

II.1.INTRODUCTION :

Les fibres végétales sont utilisées par l'Homme depuis très longtemps pour différents usages et pour la construction en particulier. Dans le cadre de développement durable, leur utilisation va très probablement croître et ce pour plusieurs raisons:

Les fibres végétales constituent une ressource renouvelable, leur production ne nécessite pas une haute technologie et peut avoir lieu dans les pays en voie de développement. Par ailleurs, si l'on tient compte du transport, leur prix est généralement équivalent à celui des fibres artificielles. Comme le kénaff, le jute, la ramie, et surtout le chanvre (filasse) et le lin, qui peuvent dans certains cas se substituer à la fibre de verre. L'utilisation des fibres de filasse comme renforts de matrices cimentaire semble beaucoup moins étudiés bien que ces fibres soient parmi les plus disponibles à travers le monde et qu'elles présentent de bonnes performances mécaniques.

Nous présentons dans ce chapitre une synthèse bibliographique sur les principaux concertes de la fibre avec ses enjeux et ses différent stratégies de mise en application.

II.2.GENERALITES:

II.2.1. DEFINITION DE FIBRE:

Une fibre est une formation élémentaire, végétale ou animale, d'aspect filamenteux, se présentant généralement sous forme de faisceaux.

II.2.2. DIFFERENTS TYPES DE FIBRE :

Il existe de nombreux de fibre qu'on peut regrouper en deux catégories selon leurs propriétés mécaniques ; les fibres organiques et les fibres non organiques.

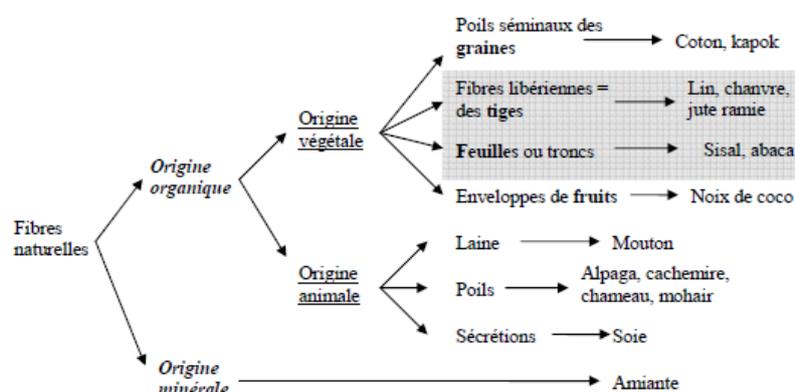


Figure II. 1: Les différents types de fibres naturelles. [20]

II.2.2.1 Fibre non organique :

Ce sont des fibres minérales telles que l'amiante, la céramiques, le carbone, le bore le verre, les fibres métalliques ; ces fibres ont une bonne résistance à la traction. [15]

La fibre la plus utilisée dans les bétons et mortier hydrauliques, ce sont les fibres métalliques disponibles dans une gamme étendue et sont classées en deux grandes familles, que se distinguent par leur fonctionnement.

II.2.2.2. Fibre organique : Elles se divisent en trois groupes**II.2.2.2.1 Fibre animales :**

- **Fibres d'origine animale (protéiques)**
 - Laine
 - ❖ Alpaga
 - ❖ Chameau
 - ❖ Cachemire
 - ❖ Guanaco
 - ❖ Lapin angora
 - ❖ Mohair
 - ❖ Vigogne
 - ❖ Yack
 - **Fibres d'origine minérale (silicatées)**
 - ❖ amiante
 - ❖ verre
 - ❖ fer/acier/inox
 - ❖ argent/or
 - ❖ cuivre
 - ❖ aluminium
 - ❖ tourbe

II.2.2.2.2 Fibre végétale :

- **Fibres d'origine végétale (cellulosiques) :**
 - Fibres principales :
 - ❖ Coton
 - ❖ Lin cultivé
 - ❖ Chanvre

- ❖ Ramie
- ❖ Jute
- Fibres secondaires :
 - ❖ Abaca
 - ❖ Alfa
 - ❖ Kapok
 - ❖ Coco
 - ❖ Genêt
 - ❖ Henequen

II.2.2.2.3. Fibre synthétiques :

