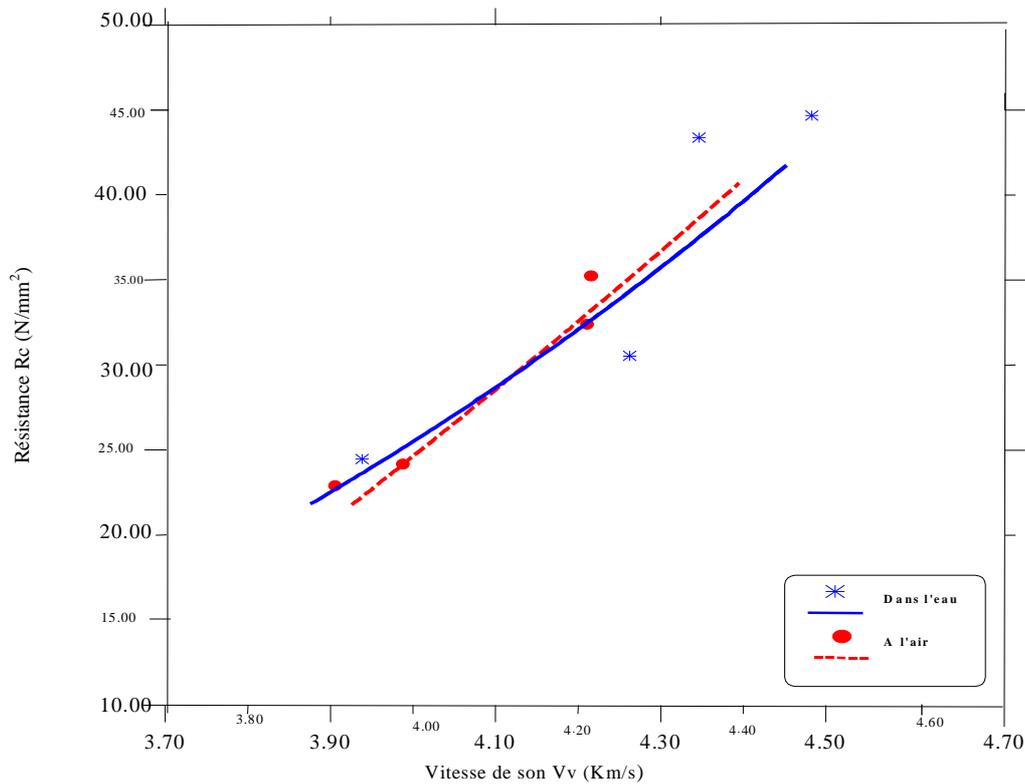


Figure (IV.26): Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son V_v du béton M_T , pour $E/C=0.45$ (Dans les deux conservation)

Tableau (IV.15) : L'équation de la résistance à la compression en fonction de la vitesse de son V_v du béton M_T , pour $E/C=0.45$ (Dans les deux conservation)

Dans l'eau		A l'air	
L'équation obtenue	r	L'équation obtenue	r
$Y = 0,24130 * \exp (1,16583 * X)$	0,911	$Y = 0,16968 * \exp (1,25797 * X)$	0,984

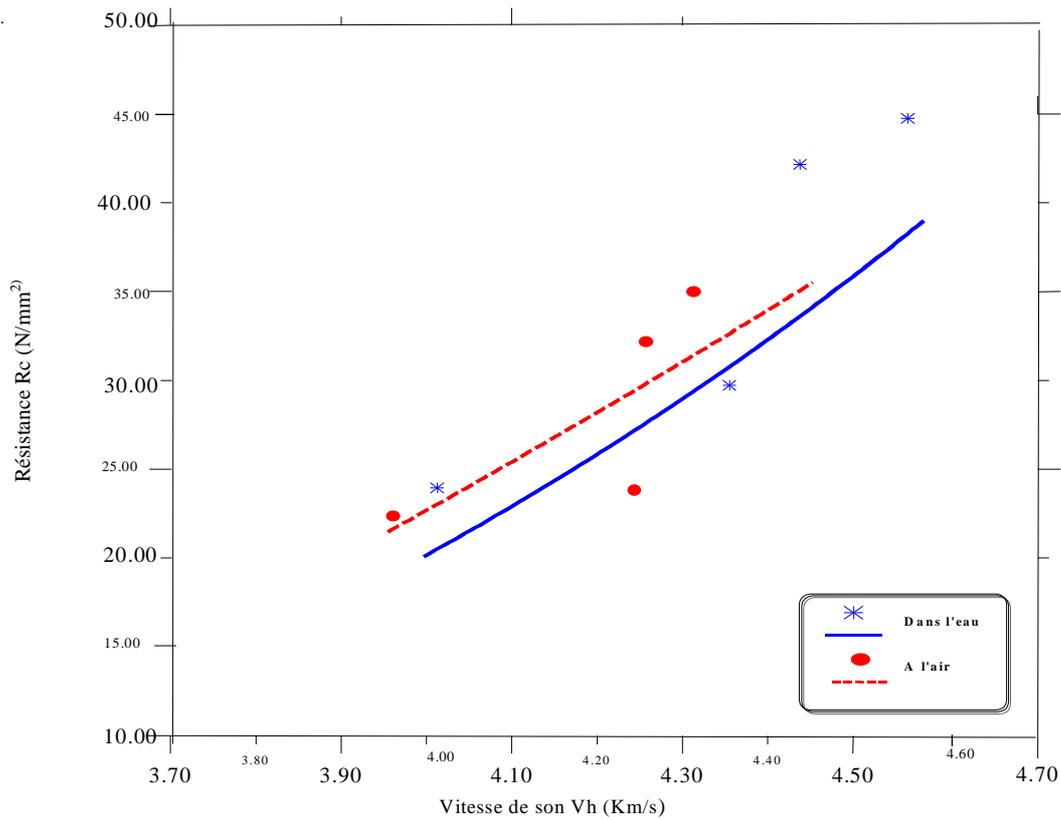


Figure (IV.27): Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vh béton M_T , pour $E/C=0.45$ (Dans les deux conservation)

Tableau (IV.16) : L'équation de la résistance à la compression en fonction de la vitesse de son Vh du béton M_T , pour $E/C=0.45$ (Dans les deux conservation)

Dans l'eau		A l'air	
L'équation obtenue	r	L'équation obtenue	r
$Y = 0,22110 * \exp(1,1679 * X)$	0,917	$Y = 0,35106 * \exp(1,0457 * X)$	0,734

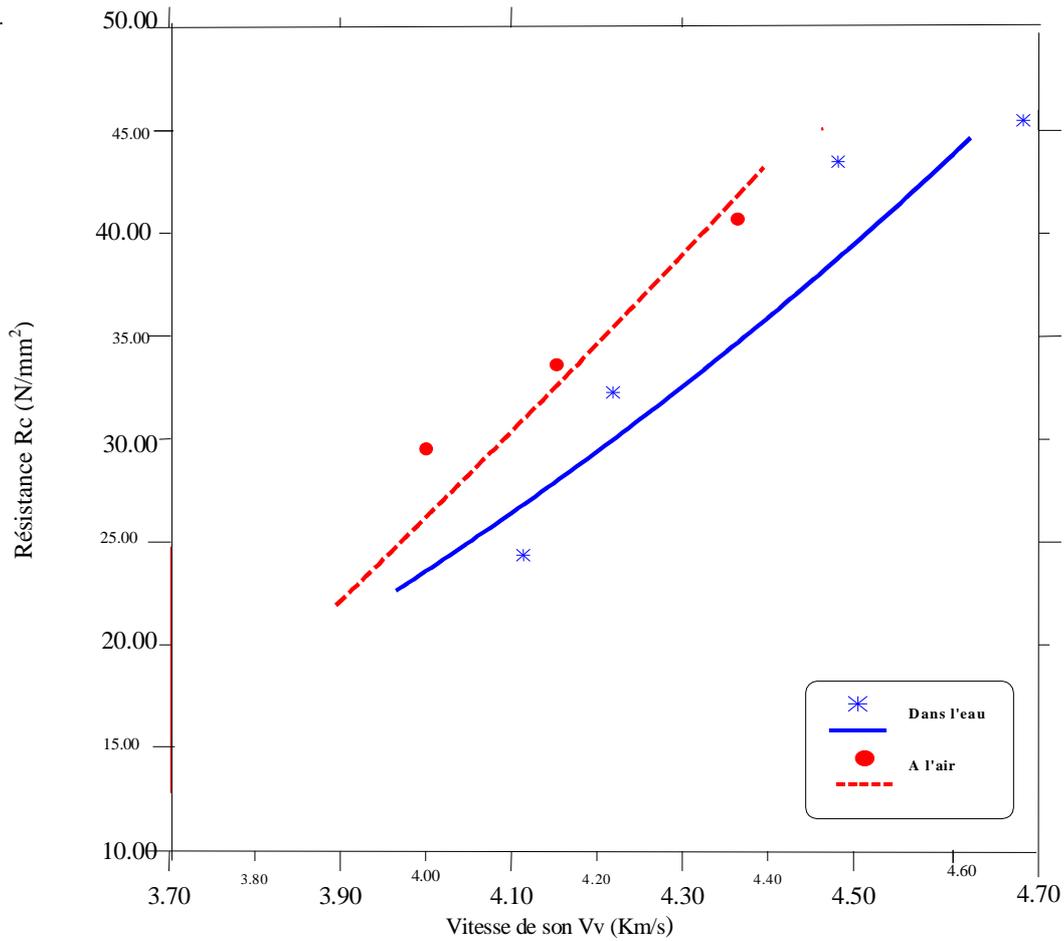


Figure (IV.28) : Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vv béton M_{0,5}, pour E/C=0.45(Dans les deux conservation)

Tableau (IV.17) : L'équation de la résistance à la compression en fonction de la vitesse de son Vv du béton M_{0,5}, pour E/C=0.45 (Dans les deux conservation)

Dans l'eau:		A l'air:	
L'équation obtenue	r	L'équation obtenue	r
$Y = 0,28819 * \exp(1,1002 * X)$	0,962	$Y = 0,16057 * \exp(1,2784 * X)$	0,964

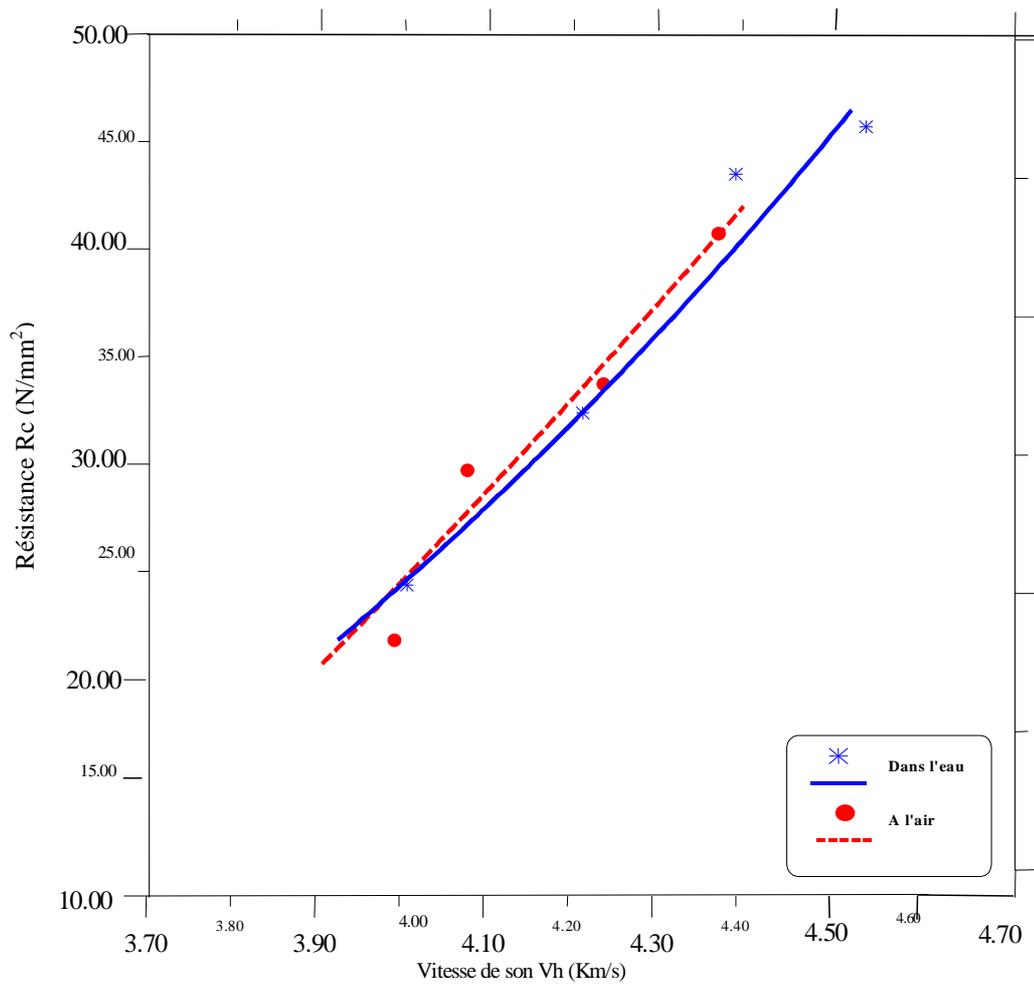


Figure (IV.29) : Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vh béton M_{0,5}, pour E/C=0.45 (Dans les deux conservation)

Tableau (IV.18) : L'équation de la résistance à la compression en fonction de la vitesse de son Vh du béton M_{0,5}, pour E/C=0.45 (Dans les deux conservation)

Dans l'eau		A l'air:	
L'équation obtenue	r	L'équation obtenue	r
$Y = 0,14525 * \exp(1,2201 * X)$	0,981	$Y = 0,07691 * \exp(0,14377 * X)$	0,967

b) Rapport E/C :

Les figures (IV.30), (4.31), (4.32), (4.33) montrent la relation entre la résistance à la compression et la vitesse de son en fonction du temps et les rapports E/C, pour les mélanges de béton M_T et $M_{0,5}$, et dans les deux directions de mesure (horizontale et verticale) et la conservation dans l'eau.