- Fibres synthétiques d'origine organique
 - ❖ Polyamides
 - ❖ Polyesters
 - ❖ Chlorofibres
 - Acryliques, Modacryliques. Le polymère acrylique est obtenu par polymérisation de l'acrylonitrile ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CN}$).
 - Vinyliques: Le polymère vinylique est obtenu à partir de l'acétate de vinyle ($\text{CH}_3\text{COO}-\text{CH}=\text{CH}_2$) ; ce fibre à progressivement supplanté une fibre artificielle obtenue à partir de la cellulose et de l'anhydride acétique : l'acétate de cellulose.
 - Polypropylène, Elastodiène, Elasthane, Polyuréthane, Vinylal.
 - Aramide
- Fibres synthétiques d'origine minérale
 - ❖ Verre

Elle ces présentent des caractéristiques mécanique plus faible que celles du béton, mais, elles sont mieux adaptées au renforcement des sols ; notamment dans les corps de chaussées.

Les fibres sont présentées à l'état naturel un peu partout dans l'univers. Elles sont généralement l'ossature des végétaux (lin, coton...). On les rencontre aussi dans certains minéraux (amiante).

Bien évidemment l'homme par l'intermédiaire des industries fabrique de nombreuses variétés de fibres synthétiques, semi synthétiques, ou à partir d'éléments naturels mais ne possédant pas ces formes (nylon, fibre optique etc.).

Les fibres peuvent être classées selon leur origine, leur longueur, leur consistance ou même selon leur utilisation.

En général on distingue deux grandes familles : les fibres naturelles et les fibres dites " chimiques " mais le terme anglo-saxon de man-made fibres (fibres faites par l'homme) conviendrait mieux car toutes les fibres ont une composition chimique. Ainsi le coton est composé de cellulose exactement comme la viscose fabriquée par l'homme.

II.3.LA FILASSE :

Le béton de filasse, qui associe ces granulats végétaux légers à une matrice minérale généralement formulée à base de chaux aérienne, présente des propriétés d'usage intéressantes. Il permet notamment d'obtenir une conductivité thermique compatible avec une fonction d'isolation répartie et ses performances énergétiques pourraient être meilleures en raison d'un comportement hygrothermique spécifique mis en évidence dans de précédents travaux mais dont les mécanismes ne sont pas encore parfaitement connus

Le chanvre est une plante annuelle à croissance rapide, de 100 à 130 jours, pouvant atteindre Jusqu'à quatre mètres d'hauteur. Elle s'adapte à toutes les conditions géographiques grâce à un système racinaire profond de type pivotant. Le chanvre originel est dioïque : les fleurs mâles et femelles sont portées par des pieds distincts. De nos jours, le chanvre cultivé est monoïque. Les avantages sont une homogénéité de culture et une production de graines par chaque pied.



Figure II. 2 : Plante de chanvre.

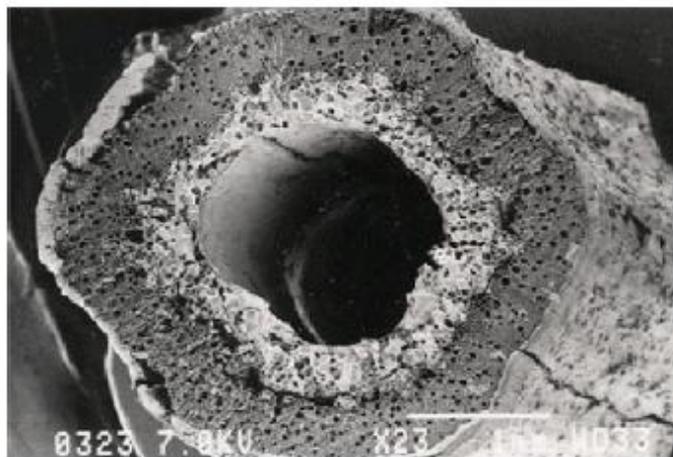


Figure II. 3 : Coupe d'une tige de chanvre [39].