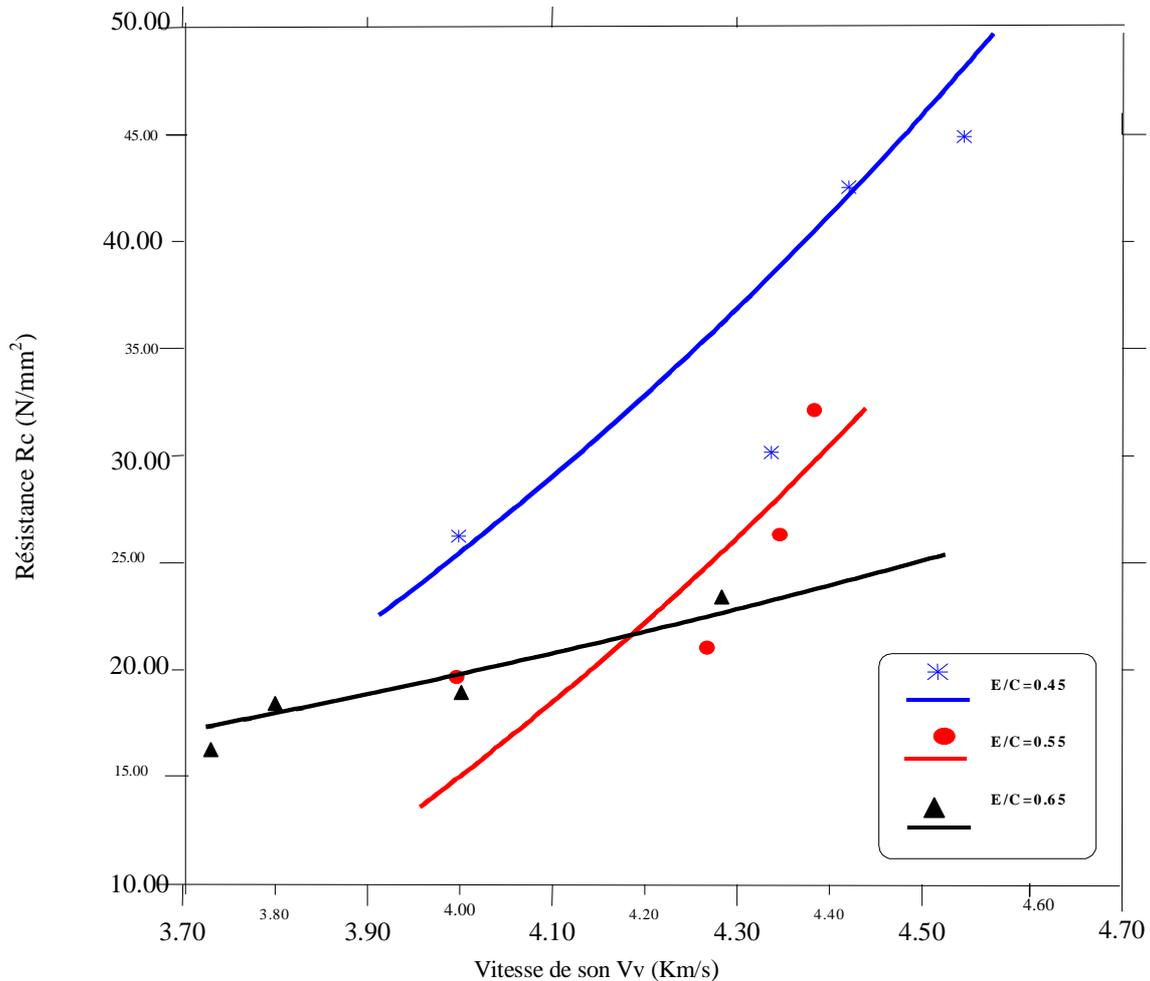


Figure (IV.30) : Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vv béton M_T pour différents E/C (conservation dans l'eau)

Tableau (IV.18) : L'équation de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vv béton M_T pour différents E/C (conservation dans l'eau)

Rapport E/C	L'équation obtenue	r
0,45	$Y = 0,241304 * \exp (1,16583 * X)$	0,911
0,55	$Y = 0,012733 * \exp (1,78005 * X)$	0,998
0,65	$Y = 3,329448 * \exp (0,44696 * X)$	0,899

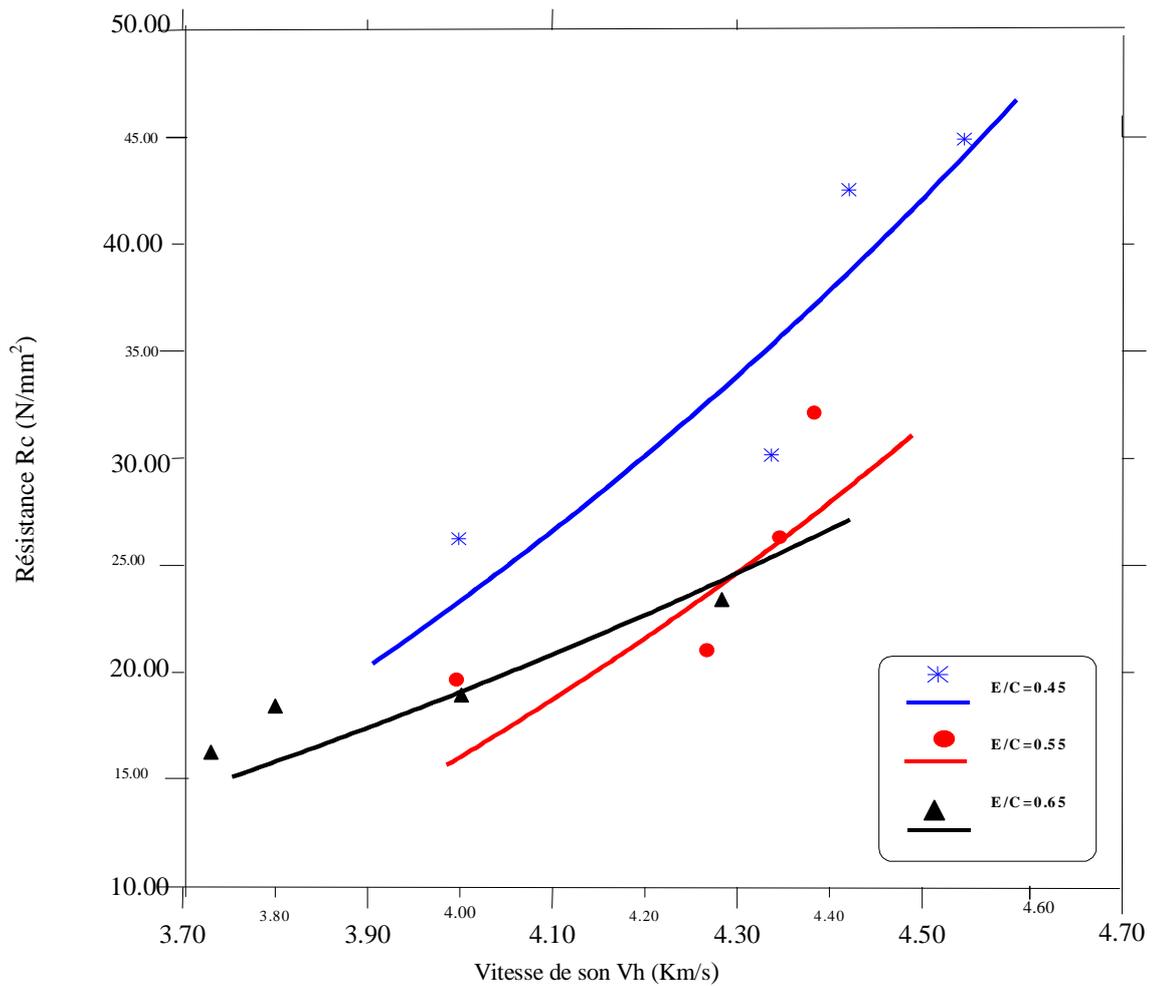


Figure (IV.31) : Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vh béton M_T pour différents E/C (conservation dans l'eau).

Tableau (IV.19) : L'équation de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vh béton M_T pour différents E/C (conservation dans l'eau).

Rapport E/C	L'équation obtenue	r
0,45	$Y = 0,221101 * \exp (1,167981 * X)$	0,917
0,55	$Y = 0,037973 * \exp (1,51389 * X)$	0,998
0,65	$Y = 2,820285 * \exp (0,49020 * X)$	0,955

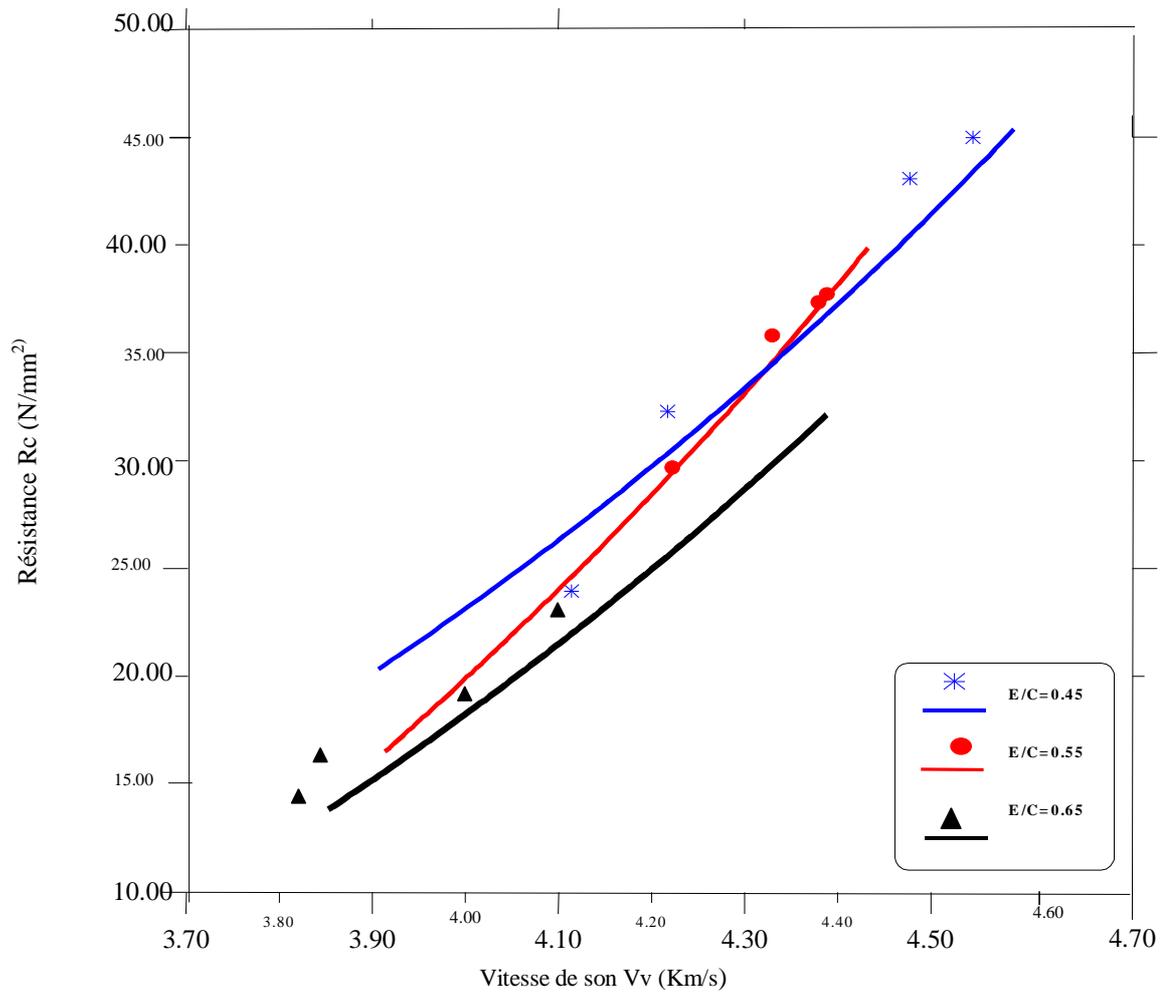


Figure (IV.32): Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son V_v béton $M_{0,5}$ pour différents E/C (conservation dans l'eau)

Tableau (IV.20) : L'équation de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son V_v béton $M_{0,5}$ pour différents E/C (conservation dans l'eau).

Rapport E/C	L'équation obtenue	r
0,45	$Y = 0,288195 * \exp (1,10028 * X)$	0,962
0,55	$Y = 0,026847 * \exp (1,65817 * X)$	0,999
0,65	$Y = 0,063098 * \exp (1,42573 * X)$	0,889

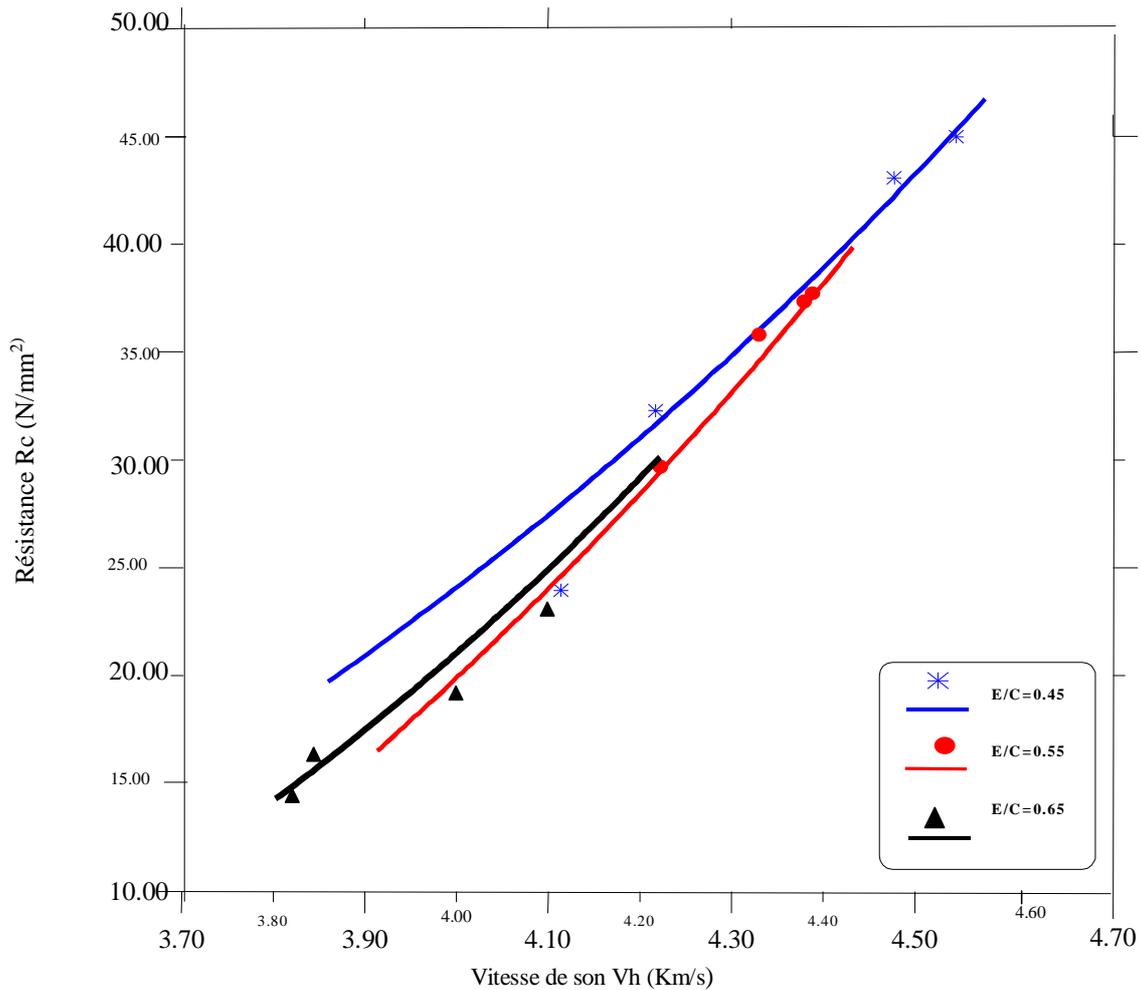


Figure (IV.33): Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vh de béton M_{0,5}, Pour différents E/C (conservation dans l'eau).

Tableau (IV.21) : L'équation de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vh béton M_{0,5} pour différents E/C (conservation dans l'eau).

Rapport E/C	Equation obtenue	r
0,45	$Y = 0,145250 * \exp (1,28019 * X)$	0,993
0,55	$Y = 0,051128 * \exp (1,51028 * X)$	0,998
0,65	$Y = 0,073539 * \exp (1,38650 * X)$	0,887

C) Pourcentage des fibres :

Les figures (IV.34), (IV.35) montrent la relation entre la résistance à la compression et la vitesse de son en fonction du temps et le pourcentage des fibres (0%,0.5%,1%,1.5%), pour le $E/C=0.45$, et dans les deux directions de mesure (horizontale et verticale)

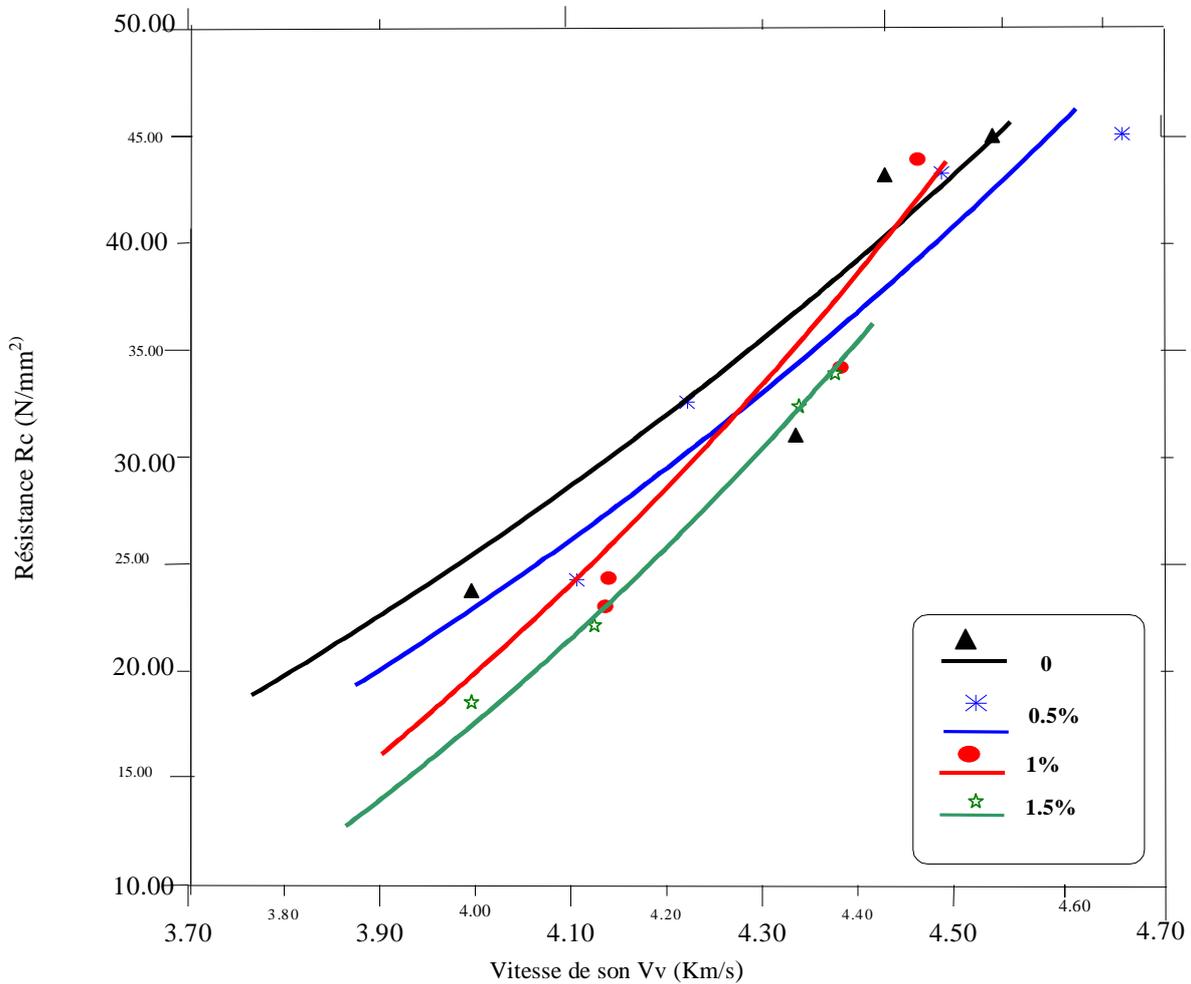


Figure (IV.34) : Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vv pour $E/C=0.45$, et pour différents pourcentages de fibres (conservation dans l'eau).

Tableau (IV.22) : l'équation de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vv pour $E/C=0.45$, et différents pourcentages de fibres (conservation dans l'eau)

Pourcentages des fibres	L'équation obtenue	R
0	$Y = 0,241304 * \exp (1,16583 * X)$	0,993
0,5%	$Y = 0,28819 * \exp (1,10028 * X)$	0,978
1%	$Y = 0,028459 * \exp (1,64121 * X)$	0,987
1,5%	$Y = 0,00680 * \exp (1,96798 * X)$	R=0,990

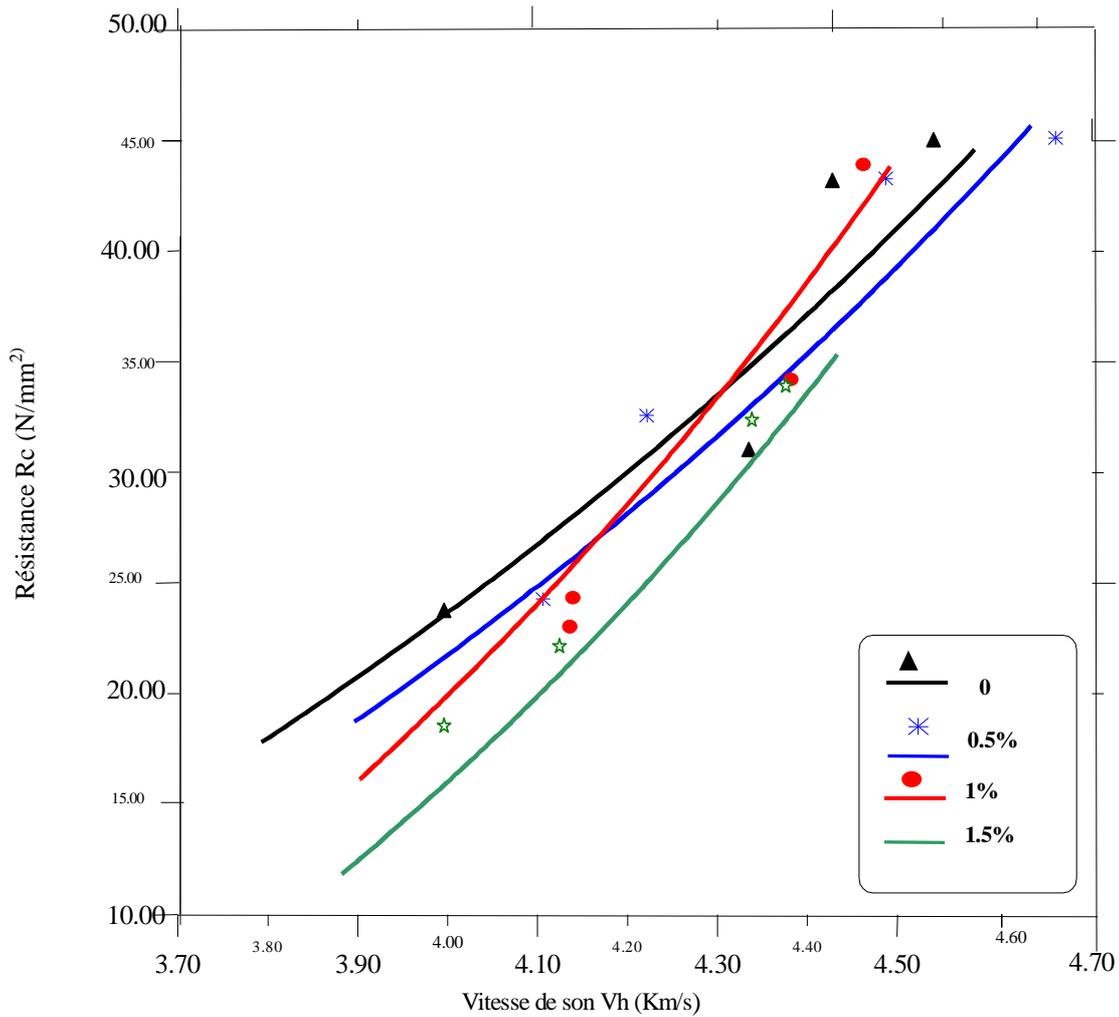


Figure (IV.35) : Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vh pour E/C=0.45, et différents pourcentages des fibres (conservation dans l'eau).

Tableau (IV.23) : L'équation de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vh pour E/C=0.45, et différents pourcentages des fibres (conservation dans l'eau)

Pourcentages des fibres	L'équation obtenue	R
0	$Y = 0,221101 * \exp (1,167981 * X)$	0,
0,5%	$Y = 0,145250 * \exp (1,28019 * X)$	0,993
1%	$Y = 0,012565 * \exp (1,81998 * X)$	0,981
1,5%	$Y = 0,0185933 * \exp (1,71821 * X)$	0,995

IV.5.2 Relation entre la résistance et l'indice sclérométrique

La relation entre la résistance à la compression et l'indice sclérométrique en fonction du temps, pour les mélanges de béton M_T , $M_{0,5}$, M_1 et $M_{1,5}$ et dans les deux directions de mesure (horizontale et verticale) pour voir l'influence de différents facteurs : rapport E/C,

pourcentages de fibres, et la condition de conservation sur les résultats des essais non destructifs.

Pour la relation entre la résistance à la compression et l'indice sclérométrique on a les courbes de forme linéaire pour obtenir une meilleure précision.

a)- Conditions de conservation

Commencent par donner la relation entre la résistance à la compression et l'indice sclérométrique en fonction du temps et les conditions de conservation, pour les mélanges de béton M_T et $M_{0,5}$ dans les deux directions de mesure (horizontale et verticale)

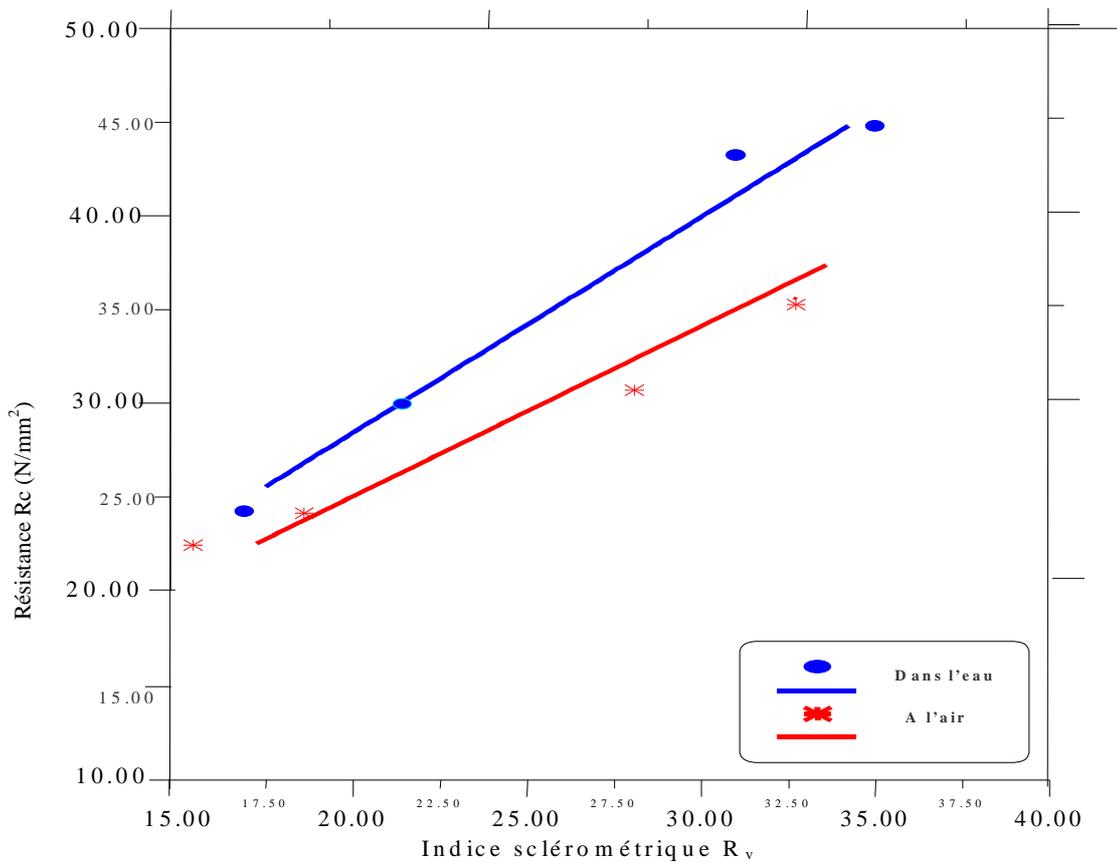


Figure (IV.36) : Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique R_v , béton M_T , $E/C=0.45$

Tableau (IV.24) : L'équation de la résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique R_v , du béton M_T , et $E/C=0.45$

Dans l'eau		A l'air	
L'équation obtenue	R	L'équation obtenue	r
$Y = 1,10498X + 5,98359$	0,993	$Y = 0,71108 \cdot X + 11,53645$	0,997

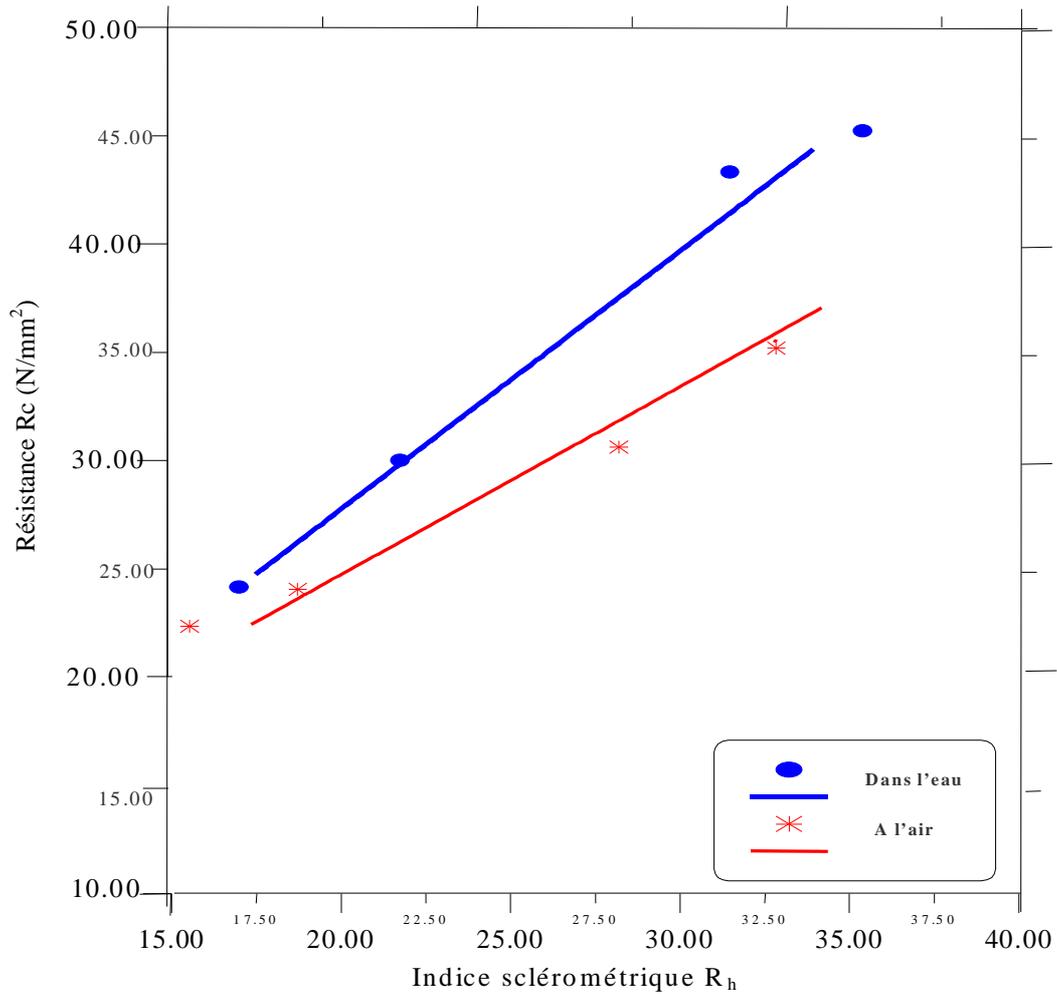


Figure (IV.37) : Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique R_h , du béton M_T , et $E/C=0.45$