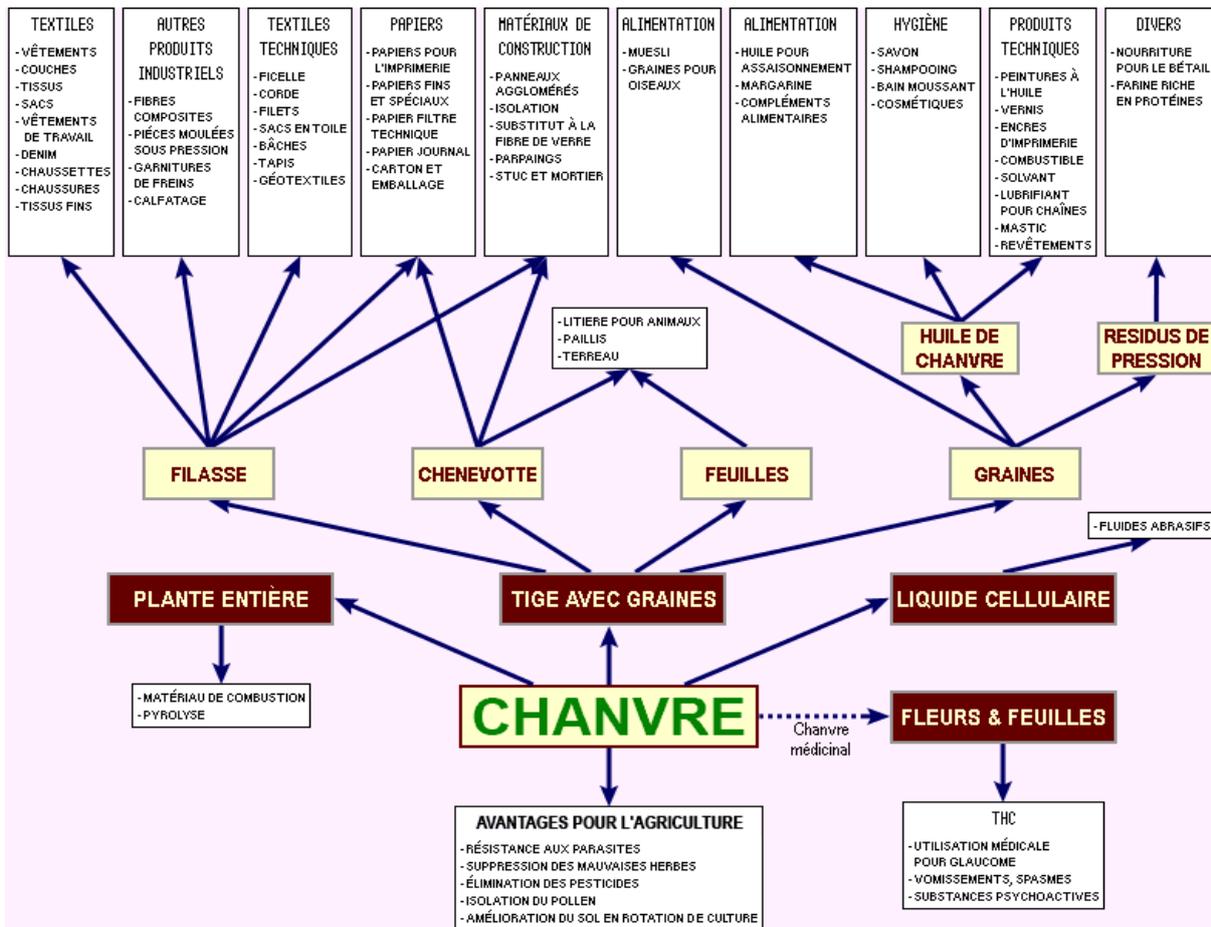


Figure II. 4 : Les constituants de chanvre.

II.3.1. UTILISATIONS :

Le Chanvre, est composé :

- de la chènevotte

Obtenue actuellement par défibrage mécanique à sec (et non par rouissage comme autrefois).

- de l'étope (ou filasse)

La fibre est très résistante et est utilisée pour les cordages, les toiles, les voiles de bateau, les sacs, le calfeutrage, la plomberie, le staff.

- du chènevis (les graines)

Pour l'alimentation animale, la pêche, l'oisellerie... Autres débouchés à réhabiliter (encore utilisés il y a à peine un siècle) : huile siccative pour les peintures, produits pharmaceutiques... de la sève, riche en silice, utilisée pour les abrasifs.