Tableau (IV.25) : L'équation de la résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique R_h , du béton M_T , et $E/C=0.45$

Dans l'eau		A l'air	
L'équation obtenue	r	L'équation obtenue	r
$Y = 1,12774 \cdot X + 5,08756$	0,999	$Y = 0,71954 \cdot X + 11,19158$	0,996

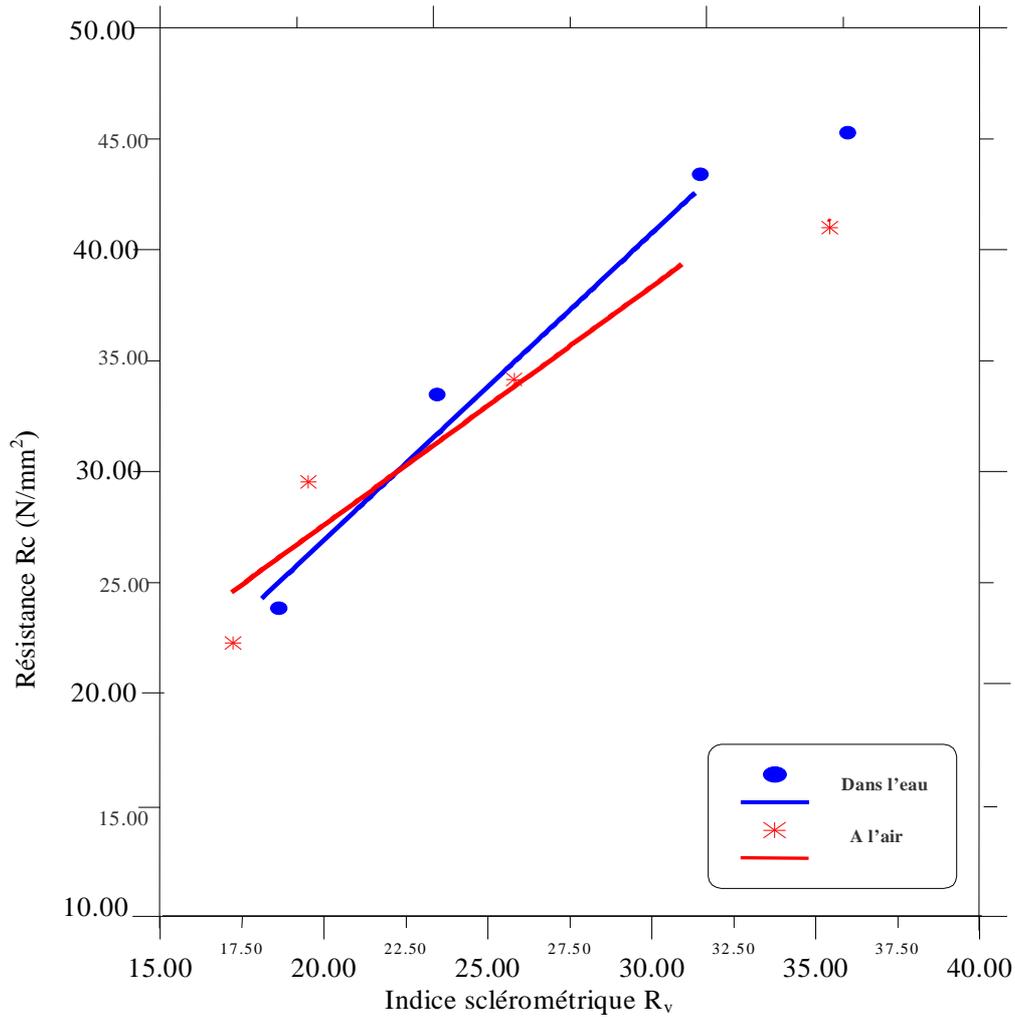


Figure (IV.38) : Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique R_v , du béton $M_{0,5}$, et $E/C=0.45$

Tableau (IV.26) : L'équation de la résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique R_v , béton $M_{0,5}$, et $E/C=0.45$

Dans l'eau		A l'air	
L'équation obtenue	r	L'équation obtenue	r
$Y = 1,11019 X + 6,06092$	0,981	$Y = 0,84036 \cdot X + 11,30679$	0,939

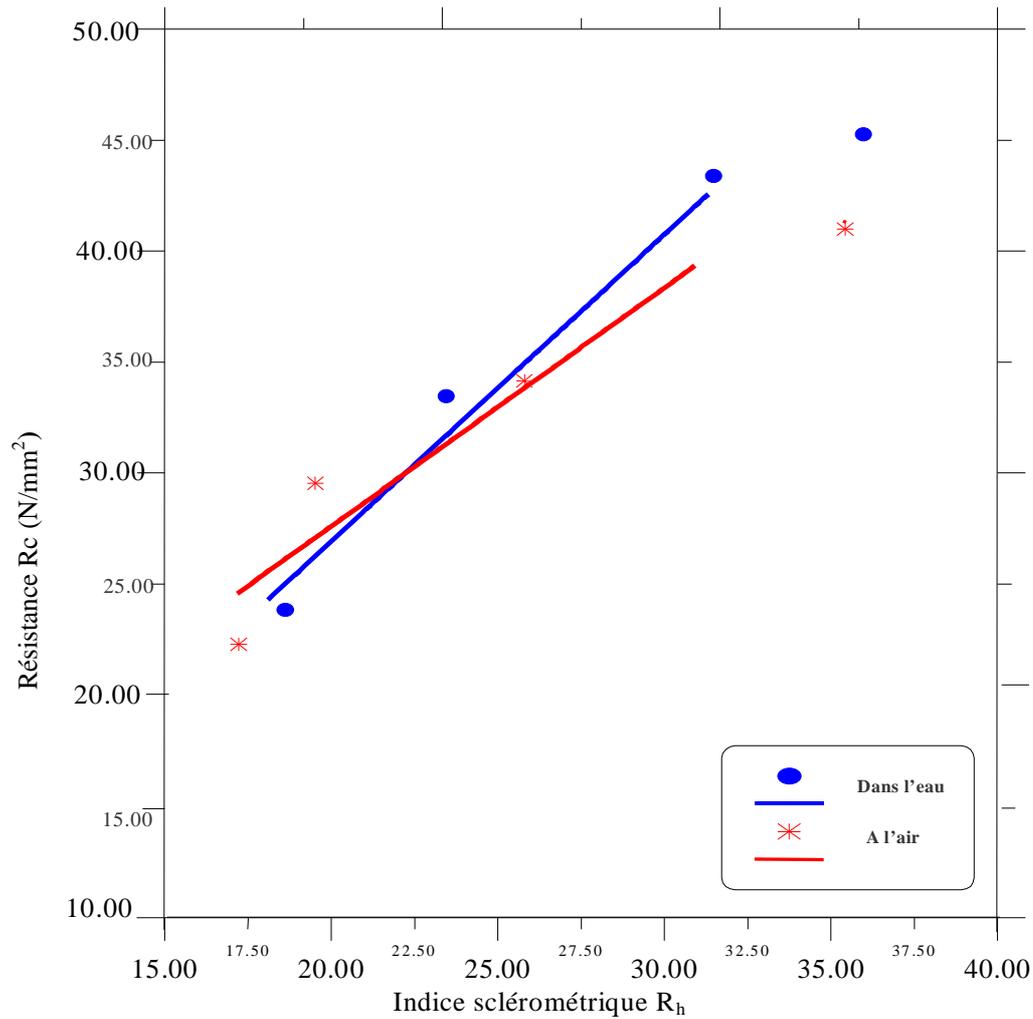


Figure (IV.39): Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique R_h du béton $M_{0.5}$, pour $E/C=0.45$

Tableau (IV.27) : L'équation de la résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique R_h , du béton $M_{0.5}$, pour $E/C=0.45$

Dans l'eau		A l'air	
L'équation obtenue	r	L'équation obtenue	r
$Y = 1,07721 \cdot X + 6,02307$	0,997	$Y = 0,84781 \cdot X + 11,32443$	0,934

b)- Rapport E/C :

Les figures (IV.40), (IV.41), (IV.42) et (IV.43) Montrent la relation entre la résistance à la compression et l'indice sclérométrique en fonction du temps et les rapports E/C, pour les mélanges de béton M_T et $M_{0,5}$, et dans les deux directions de mesures (horizontale et verticale)

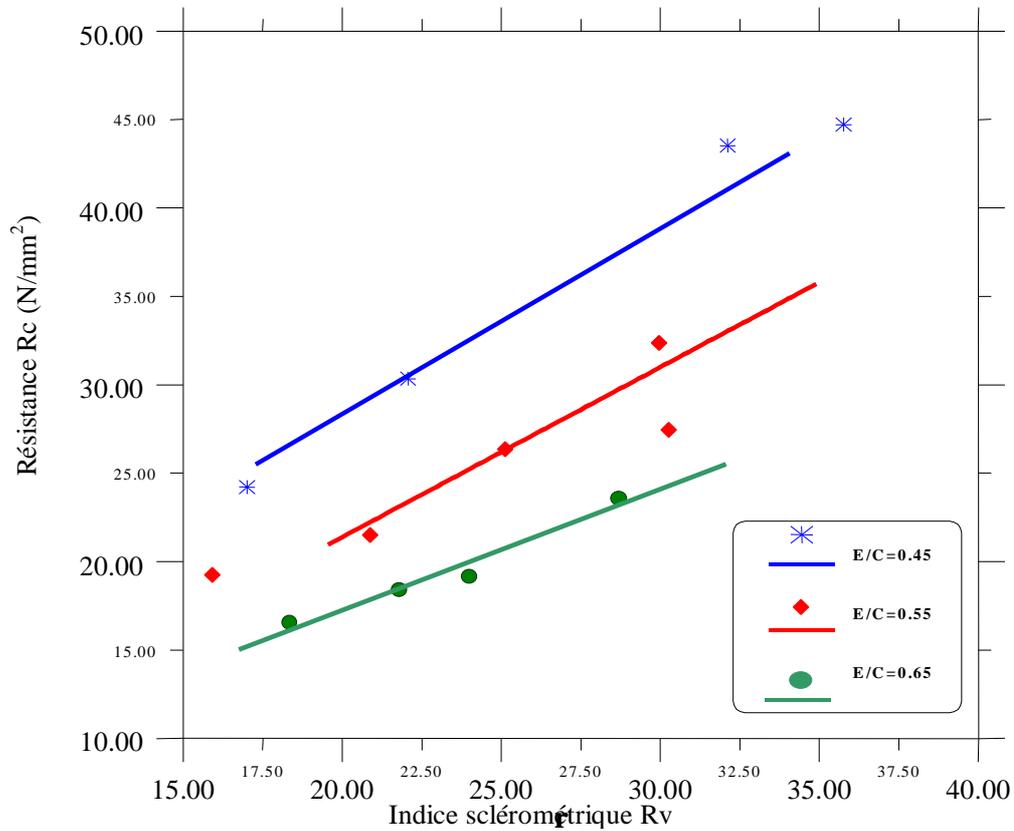


Figure (IV.40): Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique R_v du béton M_T pour différents E/C

Tableau (IV.28) : L'équation de la résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique R_v du béton M_T , pour différents E/C..

Rapport E/C	L'équation obtenue	r
0,45	$Y = 1,104983.X + 5,98395$	0,993
0,55	$Y = 0,987979.X + 2,04278$	0,978
0,65	$Y = 0,73708.X + 2,34014$	0,978

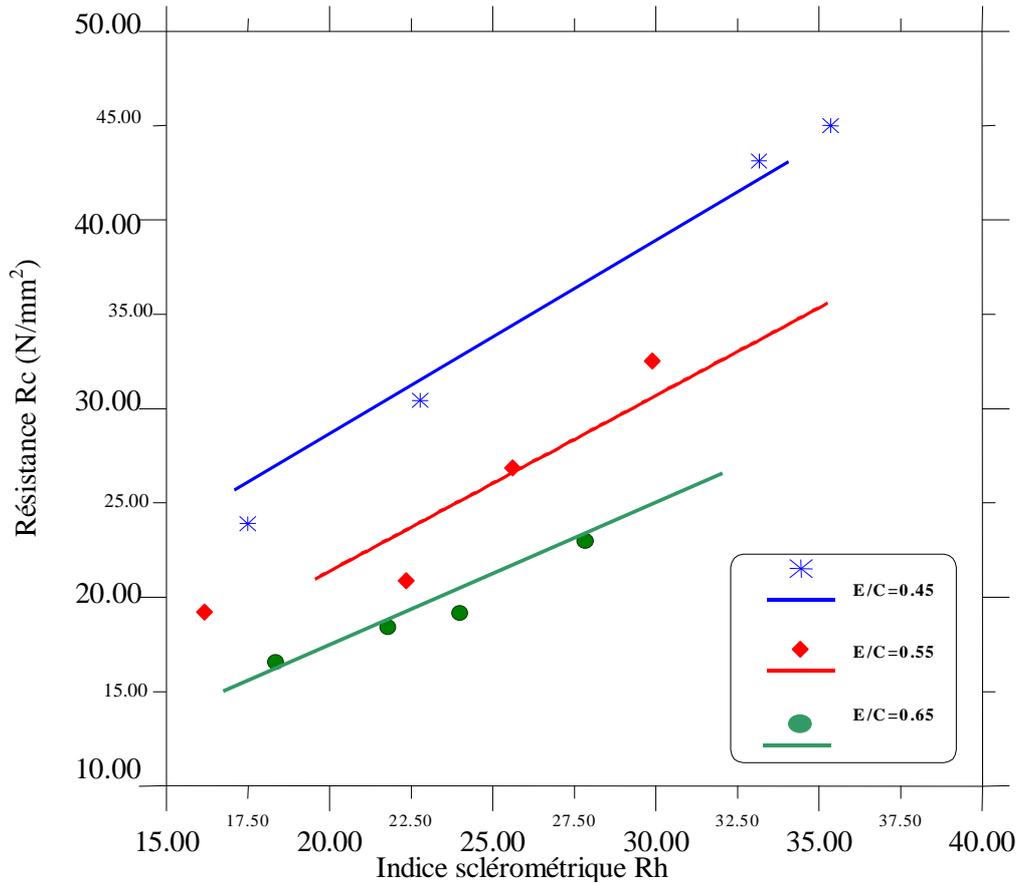


Figure (IV.41) : Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique Rh, du béton M_T pour différents E/C.

Tableau (IV.29) : L'équation de la résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique Rh du béton M_T , pour différents E/C.

Rapport E/C	L'équation obtenue	r
0,45	$Y = 1,12735.X + 5,10040$	0,999
0,55	$Y = 0,99058 X + 1,70335$	0,972
0,65	$Y = 0,78029 X + 1,61683$	0,976

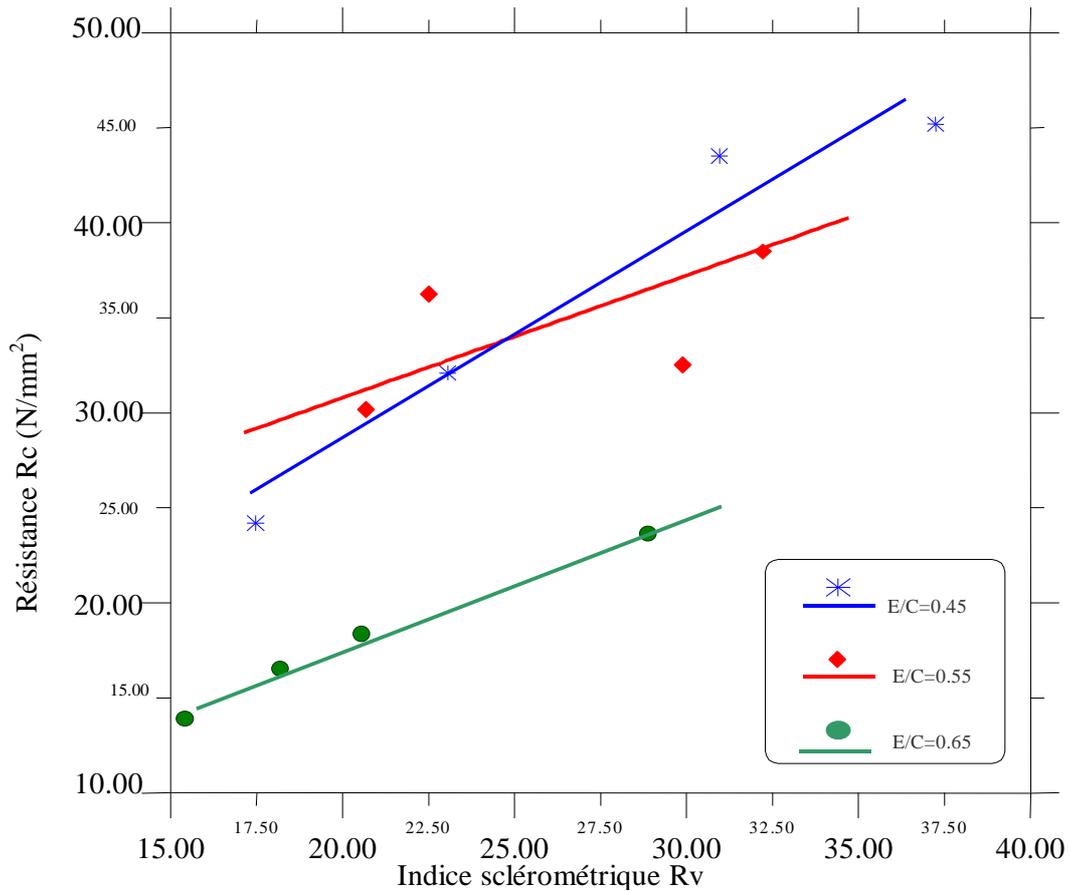


Figure (IV.42): Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique Rv du béton M_{0,5} pour différents E/C.

Tableau (IV.30) : L'équation de la résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique Rv du béton M_{0,5}, pour différents E/C.

Rapport E/C	L'équation obtenue	r
0,45	$Y = 1,11019 X + 6,06092$	0,981
0,55	$Y = 0,50447 X + 21,83350$	0,802
0,65	$Y = 0,70600 X + 3,44622$	0,999

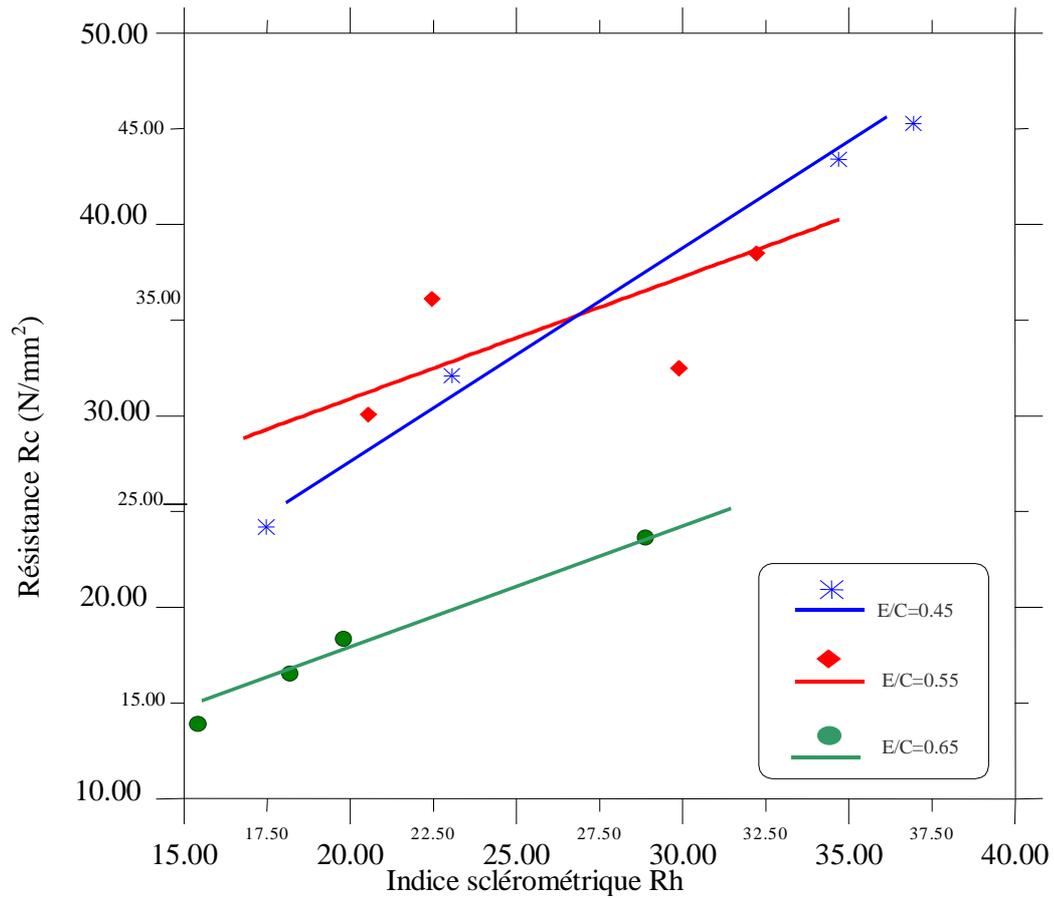


Figure (IV.43): Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique R_h , du béton $M_{0.5}$ pour différents E/C ,

Tableau (IV.31) : L'équation de la Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique R_h , du béton $M_{0.5}$, pour différents E/C .

Rapport E/C	L'équation obtenue	r
0,45	$Y = 1,07657.X + 6,04926$	0,981
0,55	$Y = 0,51607.X + 21,49527$	0,805
0,65	$Y = 0,70150.X + 3,50094$	0,990

c) Pourcentage des fibres :

Les figures (IV.44), (IV.45) montrent la relation entre la résistance et l'indice sclérométrique en fonction du temps et le pourcentages des fibres (0%,0.5%,1%,1.5%), pour le $E/C=0.45$, et dans les deux directions de mesures (horizontale et verticale)

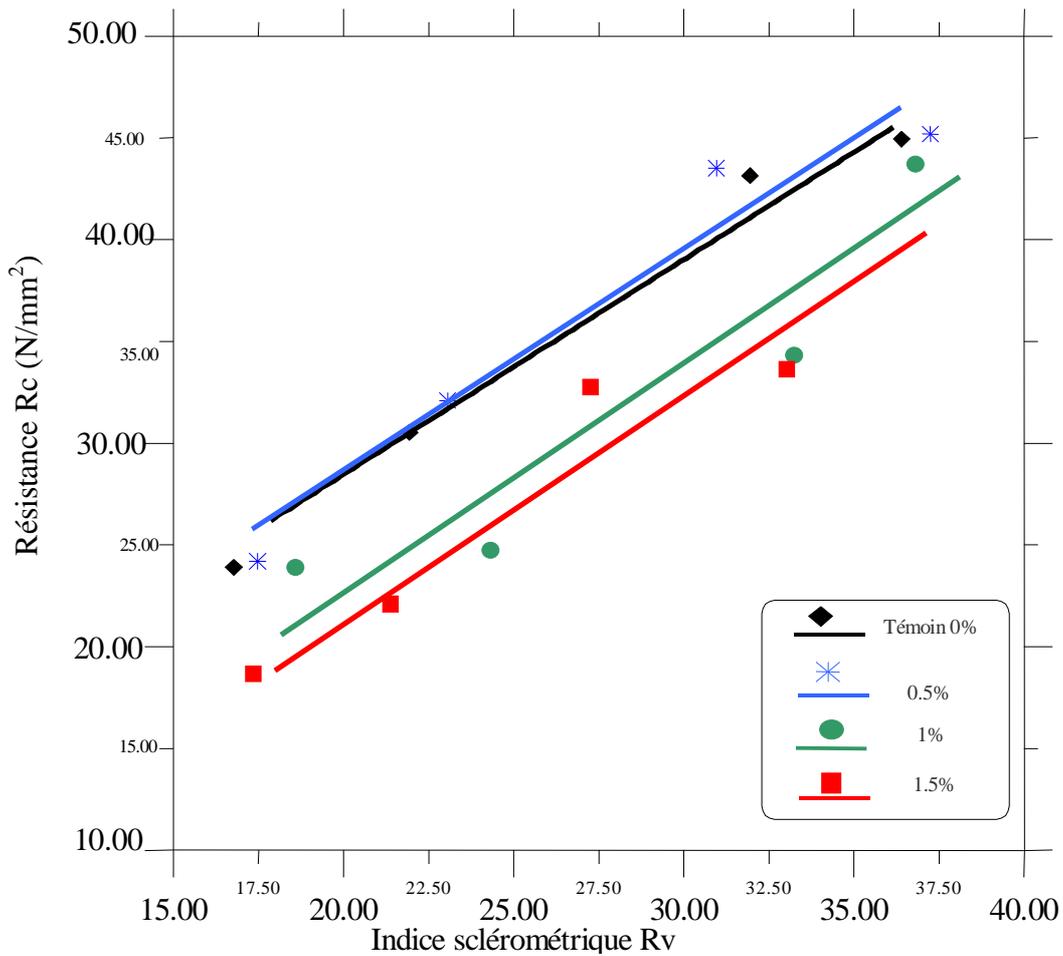


Figure (IV.44) : Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique R_v du béton avec différents pourcentages de fibres pour $E/C = 0.45$

Tableau (IV.32) : L'équation de la résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique R_v du béton avec différents pourcentages de fibres pour $E/C = 0.45$

Pourcentages des fibres	L'équation obtenue	r
0	$Y = 1,104983 X + 5,98395$	0,993
0,5%	$Y = 1,11019 X + 6,06092$	0,981
1%	$Y = 1,13898 X - 0,26443$	0,955
1.5%	$Y = 1,08588 X - 0,09475$	0,955

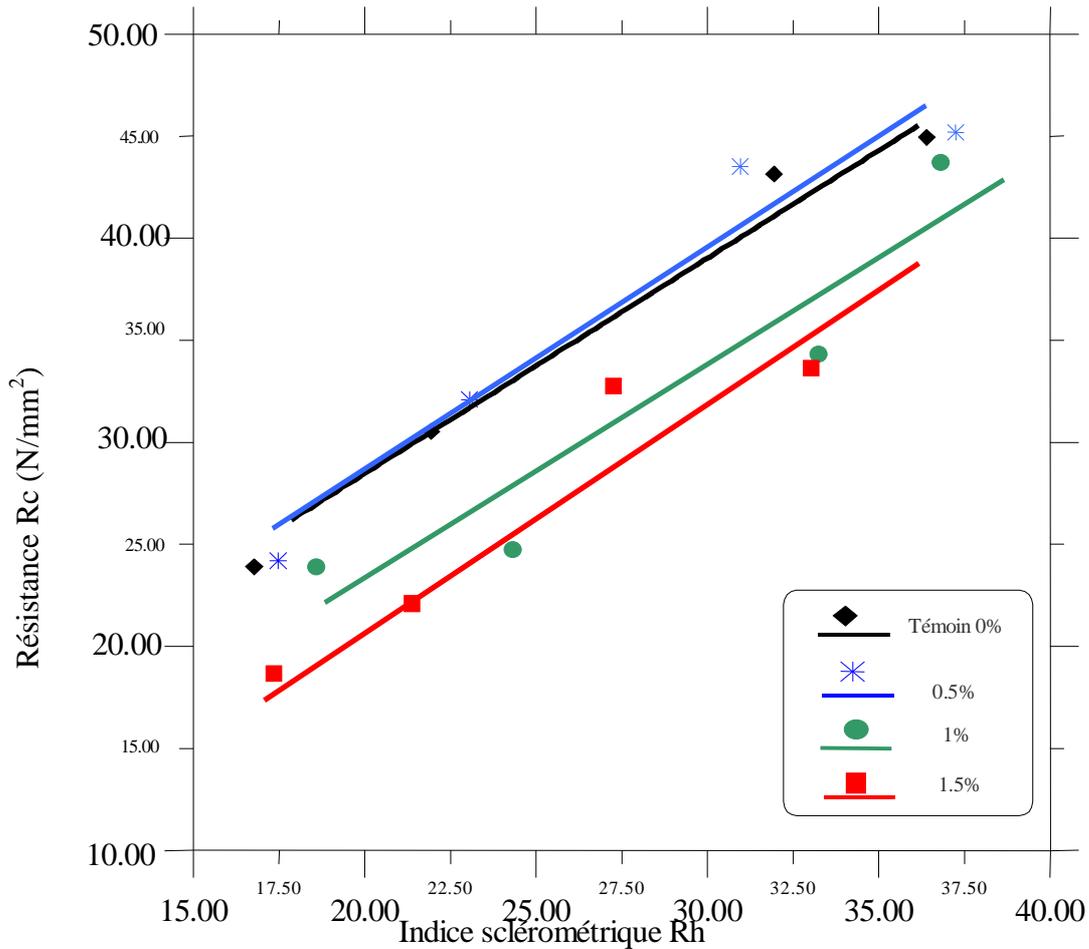


Figure (IV.45): Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique Rh du béton avec différents pourcentages de fibres pour E/C= 0.45.