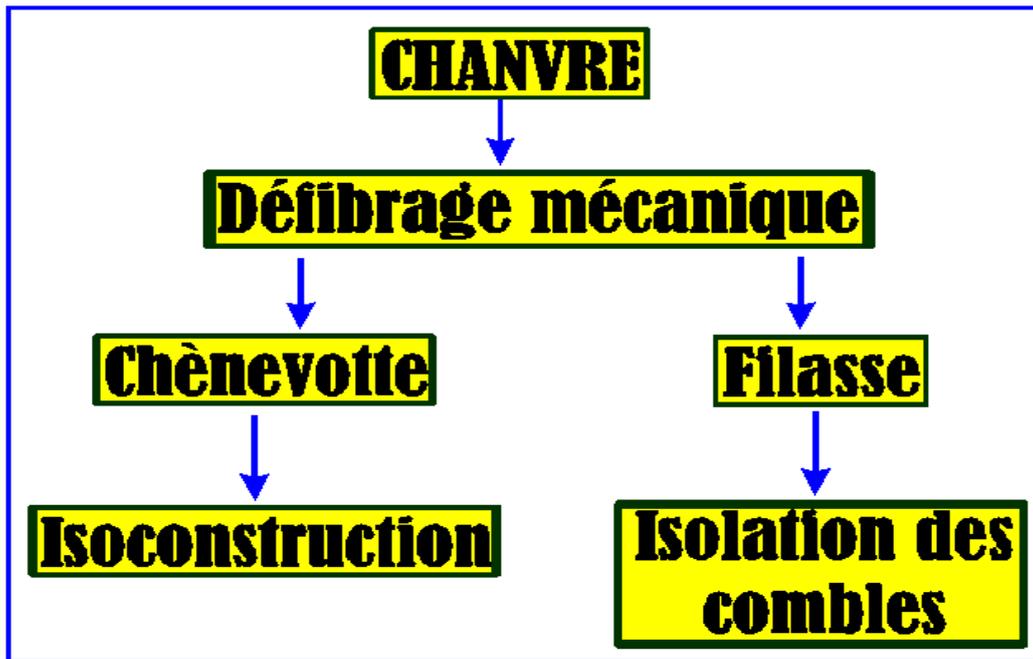


Figure II. 5 : Défibrage mécanique du chanvre.

II.3.2.PRODUIT OBTENUS ET USAGES :

Le teillage de la paille de fibre de lin aboutit à l'élimination des grains des poudre (poussières paillettes et épiderme des tiges) et des granulats (anas). Cette opération génère également des fibres [cm - mm] (étoupes brutes ou étoupes de teillage).

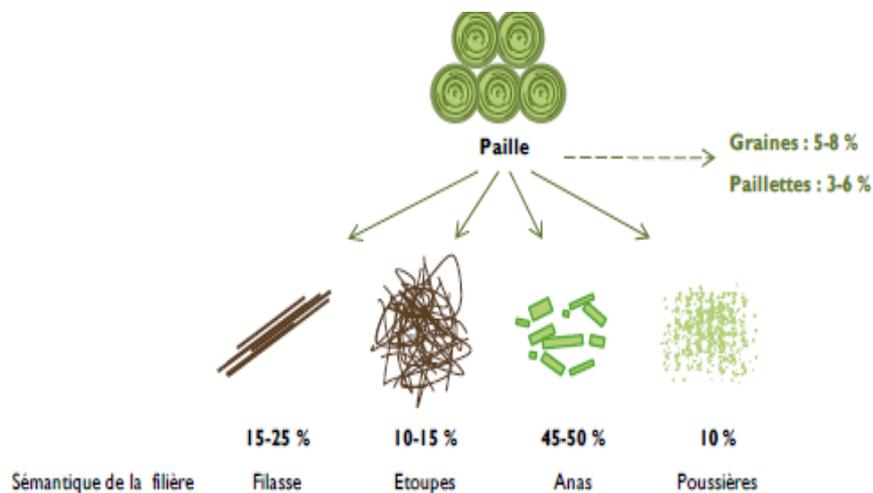


Figure II. 6: Produits et rendement suit à la 1^{ère} transformation des pailles de fibre de lin [18].

II.3.3. DEFINITION FILASSE:

La filasse désigne des fibres végétales comme le jute, le chanvre ou le sisal. Dans le secteur de la plomberie, la filasse, sorte de fil, est utilisée afin de réaliser l'étanchéité des raccords sur un circuit d'eau, particulièrement sur la tuyauterie en acier. La filasse alors constituée de chanvre s'emploie mélangée avec de la pâte à joints. Elle se pose sur les raccords fonctionnant à vis. Si la filasse est très efficace et assure une étanchéité parfaite, elle est principalement appréciée par les professionnels car elle peut être difficile à manipuler. Elle est généralement cylindrique.