Tableau (IV.33) : L'équation de la résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique Rh du béton avec différents pourcentages de fibres pour E/C =0.45

Pourcentages des fibres	L'équation obtenue	r
0	$Y = 1,12735 X + 5,10040$	0,999
0,5%	$Y = 1,07657 X + 6,04926$	0,981
1%	$Y = 1,11094 X + 0,54632$	0,964
1.5%	$Y = 1,14943 X - 2,35876$	0,950

IV.5.3 L'expression combinée de la vitesse de son et l'indice sclérométrique :

Pour obtenir une expression qui combine la vitesse de son et l'indice sclérométrique et donne la résistance à la compression on fait deux courbes avec les résultats de notre étude mais son prendre en compte les matériaux qui constituent le béton ni les conditions de conservation du béton, ni les pourcentages des fibres.

Où :

Y: Représente la résistance à la compression

X: Représente la vitesse de son

Z: Représente l'indice sclérométrique

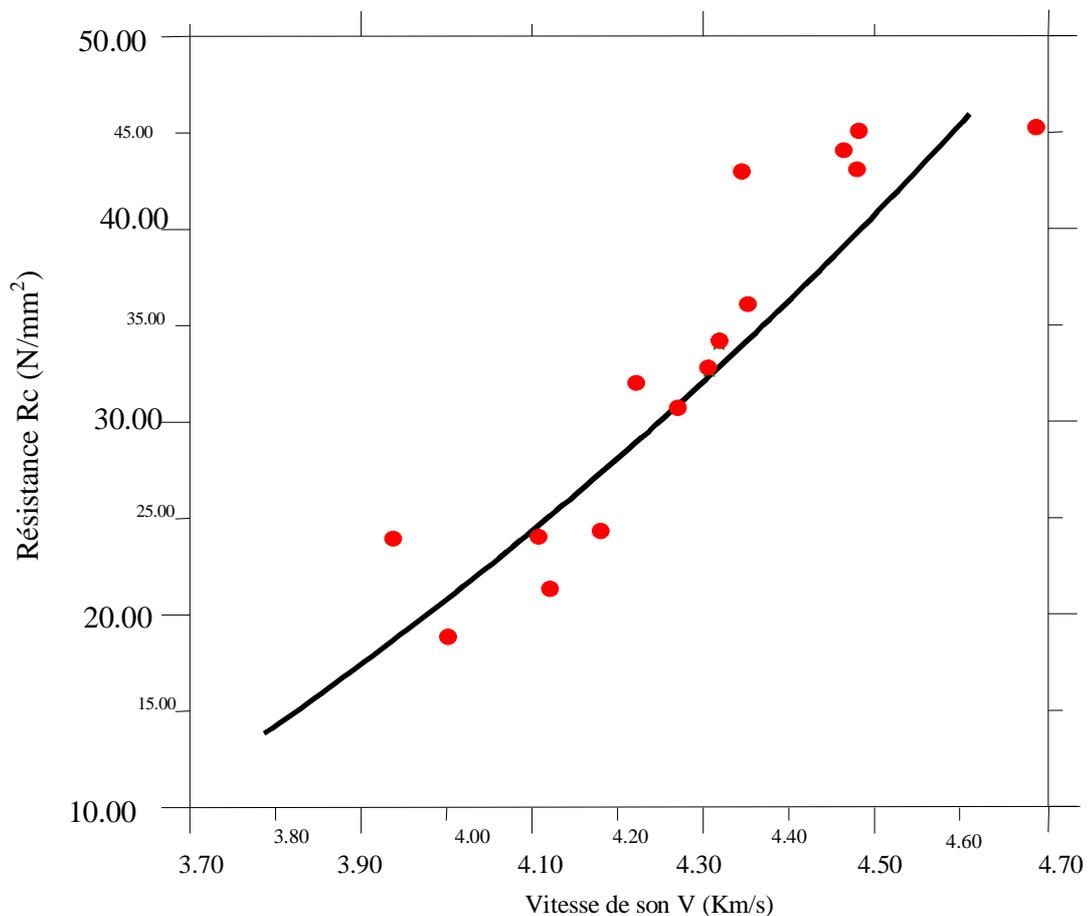


Figure (IV.46) : Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son V, pour différents pourcentages des fibres.

L'équation obtenue est la suivante :

$$Y = \exp(1,48966 * X) * 0,035197$$

$$r=0.931$$

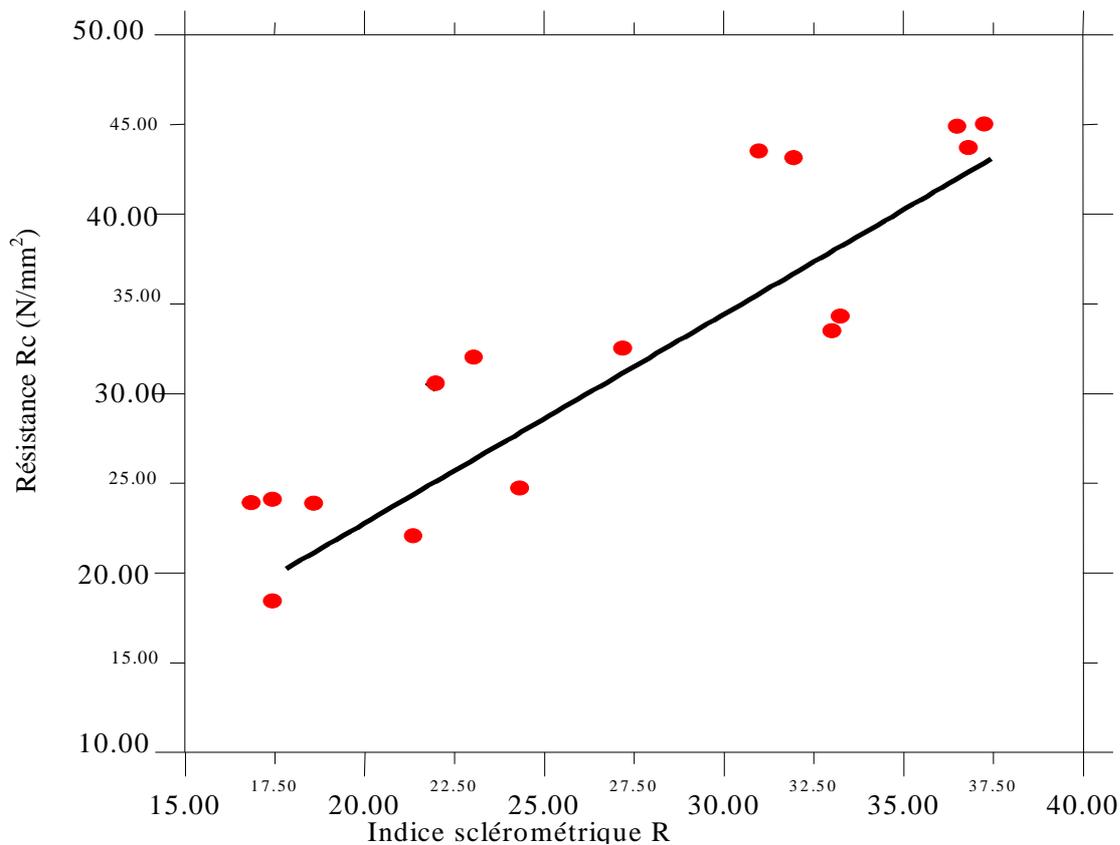


Figure (IV.47): Résistance à la compression en fonction l'indice sclérométrique R, pour différents pourcentages des fibres.

L'équation obtenue est la suivante :

$$Y = 1,14261 * Z + 2,07047$$

$$r = 0,917$$

L'expression combinée de la vitesse de son et l'indice sclérométrique :

$$Y = 0,035197 * \exp(1,48966 * X)$$

$$Y = 1,14261 * Z + 2,07047$$

On obtiendra :

Pour exprimer la formule finale les valeurs sont indiquée comme suit

Ou : **Rc** : La résistance à la compression

V : Vitesse de son

R : Indice sclérométrique

$$\mathbf{Rc = 0,026759 \exp(1,48966 * V) + 0,57130 * R + 1,03523}$$

IV.5.4 Application et discussions des résultats in situ et résultats avec l'expressions :

Maintenant nous allons appliquer nos résultats de la méthode combinée de scléromètre à béton avec la méthode ultrasonique de vitesse d'impulsion sur des carottes prélevés sur une dalle en béton de fibres fabriqué en chantier ou :

- La dalle contient 0.5% de fibres et $E/C = 0.45$
- Et six cubes de la même formulation de la dalle dont trois sont conservé dans l'eau et trois à l'air

Deux carottes ont été enlevé de la dalle à 28 jours avec une carotteuse et on a appliqué nos tests (vitesse de son, le scléromètre, et la presse) sur ces carottes et les cubes pour avoir une comparaison entre les expressions de corrélation entre la résistance de béton in situ avec l'indice sclérométrique et la vitesse de son. est voir s'ils s'accordent avec ceux obtenus in situ ou non.

Tableau (IV.34) : Résultats in situ

	Désignation des carottes		Les cubes					
			L'eau			L'air		
	C1 _{0.5}	C2 _{0.5}						
L'indice sclérométrique	40	38	29	32	28	20	22	24
La vitesse de son (km/s)	4,390	4,290	3,880	4,030	3,880	3,370	3,470	3,780
La résistance N/mm ²	42,00	41,40	25,00	31,00	26,00	17,00	18,00	24,00

Résultats avec l'expressions

$$R_c = 0,026759 \exp(1,48966 * V) * + 0,57130 * R + 1,03523$$

Tableau (IV.35): Résultats avec l'expressions

	Désignation des carottes		Les cubes					
			L'eau			L'air		
	C1 _{0.5}	C2 _{0.5}						
L'indice sclérométrique	40	38	29	32	28	20	22	24
La vitesse de son (km/s)	4,390	4,290	3,880	4,030	3,880	3,370	3,470	3,780
La résistance de l'expression (N/mm ²)	42,40	38,69	26,26	30,14	25,69	16,51	18,30	22,20

IV.6 CONCLUSION

Le programme expérimental réalisé avait pour but d'obtenir la résistance de béton de fibres in situ par une formule pratique obtenus par la méthode combinée ultrason-scléromètre.

On remarque des résultats obtenus in situ s'accordent presque avec ceux obtenus par l'expression.

A partir de cette conclusion nous pouvons confirmer que l'utilisation de la méthode combinée ultrason-scléromètre, pour l'estimation du la résistance à la compression du béton de fibres, peut être utilisé pour l'évaluation de la qualité des bétons de fibres avec différent pourcentages de fibres in situ

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Durant l'élaboration de ce travail et à partir des résultats et analyses des conclusions et des recommandations peuvent être soulignés dans ce mémoire.

Conclusion générale :

L'objectif principal de cette étude est l'appréhension des différentes techniques d'évaluation de la qualité du béton de fibre in situ, la contribution à l'estimation de la résistance du béton de fibres par les méthodes non destructives et les comparer avec celles obtenues par des méthodes destructives enfin d'obtenir des expressions pratiques évaluant la qualité du béton de fibres in situ.

Pour atteindre cet objectif, l'étude est divisée en deux parties :

La première partie concernant la synthèse bibliographique, nous a permis de fournir le contexte scientifique et technique pour notre travail.

La deuxième partie concernant l'étude expérimentale ne sa permit de conclure que :
Le chapitre III a fait le point sur les caractéristiques des matériaux utilisés ,les procédures, pour mieux analyser les résultats.

.Les résultats obtenus de chapitre IV a permet de tirer les conclusions suivantes :

- L'analyse de ce travail a prouvé que les paramètres qui influencent d'une manière significative la résistance du béton de fibres peuvent influencer, de la même manière les résultats d'essai non destructifs.
- L'exactitude de l'évaluation de résistance à la compression peut être améliorée par l'utilisation combinée du marteau de Schmidt et des méthodes ultrasoniques de vitesse d'impulsion.
- Dans notre étude la méthode combinée a une certaine exactitude de l'évaluation de résistance à la compression Ceci est montré par la comparaison entre les résultats des expressions et les résultats des essais destructives.
- La résistance à la compression du pourcentages 0.5% est plus grandes dans les deux conservations (air et l'eau) et quelque soit le E/C que celle du béton témoin ou autres pourcentages des fibres.

- La résistance à la compression du béton de fibres conservé à l'eau est plus haute que celle du béton conservé à l'air à un indice sclérométrique donné.
- La résistance à la compression du béton conservé à l'eau est plus haute que celle du béton conservé à l'air à une vitesse de son donnée.
- Les augmentations de vitesse de son en cas de conservation dans l'eau. Ceci est attribué au fait que les impulsions ultrasoniques voyagent par les pores remplis par l'eau et pas tout autour des bords de pore comme elles le font dans un état sec. En conséquence le chemin de voyage diminue et la vitesse de son augmente.
- On remarque que l'introduction des fibres change le comportement des impulsions ultrasoniques ou le pourcentage faible des fibres augmente la compacité de béton (dans notre cas 0.5% de fibres est le pourcentage favorable ou bénéfique) et l'introduction de fort pourcentage des fibres inclut une diminution de la résistance à la compression et une difficulté de mise en œuvre.
- Le béton de fibres est meilleur lors d'utilisation de faibles valeurs de E/C puisque la teneur en ciment est plus élevée que pour les bétons classiques.
- D'après les résultats de scléromètre celui-ci mesure la résistance de la surface du béton tout en ignorant les composants de ce béton (béton de fibres ou béton ordinaire)

La méthode combinée la vitesse de propagation de son et l'indice de rebondissement s'est montrée encourageante pour l'estimation de la résistance du béton de fibres.

RECOMMANDATIONS

La réalisation de cette étude a mené à plusieurs recommandations pour le futur. Ces recommandations touchent la méthode combinée de la vitesse de propagation de son et l'indice de rebondissement qui c'est montrée encourageante pour l'estimation de la résistance du béton de fibres , cependant il serait très utile d'utiliser cette méthode pour la détermination d'autres propriétés de béton de fibres comme pour l'estimation du la résistance de béton de fibres avec :

- D'autre types de fibres comme les fibres d'acier, les fibres de carbone ..ect
- Béton de fibres additionnée à d'autres ajouts tel que les cendres volantes, pouzzolanes, laitiers, fumés de silices, calcaires, etc....
- Mortiers avec des fibres, la pâte de ciment avec des fibres.

Liste des figures

	Page
Figure (I.1) : Brevet de Weakly (1920).....	05
Figure (I.2) : Brevet de H.Etheridge et al (1933).....	06
Figure (I.3) : Brevet de G.Constantinesco1943.....	07
Figure (I.4) : Limites technologiques pour la mise en œuvre du béton d'acier (G.Odelberg 1985).....	12
Figure (I.6) : Les relations contrainte- déformation des fibres de renforcement (G.Debicki 1987).....	14
Figure (I.7) : Résistance à la flexion du ciment portland de fibres en fonction du temps et conservé à l'air (échelle logarithmique) (Steel B.1971).....	19
Figure (I.8) : Quelques exemples de formes de fibres d'acier section circulaire, rectangulaire, carrée ou elliptique (Venuat M. 1983).....	19
Figure (I.9) : Les courbes contraintes- déformations de Akihama S et Al 1986.....	24
Figure (I.10) : Influence du volume et de l'élanement des fibres sur la déformation de fissuration (pour la contrainte maximum) d'un composite avec des fibres d'acier.(Johnston et Coleman (1974)).....	25
Figure (I.11) : Description schématique de la zone inter faciale à l'interface d'une fibre d'acier et du ciment Benthur et Al (1986).....	26
Figure (I.12) : Mesure de la dureté au voisinage d'une fibre de « Titanium slag wool » (Chuanhe et Al 1986)...	26
Figure (I.13) : a) Résistance à l'arrachement de fibres en acier droite en fonction de la résistance en compression de matrice.....	28
b) Résistance à l'arrachement de fibres en acier droite en En fonction de la quantité d'eau contenue dans la matrice (Bentur et Al 1986).....	28
Figure (I.14) : Déformation d'un béton armé de fibres, comparée à celle d'un béton non armé d'après Venuat M.1987)...	29
Figure (I.15) : Effet de retardement de la fissuration et répartition des fibres dans le béton d'après Venuat 1987)	31
Figure (I.16) : Différentes modes d'armature d'une poutre en béton d'après Michel Vénut 1987.....	34
Figure(I.17) : Distribution de la longueur des fibres de carbone après malaxage. La longueur initiale des fibres est de 10 mm (Kunio Nishioka et Al 1986).....	34
Figure (I.18) : Courbes charge – flèche obtenues en fonction du temps de malaxage d'après Dibbecki (1984)...	34
Figure (I.19) : Principales méthodes de mise en œuvre.....	37
Figure (I.20) : Ouvrabilité des mélanges en fonction du pourcentage de fibres prismatique et de l'élanement .(Bouchekouk-Debicki- Hamelin(1987)).....	38
Figure (I.21) : Augmentation de la résistance en compression en pourcentage d'un béton ou mortier armé de fibres d'acier en fonction des paramètres L/d (Johenson W. et Al 1974).....	41
Figure (I.22) : Influence de la longueur et de pourcentage de fibres sur la résistance à la compression du béton armé de fibres de polypropylène (Dardar 1975).....	41
Figure (I.23) : Relation entre la déformation longitudinale et la contrainte axiale en compression (Gopalaratnam V.S et Shah S.P 1985).....	42
Figure (I.24) :	
a) Augmentation de la résistance $\frac{\sigma_c - \sigma_m}{\sigma_m}$ à la traction d'un mortier armé de fibres d'acier en fonction du volume de fibre (Johson et Colman 1974).....	43

	b) Augmentation de la résistance à la traction $\frac{\sigma_c - \sigma_m}{\sigma_m}$ d'un mortier armé de fibres d'acier en fonction du l'éclancement des fibres (Johnson et Colman 1974).....	44
Figure (I.25)	: Résistance à la traction du ciment armé de fibres de verre en fonction du pourcentage en volume de fibres Vf et pour différentes longueurs de fibres (Majumdar 1975).....	44
Figure (I.26)	: Courbe de charge – flèche en flexion (Masdar Helmi Juin 1998).....	45
Figure (I.27)	: Courbe de calcul de l'indice de ténacité.....	47
Figure (I.28)	: Comportement au fluage d'éprouvettes de béton de fibres soumises à une sollicitation de flexion par P.N .SWAMY.....	49
Figure (II.1)	: Principe du Scléromètre.....	55
Figure (II.2)	: La relation entre la résistance à la compression mesurée sur cylindre et l'indice de rebondissement pour des bétons confectionnés avec différents granulats (W.E Grieb (1958).....	56
Figure (II.3)	: Élément à tester par le scléromètre.....	57
Figure (II.4)	: La relation entre la résistance à la compression mesurée sur cylindre et l'indice de rebondissement d'un scléromètre utilisé à l'horizontale et à la verticale sur des surfaces de béton sèches et humides. C.H. Willetts (1958).....	59
Figure (II.5)	: Mesures en transparence (directe).....	62
Figure (II.6)	: Mesures en surface.....	63
Figure (II.7)	: Mesures semi directe.....	63
Figure (II.8)	: Courbe d'estimation de la résistance à la compression in situ par utilisation conjointe de la mesure de propagation d'ondes ultrasoniques et des résultats d'essai au scléromètre selon U. Bellander (1977).....	65
Figure (III.1)	: Courbe granulométrique du sable.....	76
Figure (III.2)	: Courbe granulométrique du graviers.....	77
Figure (III.4)	: Evolution de la résistance à la compression avec le MEDFLUID (SF) CNERIB (2000).....	78
Figure (III.5)	: Points de mesures scléromètre.....	81
Figure (III.6)	: Points de mesures ultrason.....	81
Figure (III.7)	: Dimension de la dalle à carotter	82
Figure (IV.1)	: Résistance à la compression de béton témoin M _T en fonction de l'âge.....	86
Figure (IV.2)	: Résistance à la compression de béton de fibres M _{0,5} en fonction de l'âge	86
Figure (IV.3)	: Résistance à la compression de béton de fibres M ₁ en fonction de l'âge	86
Figure (IV.4)	: Résistance à la compression de béton de fibres M _{1,5} en fonction de l'âge	87
Figure (IV.5)	: Influence de Pourcentage de fibres sur la résistance à la compression en fonction de l'âge dans les deux conservation (L'air et l'eau) pour E/C =0.45.....	87
Figure (IV.6)	: La vitesse du son Vv de béton témoin M _T en fonction de l'âge	91
Figure (IV.7)	: La vitesse du son Vh de béton témoin M _T en fonction de l'âge.....	91
Figure (IV.8)	: La vitesse du son Vv de béton témoin M _{0,5} en fonction de l'âge.....	91
Figure (IV.9)	: La vitesse du son Vh de béton témoin M _{0,5} en fonction de l'âge.....	92
Figure (IV.10)	: La vitesse du son Vv de béton témoin M ₁ en fonction de l'âge	92
Figure (IV.11)	: La vitesse du son Vh de béton témoin M ₁ en fonction de l'âge	92
Figure (IV.12)	: La vitesse du son Vv de béton témoin M _{1,5} en fonction de l'âge.....	93
Figure (IV.13)	: La vitesse du son Vh de béton	93

Figure (IV.14)	: Influence de pourcentage de fibres (0%,0.5%,1% et 1.5%) sur la vitesse de son en fonction de l'âge dans les deux condition de conservation pour E/C=0.45.....	93
Figure (IV.15)	: La vitesse du son d'un échantillon du béton avec 0.5% de fibres pour (E/C=0.45) en fonction de la position, l'âge et les conditions de conservation du béton.....	94
Figure (IV.16)	: L'indice sclérométrique Rv de béton Témoin M _T en fonction de l'âge.....	99
Figure (IV.17)	: L'indice sclérométrique Rh de béton Témoin M _T en fonction de l'âge.....	99
Figure (IV.18)	: L'indice sclérométrique Rv de béton avec 0.5% de fibres M _{0,5} en fonction de l'âge	99
Figure (IV.19)	: L'indice sclérométrique Rh de béton avec 0.5% de fibres M _{0,5} en fonction de l'âge	100
Figure (IV.20)	: L'indice sclérométrique Rv de béton avec 1% de fibres M ₁ en fonction de l'âge.....	100
Figure (IV.21)	: L'indice sclérométrique Rh de béton avec 1% de fibres M ₁ en fonction de l'âge	100
Figure (IV.22)	: L'indice sclérométrique Rv de béton avec 1.5% de fibres M _{1,5} en fonction de l'âge	101
Figure (IV.23)	: L'indice sclérométrique Rh de béton avec 1.5% de fibres M _{1,5} en fonction de l'âge	101
Figure (IV.24)	: L'indice sclérométrique d'un échantillon du béton avec 0.5% de fibres M _{0,5} (E/C=0.45) en fonction de la position, l'âge et les conditions de conservation du béton.....	101
Figure (IV.25)	: L'influence du pourcentage de fibres (0%,0.5%,1% et 1.5%) sur l'indice sclérométrique Rv en fonction de l'âge dans les deux condition de conservation pour E/C=0.45.....	102
Figure (IV.26)	: Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vv du béton M _T , pour E/C=0.45.....	103
Figure (IV.27)	: Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vh du béton M _T , pour E/C=0.45.....	104
Figure (IV.28)	: Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vv du béton M _{0,5} , pour E/C=0.45....	105
Figure (IV.29)	: Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vh du béton M _{0,5} , pour E/C=0.45....	106
Figure (IV.30)	: Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vv du béton M _T , (conservation dans l'eau).	107
Figure (IV.31)	: Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vh du béton M _T (conservation dans l'eau).....	108
Figure (IV.32)	: Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vv du béton M _{0,5} (conservation dans l'eau).....	109
Figure (IV.33)	: Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vh du béton M _{0,5} (conservation dans l'eau).....	110
Figure (IV.34)	: Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vv pour E/C=0.45, pour différents pourcentages des fibres (conservation dans l'eau).....	111
Figure (IV.35)	: Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son Vh pour E/C=0.45, pour différents pourcentages des fibres, conservation dans l'eau.....	112
Figure (IV.36)	: Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique Rv, béton M _T , E/C=0.45.....	113
Figure (IV.37)	: Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique Rh, béton M _T , E/C=0.45.....	114
Figure (IV.38)	: Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique Rv, béton M _{0,5} , E/C=0.45.....	115
Figure (IV.39)	: Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique Rh, béton M _{0,5} , E/C=0.45.....	116
Figure (IV.40)	: Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique Rv du béton MT pour différents E/C.....	117
Figure (IV.41)	: Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique Rh du béton MT pour différents E/C.....	118
Figure (IV.42)	: Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique Rv du béton M _{0,5} pour différents E/C.....	119
Figure (IV.43)	: Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique Rh, du béton M _{0,5} pour différents E/C.....	120
Figure (IV.44)	: Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique Rv du béton avec différents pourcentages de fibres pour E/C =0.45.....	121
Figure (IV.45)	: Résistance à la compression en fonction de l'indice sclérométrique Rh du béton avec différents pourcentages de fibres pour E/C= 0.45.....	122
Figure (IV.46)	: Résistance à la compression en fonction de la vitesse du son V, pour différents pourcentages des fibres....	123
Figure (IV.47)	: Résistance à la compression en fonction l'indice sclérométrique R, pour différents pourcentages des fibres	124

Références bibliographiques

Akashi .T et Amasaki S (1984): Study of the stress waves in the plunger of a rebound hammer at the time of impact, in situ / non destructive testing of concrete.

Akihama S et Al (1986) : extrait de revue “Béton de fibres” travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon.

Ali et Al (1973) : the tensile stress/strain curve of brittle matrices reinforced with glass fibre” Fibre reinforced materiel conference, institution of civil engineers, London, pp 101-109.

Ali, Majumdar, Singh (1975) : extrait de revue Béton de fibres” travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon.

Amasaki S (1991): Estimation of strength of concrete in structures by rebound hammer, CAJ Proceeding of cement and concrete, N° 45, pp 345-51.

American society for testing and materiel ASTM, C820-85 A standard specification for steel fibers for fibers reinforced concrete, ASTM, Philadelphia, USA, September 1985.

American Concrete Institute. ACI committee state of the art report reinforced concrete, journal of the American concrete institute, March/April 1984, pp 140-166.

Antoine, E, fiber reinforcement for concrete, Concrete International, March 1985, pp 21-25.

ASTM C 150-84 BS12(1989) Method of testing cement, chemical testing.

Badi Aulia .T (2000): Strain Localization and Fracture Energy of High-Strength Concrete under niaxial compression. LACER No. 5, 2000, pp. 221-240.

Banthia (1995) : “Test methods for flexural toughness characterization of fiber reinforced concrete” Some concerns and a proposition “ ACI Materials journal, Vol 92, No 1, pp 48-57.

Banthia, N et Foy. C. (1989) Marine Curing Of Steel Fiber Composites, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 1, no 2, May 1989, p. 86-96.

Banthia, N. (1992) : Propriétés mécaniques du béton, Notes de cours.

Banthia et Batchelor (1991): Material Properties of Fiber Reinforced Concrete, in State of the Art Report on advanced composite material in Bridges and Structures, Edited by Mufki Erki and Jaeger, Canadian Society for Civil, Engineering, Montréal, p. 70-112..

Banthia (1995) :Fiber matrice interface; Pre proceeding of international workshop of high performance fiber reinforced composite ,Vol 2, Edited by A.E Naaman , USA; p 417.

Balaguru (1992) : Fiber reinforced cement composite” McGraw Hill Inc..

Balaguru, P. (1994) Fiber Reinforced Concrete for Structural Components: A State-of-the Art, Workshop on Fiber Reinforced Cement and Concrete, July 1994. Sheffield, U.K.

Barnes et Al 1979 : Béton de fibres” travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon.

Battelle development corporation, concrete and steel material, british patent No1068163,December 1963.

Bentur et Al (1986) .Fiber reinforced cimentitious materiel, material science of concrete, vol 1, edited by J.P, Skalny, Waterville, USA; American Society Inc, p 223-283.

Bentur , Gay et Mindness (1986): Fibre reinforced cementitious composites, London: Elsevier.

Bigen (1979): polymer modified glass fiber composite reinforced cement successful composite .proceeding of the international congress on polymers in concrete

Bentur, Diamond et Midness (1985) The microstructure of steel fibres cement interface; journal of materiel Science ; Vol 20,p 3610-3620.

Bellander U (1976): Concrete strength in finished structures, part1: destructive testing methods. Swedish cement & concrete association, Stockholm, 1976, report 13/76.

Boucekoute – Debicki et Hamelin (1987) : extrait de revue Béton de fibres” travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon.

Boucekouk et Al (1987): extrait de revue «Béton de fibres” travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon.

Braun, M And Majdic (1980) : A. reinforcing castables with stainless steel fibres intercera No 129, PP 113-118.

Bungey J. H. (1989): The testing of concrete in structures. , 222 pp. (Surrey University Press.

Bungey J H (1979): determining concrete strength by using small diameter cores. Magazine of concrete research, vol 31, N° 107, June 1979.

Chuanette et Al (1996) :extrait de revue « Béton de fibres” travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon.

Corneille A (1979) : extrait de thèse «comportement du mortier renforcé de fibres en fonte amorphe » de G. Debecki Institut de Scherbook 1987.

Dardare (1975) : extrait de revue « Béton de fibres” travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon.

Dave et Ellis (1979) : extrait de revue « Béton de fibres » travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon.

Debiki.G extrait de revue « Béton de fibres » travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon.

Edgington et Hannant « Steel fiber reinforced concrete » The effect on fiber orientation of compaction by vibration », materials and structures, RILM, 5 (25) 41-44 January- February 1972.

Elvery, R.H. et Ibrahim, L.A.M (1976): Ultrasonic assessment of concrete strength at early ages. Magazine of concrete Research, Vol. 28, N° 97, December 1976, pp. 181-190.

Facaoaru, I. (1969): Non-destructive testing of concrete in Romania. Proc.On Non-destructive testing of concrete and Timber. Institution of Civil Engineers, London, June 1969, pp. 23-33.

Faiyaoh - Al-Aussi (1986) : extrait de revue « Béton de fibres » travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon.

Feldman R.F (1977) : Essais non destructifs du béton. Institut de la recherche en construction. Canada, October 1977.

Ficley, W(1914): Improvements in reinforcing structures and wearing, asphalt, British patent No 11754, May 1914.

Gilebert G.T (1983) : extrait de revue « Béton de fibres » travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon.