La filasse est la composante de la tige trouvée dans l'écorce et Représente généralement de 30 à 35% de la masse totale de la tige. La Filasse est la fibre longue fibres végétales (chanvre, lin), de haute qualité, qui fait la réputation du Chanvre industriel dans les marchés des pâtes et papiers, du textile, des Cordages, et ainsi de suite.

Est utilisée pour des filetages de forme légèrement conique, par exemple un manchon à visser au bout d'un tube fileté.

Le joint fibre, de forme plate, se loge au fond d'un raccord et ne doit pas tourner pendant le serrage: c'est le cas d'un écrou avec collet battu. Le profil de ces filetages mâles ou femelle.



Figure II. 7:Fibres de filasse

II.4. BETON RENFORCE DE FIBRE :

II.4.1.ROLE DES FIBRES :

Lorsque les charges appliquées au béton s'approchent de la charge de rupture, les fissures se propagent parfois rapidement, la fibre noyées dans le béton permettent d'arrêter le développement de la fissuration,

Les barres d'armatures les aciers jouent un rôle analogue. Car elles agissent comme des fibres de grande longueur [13], [16], [11].

La fibre courte et discontinues ont cependant l'avantage de se mélanger et de se disperser dans le béton de façon uniforme les fibres sont ajoutées lors de la gâchée de béton .qui contient habituellement de ciment, de l'eau des granulats fins et gros.

Si le module élasticité de la fibre est élevé par rapport au module élasticité du béton ou du mortier. Les fibres reprennent un port des charges augmentant ainsi la résistance à la traction du matériau.

L'augmentation du rapport longueur diamètre de fibre accroît habituellement la résistance à la flexion et la ténacité du béton .les valeur de ce rapport sont généralement comprises entre 100et 200, car des fibres de trop grande longueur ont tendance à former des boules dans le mélange (formation d'oursins), créant ainsi des problèmes d'ouvrabilité.

En règle générale. Les fibres sont éparpillées ou hasard dans le béton, toute fois, si les fibres soient alignées dans la direction des contraintes en service, on obtient de meilleures résistances en traction et en flexion.

II. 4.2.DEFINITION DE BETON DE FIBRE :

On appelle béton de fibre, un béton dans lequel ou à incorporé une armature par inclusion directe de fibres isolées au moment du gâchage ou de la projection. Les fibre sont assimilables à un granulats spécial à forme très allongée et de forte résistance à la traction susceptible d'améliorer légèrement la résistance à la traction du matériau et de ralentir la propagation des fissures en pontant les fissure, fibre améliorent les comportement poste fissuration de la matrice et maintenant une forte portance pendant l'accroissement des déformations.

II. 4.3.ROLE DES FIBRES DANS LE BETON :

De l'ensemble des recherches effectuées, il est apparu que le rôle principale des fibre est des mieux contrôler la fissuration du béton en état de service en réduisant l'ouverture de

fissures et transformer le comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes [13],[16],[11] le béton présente toujours des microfissures dues différentes cause, le retrait , les contraintes thermiques ,les contraintes appliquées au jeune âge etc. dans le cas d'un béton fissuré, quant on exerce une traction sur la matrice les lignes de tension doivent s'infléchir parce que la charge ne peut être transmise par la fissure et la tension aux extrémités de la fissure augmentent [11]

La résistance à la traction relativement faible du béton est très rapidement atteinte, une fissure se crée et se propage sans empêchement (formation de la fissure imposante) et donne lieu à une rupture fragile dans le cas de béton de fibre, une partie de la force de traction peut être transmise à travers cette fissure par les fibres en assurant la couture figure II.8, il va de soi que mieux les fibres sont ancrées dans le béton et plus elles sont nombreuses. Plus grande sera leur efficacité.

La fibre à la traction ont donc, comme but principal de modifier la répartition des fissures, de les couvrir et par conséquent de rendre le matériau moins fragile et donc plus ductile (il faut plus d'énergie pour faire progresser la fissure) [16].et [26].

Les caractéristiques qui en résultent directement assurent meilleure résistance en traction et une meilleure résistance au choc ; parce qu'il reste une résistance résiduel la même. Après fissuration et cela contrainte à un béton non armé.

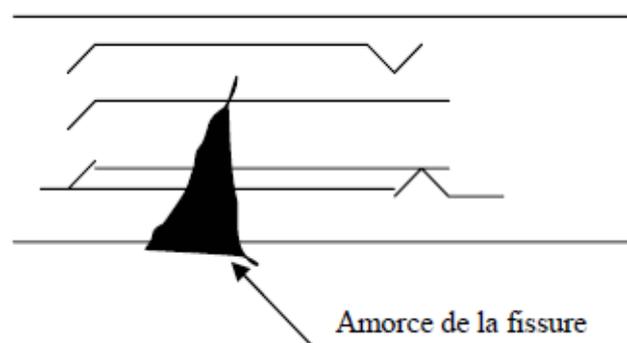


Figure II. 8 :La fonction des fibres dans une matrice. [12]

II. 4.4.MISE EN ŒUVRE DU BETON DE FIBRE :

Une mise en œuvre des bétons de fibre facile. Exige que le dosage en fibre ne peut en réalité dépasser certaines limites au delà des quelles le gâchage et la mise en œuvre deviennent impossible.

L'ouvrabilité dépend essentiellement du dosage en volume de fibre, de la forme et de l'élongation égale au rapport $\frac{l}{d}$ (longueur, diamètre). Pour avoir une mise en œuvre et une efficacité mécanique après durcissement, on se trouve contrainte de se limiter à une gamme de pourcentages que ne donne qu'une efficacité mécanique réduite mais qui permettent une mise en œuvre acceptable. [23]

II. 4.5.COMPORTEMENT MECANIQUE DE BETON DE FIBRE :

II. 4.5.1. Effet des fibres dans une matrice :

II. 4.5.1.1. Processus de fissuration dans le béton :

L'ors de la propagation d'une fissure dans le béton renforcé de fibre, le processus de fissuration doit être le suivant : la fissure qui se propage tout d'abord dans le béton est arrêtée par une fibre qu'elle rencontre figure II.9. a .l'énergie nécessaire pour rompre l'interface étant trop importante, la fissure repart derrière la fibre de sorte que celle-ci joue un rôle de couture de la fissure figure II.9. b.

Finalement la rupture de composition survient soit par arrachement soit par rupture de fibre figure II.9. c [17]

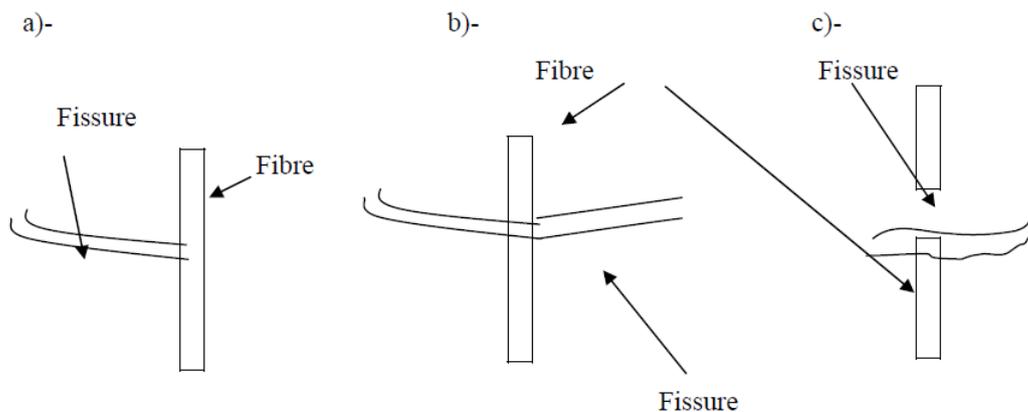


Figure II. 9: Effet d'une fibre dans la matrice [14]

P. Rossi a étudié l'apport de fibre à deux échelles différentes, celle du matériau et celle de matrice.

A l'échelle du matériau, la fibre intervient en cousant ou les microfissures créées dans la mesure où les fissures sont de tailles très réduites il est préférable pour assurer un pontage de chacun d'eux d'utiliser des fibres très courtes mais en très grand nombre.