Gopalaratnam et Shah (1986) : extrait de thèse de Houari . H (1993) Contribution à l'étude du comportement du béton renforcé de fibres soumis à l'action des charges maintenues et cycliques. Thèse de Doctorat, INSA ; Lyon

Graham . G(1911): Reinforced Concrete, US Patent No 983, 274 February 1911.

Graham, J. R. (1969): concrete performance in Yellowtail Dam, Montana, laboratory report N°. C-1321 U.S. Bureau of Reclamation, (Denver, Colorado, 1969).

Grieb (W.E (1958): Use of the swiss hammer for estimating the compressive strength of hardened concrete, public Roads, 30, N°. 2, pp. 45-50 (Washington DC, June 1958)

Hackman (1980) : extrait de revue « Béton de fibres » travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon

Hannant (1987) : « Fiber cement and fiber concretes » john Wiley and sons, ltd, New York, p213.

Hung, H. W. et Law, K. S. (1983): Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique, Concrete International, 5, N°. 10, pp. 42-9.

Jones, R. (1962): Non-destructives testing of concrete. Cambridge University Press, London, 1962, 104 pp

- Jons. R et Facaoaru, I. (1969): Recommendations for testing concrete by the ultrasonic pulse method. *Matériaux ET Constructions*, N°. 10, 1969, pp. 275-284
- Johanson et AL (1974): steel fiber reinforced mortar and concrete :review of Japanese society of civil engineers, JSCE-SF1 to JSCE-SF 7 methods of test for steel fibers reinforced concrete , concrete library of JSCE, NO 3 June 1974, PP45-74.
- Johanson et Colman (1974) : strength and deformation of steel fiber reinforced mortar in uniaxial tension”, American Concrete Institute Publication SP-44, 1974, pp 177-194.
- Kaxamura . (1984) : extrait de thèse de Houari . H (1993) Contribution à l'étude du comportement du béton renforcé de fibres soumis à l'action des charges maintenues et cycliques. Thèse de Doctorat, INSA ; Lyon
- Keiller A P. (1984): An investigation on the effects of test procedure and curing history on the measurement of concrete. Int. Conf; In situ / non-destructive testing of concrete. Detroit, American Concrete Institute, 1984
- Keer et Hannant (1986) : extrait de revue « Béton de fibres” travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon
- Krenchel H (1974) : extrait de thèse de Houari . H (1993) Contribution à l'étude du comportement du béton renforcé de fibres soumis à l'action des charges maintenues et cycliques. Thèse de Doctorat, INSA ; Lyon
- Kunio Nishioka et Al 1986 : extrait de revue «Béton de fibres” travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon
- Lankard, D and Sheets H : use of steel wire fibers in refractory castables, *Journal of the American ceramic society* vol 63, No 7, 1971.
- Leshchinsky A. (1991), Non-destructive methods instead of specimens and cores, quality control of concrete structures, In: *Proceedings of the International Symposium*
- Leslie, J.R. et Cheesman, W. J.(1949): An Ultrasonic method for studying deterioration and cracking in concrete structures. *Amer Concrete Inst, Proceedings*, Vol 46, sept 1949, pp. 17-36.
- Majundar A.J (1974): “Properties of fiber cement composite”; Fiber reinforced cement and concrete, *RILM Symposium*, 1974; pp 279-314.
- Majundar A.J and Nurse R.W , glass reinforced cement « current paper ep 79/74 ,building research establishment.
- Malhotra V. M. (1976): Testing hardened concrete: non-destructive methods. Monograph N°. 9. American Concrete Institute, Detroit, 1976, 188 pp
- Mellas. M (2003) : L'utilisation Du Microscope Electronique A Balayage Et Les Diffractions Par Rayons X Dans L'étude Des Ciments Et Bétons, Thèse de doctorat en génie civil. 2003

- Manday G. L. and Ravinda D. K. (1984): Assessment of in situ / non destructive testing of concrete, Ottawa ,Canada, Oct 1984.
- Martin, G, Method of forming pipes, US Patent NO 1 PP 633, 219, 21 June 1927.
- Masdar Helmi (1998) : Thèse D.E.A, Institut national de Lyon, 1998/1999.
- Millan 1982 : comportement du mortier renforcé de fibres en fonte amorphe » de G. Debecki Institut de Scherbook 1987.
- Neville A. M. (2000) : Propriétés des bétons. Eyrolles, Paris, 2000.
- Noiret Y (1983) : extrait de revue «Béton de fibres” travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon.
- Odelberg .G (1985): comportement du mortier renforcé de fibres en fonte amorphe » de G. Debecki Institut de Scherbook.
- Pachtchenko et Al (1978): extrait de revue «Béton de fibres” travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon.
- Paskova (1997): Extrait de thèse D.E.A Masdar Helmi, Institut national de Lyon, 1998/1999.
- Pachtchenko et Al (1980) : extrait de revue «Béton de fibres” travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon.
- Porter, H : Preparation of concrete from selection of materials to final disposition , journal of the American Concrete institute, Vol 6, 1910 p 269.
- Ramirez J. L. and Barcena K. M (1979): some data on concrete cores strength evaluation. Proceedings of Rilem,
- Ramakrishnan, V. et Wecharatana, M.(1989) fracture toughness of fiber reinforced concrete. Report of an Inter-University study sponsored by CMRC, ACI, and NSF Task group on CMRC/NSF Rescarch. ACI Committee 544- fiber reinforced concrete .December 1989,69 p.
- Ramkrishnan .V, Balaguru P., Kostaneski, et Johnston D.(1990): Field performance of fiber reinforced concrete highway pavements, serviceability and durability of construction matériaux- proceedings of the first materials engineering congress, ASCE, denver USA. p. 903-912.
- Romuald . J and Baston. G(1963): The mechanics of crack arrest in concrete, proceeding of the American society of civil engineers, June 1963, pp147-168.
- Romuald . J and Baston. G (1963): behavior of reinforced concrete beams with closely spaced reinforcement, journal of the American concrete institute, vol .60, No 6, June 1963, pp .775-789.
- Romuald . J and Mandel .J (1964): Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short length of wire reinforcements, journal of the American concrete institute, vol 61, No 6, June 1964, pp 657-671.

- Romuald . J and Al (1986): Prevention and control of cracking by use of short random fibers, journal of American concrete institute publication Sp-20, Paper No 10, 1986, pp179-203.
- Rosli, A. & Harnick, A.B.(1980) improving the durability of concrete to freezing and deicing salts, durability of building materials and components,ASTM STP-691,p.464-473
- Rossi (1994) :Les bétons de fibres ultra-hautes performances, Bulletin de liaison des Laboratoires des ponts et chaussées, no 196, p. 6 1-66
- Samarin, A. et Meynink, P. (1981): Use of combined Ultrasonic and rebound hammer method for determining strength of concrete structural members. Concrete International, March 1981.
- Shah S.P et Gopalaratnam V.S (1985) : « Effects of reinforcement on ductility of concrete » Proceeding of American Society of Civil Engineers : journal of the structural division, 1167,-1184, June 1985.
- Shigeyuki, Akihama et Al (1986) : Béton de fibres” travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon
- Skramtaev, B. G. et Leshchinsky, M.Y. (1966): Complex methods non-destructive tests of concrete in constructions and structural works. Matériaux et constructions, N°. 30, March 1966, pp. 99-105.
- Smith, W (1927): Ferroconcrete Construction, US Patent No 1, Pp349, 901, 21 June 1927.
- Steel B.R (1971) : Béton de fibres” travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon
- Sturup V.R, Vecchio F. J. et Caratin H. (1984): Pulse velocity as a measure of concrete compressive strength, in In situ/ non destructive testing of concrete, Ed, V. Mohan Malhotra, ACI SP-82, pp. 201-27 (Detroit, Michigan, 1984).
- Swamy, Mangat et Rao (1974): “The mechanics of fiber reinforced of cement matrices” , fiber reinforced concrete, American concrete institute Publication S.P, 991-28.
- Swamy .P.N et Theodropoulos (1981): extrait de revue « Béton de fibres” travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon
- Tattersal et Urbanouicz (1974) : extrait de revue « Béton de fibres” travaux de laboratoire des bétons et structures, Institut National des Sciences Appliquées , Lyon.
- Tanigawa, Y., Yamada, K. Kumagai, S. et Kosaka, Y. Estimation of strength distribution in concrete columns by Combined Non-destructive testing method of concrete, Trans. Of Japan Concrete Institute, Vol.3, (1982), pp.199-206.
- Venuat .M (1983) : Des fibres pour alléger et renforcer le béton , cahiers technique de bâtiment ,1983,N58 p59-70
- Whitehurst E.A. (1966): Evaluation of concrete properties from sonic tests, Monograph N°. 2. American Concrete Institute, Detroit, 1966, 94 pp)

Wearkley, B. (1912): Bonding means for reinforced concrete structure, US Patent No 1m 046m 913m 10 December 1912.

Willets C.H. (1958): Investigation of the Schmidt concrete test hammer, Miscellaneous Paper N°. 6-267 (U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss, June 1958)

Williams, J. F. (1936): A method for the estimation of compressive strength of concrete in the field. The structural engineer, Vol. 14, N°.7, July 1936, pp. 321-326.

Yamane, S. et Al. (1979): Concrete in finished structures, Takenaka Tech. Res. Rept. N°.22, pp.67-73 (Tokyo, Oct.1979).

Yin (1988): Extrait de thèse D.E.A Masdar Helmi, Institut national de Lyon, 1998/1999.

Zitkevic, N.(1983): Improvements in reinforced concretes, British Patent No 51, 5003, May 1983.

SOMMAIRE

	page
INTRODUCTION GENERALE	01
PARTIE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	03
CHAPITRE I : BETON DE FIBRES	04
I.1 Introduction	04
I.2 Historique du béton de fibres.....	04
I.3 Présentation du béton de fibres.....	08
I.3.1 La matrice.....	09
I.3.2 Les fibres – l’aspect géométrique.....	09
I.3.2.1 Rôle de la nature des constituants : fibres et matrices.....	13
I.3.2.2 Les différents type de fibres.....	15
I.3.2.2.1 Les fibres polypropylène.....	15
I.3.2.2.2 Les fibres d’amiante.....	16
I.3.2.2.3 Les fibres de verre	17
I.3.2.2.4 Les fibres d’acier	19
I.3.2.2.5 Les fibres de carbone.....	20
a) Procédé.....	20
b) Domaine d’application.....	21
c) Produits et matériels.....	21
I-3-2.3 Influence des propriétés mécaniques des fibres sur les composite	22
I.3.2.4 Le rôle de l’adhésion fibre – matrice.....	25
I.3.2.5 Les avantages et les inconvénients des fibres.....	28
I.3.2.6 Rôle des fibres dans le béton	29
I.3.2.7 La tenue de la fibre en milieu alcalin, condition de la durabilité du composite	32
I.3.2.8 La tenue de la fibre durant les opérations de mise en oeuvre	33
I.3.3 Formulation du béton de fibres.....	35
I.3.4.Comportement du béton de fibres vis-à-vis des actions thermiques.....	36
I.3.5 La mise en œuvre de béton de fibres.....	36
I.3.6 Propriétés des bétons de fibres	40
I.3.6.1 Propriétés mécaniques	40
I.3.6.1.2 Résistance à la compression	40
I.3.6.1.3 Résistance à la traction	42
I.3.6.1.4 Résistance en flexion	44
I.3.6.1.5 La ténacité.....	45
I.3.6.1.6 Résistance aux chocs	47
I.3.6.2 Autres propriétés du béton de fibres	48

a) Retrait	48
b) Comportement au fluage	49
I.3.7 Les avantages du béton de fibres par domaines d'applications	49
I.4 Conclusion.....	51
CHAPITRE II : LES ESSAIS NON DESTRUCTIVES.....	52
II.1 Introduction	52
II.1.1 Historique	53
II.1.2 Définition	53
II.2 Les méthodes d'essais	54
II.2.1 Essai au scléromètre.....	54
II.2.1.1 Introduction	54
II.2.1.2 Principe.....	55
II.2.1.3 Les étapes.....	57
II.2.1.4 Les avantages.....	58
II.2.1.5 Les inconvénients.....	58
II.2.2 Essai d'auscultation dynamique.....	59
II.2.2.1 Principe.....	59
II.2.2.2 La vitesse de propagation de l'ultrason.....	61
II.2.2.3 Manières de mesure.....	62
a - Mesures en transparence (directe).....	62
b - Mesures en surface (indirecte).....	62
c - Mesures semi directe.....	63
II.2.2.4 Les avantages.....	63
II.2.2.5 Les inconvénients.....	64
II.2.3. Méthodes Combinées	64
II.2.3.1. Introduction	64
II.2.3.2 Principe	56
II.2.3.3 Principe développement de corrélation entre les paramètres de la résistance et les résultats des essais non destructifs in-situ.....	66
II.2.3.3 Les avantages	67
II.2.3.4. Les inconvénients.....	68
II.2.4 Essai par carottage.....	68
II.2.4.1 Facteurs influençant la résistance des carottes.....	69
II.2.4.2. Diamètre.....	69
II.2.4.3. Elancement	70
II.2.4.4 Orientation de prélèvement.....	70
II.2.4.5 Résistances	71
II.3 Conclusion	72

PARTIE II : ETUDE EXPERIMENTALE	73
CHAPITRE III : MATERIAUX, MELANGES ET PROCEDURES	74
III.1 Introduction.....	74
III.2 Matériaux	74
III.2.1 Ciment	74
III.2.2 Granulats.....	75
III.2.2.1 Sable.....	75
a) Propriété physique du sable.....	75
III.2.3 Graviers	76
a) Propriété physique du gravier	77
III.2.4 Adjuvant.....	78
III.2.5 Les fibres.....	78
III.2.6 L'eau de gâchage.....	78
III.3 Mélanges.....	78
III.3.1 Codification des mélanges.....	79
III.3.2 Composition des mélanges.....	79
III.4. Procédure.....	79
III.4.1 Préparation du béton.....	80
III.4.2 Procédure des essais.....	80
III.4.2.1 Essai sur matériaux.....	80
III.4.2.2 Essai sur le béton durci.....	80
III.4.2.2.1 Résistance à la compression	80
a)- Par écrasement.....	80
b) Par la méthode combinée (La vitesse du son et Scléromètre).....	81
III.5 Présentation de travail in situ	82
III.6 Conclusion.....	82
CHAPITRE IV : RESULTATS ET ANALYSES	83
IV.1 Introduction.....	83
IV.2 Résistance et masse volumique	83
Commentaires.....	87
IV.3 La vitesse du son.....	88
Commentaires.....	94
IV.4 L'indice sclérométrique.....	95
Commentaires.....	102
IV.5 Relation entre la résistance et les résultats des essais non destructifs.....	102
IV.5.1 Relation entre la résistance et La vitesse du son.....	102
a)- Conditions de conservation.....	103
b)- Rapport E/C	107

c)-Pourcentage des fibres	111
IV.5.2 Relation entre la résistance et l'indice sclérométrique.....	112
a)- Conditions de conservation.....	113
b)- Rapport E/C	117
c)-Pourcentage des fibres	120
IV.5.3 L'expression combinée de la vitesse de son et l'indice sclérométrique	123
IV.5.4 Application et discussions des résultats in situ et résultats avec les expressions	125
IV.6 Conclusion.....	126
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS.....	127
Conclusion générale.....	127
Recommandations.....	129
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	130