Avec la localisation de la fissure, le comportement de matériau devient un comportement structural, Le rôle des fibres au niveau des microfissures s'apparente alors à l'action des armateurs passive dans une structure de béton armé.

Les fibres doivent avoir une longueur, Telle que la propagation des macros fissure pourra être limitée ou stoppée le plus longtemps possible (pour retarder la formation de la fissure magistrale et donc la rupture brutale).

II. 4.5.1.2 Effet de l'orientation et de l'espacement de faible :

Dans un béton fibré, la nature de l'orientation des fibres courtes constitue l'une des particularités essentielles des bétons renforcés des fibres. Halft et Haris remarquaient qu'un travail de rupture supplémentaire était nécessaire pour un pourcentage donné de fibre lorsque celle-ci sont orientée aléatoirement par rapport ou cas ou celles sont alignées

Ils concluaient de leur observation que ce travail de déformation plastique en cisaillement de fibre non alignée.

-Des concepts pavement géométrique sont rapidement devenus caducs car ils tiennent compte que de la géométrie propre des fibres, comme son élancement par exemple mais non du dosage en fibre.

Aujourd'hui cette notion d'espacement des fibres, ne constitue plus un paramètre d'étude des bétons renforcés de fibre et ne reflète par assez réellement l'association fibre-matrice.

II.4.5.1.3 Influence de l'adhérence fibre –matrice :

L'adhérence fibre – matrice est un facteur très important vis-à-vis de l'efficacité des fibres dans la matrice est assurée par trois liaisons :

- Une liaison élastique
- Une liaison de frottement
- Une liaison créée par un ancrage mécanique d'une fibre non rectiligne (crochets). Des essais d'arrachement par eurosteel, sur la fibre ondulée (1982), montrant que la résistance d'adhérence...Dépend de la teneur optimal en ciment dans la matrice, il existe une teneur optimal de ciment pour que la résistance d'adhérence atteigne sa valeur maximale, cette teneur en ciment et voisine de 400 à 500 kg/m.

II. 4.5.1.4 Influence de la géométrie de la fibre :

D'après quelque étude faite avec ce genre de fibre, il s'est avéré que seules les fibres munies de crochets ou ondulée (par exemple une fibre en acier tréfilé ondulé) ont révélé des caractéristiques remarquables d'ancrage.

Géométrie de la fibre

- $D=1\text{mm}$;
D : le diamètre de fibre.
- $L= 60\text{mm}$;
L : la longueur de fibre.
- Résistance de l'acier $\sigma_R=120 \text{ kg/ mm}$.
- Géométrie : 7 ondes réparties sur les 60mm.

Par le procédé d'ondulation, deux effets importants sont obtenus :

- L'énergie totale de rupture en traction de la fibre d'acier est multipliée par 2.5, si l'on prend comme référence de fil constitutif naturel, la plastification de l'ondulation libère une énergie bénéfique au béton.
- Les ondulations réparties sur toute la longueur de la fibre donnent naissance, dans le mortier d'enrobage de réaction de butées qui supposent ou déchaussement de la fibre. la tension d'extraction (pull out strength) ; suivant les compositions de mortier ou de béton, varie 60 à 90 kg /mm.

De nombreux essais de flexion sur plaque de béton révèlent un processus de fissuration progressif et une répartition de fissures bien meilleure ; après l'apparition d'une fissure, autres apparaissent encore dans son voisinage [25].

Suite à des essais d'extraction d'une fibre ondulée ancrée dans une matrice. Chevillard, G formule les observations suivantes :

- ✓ Les comportements sont totalement réversibles. Les déformations de la fibre et de la matrice sont entièrement compatibles.
- ✓ L'augmentation de l'effort sur la fibre produit un éclat de la matrice au niveau de la fissure par effet de bord.
- ✓ La fibre se trouve alors dégagée sur une longueur libre, simultanément le décollement de la fibre va se poursuivre jusqu'au décollement total, Cette phase peut engendrer des déplacements au niveau de la fissure de quelques

dixièmes de millimètre alors que extrémité ancrée de la fibre restée sensiblement immobile.

II.4.5.2. Classification des fibres végétales :

La classification des fibres végétales n'est pas aisée car il existe plusieurs critères de différenciation des fibres.

Suivant l'organe de la plante dont elles sont issues, les fibres végétales peuvent être classées en fibres de tiges (kénaf, jute, lin, ramie, etc.), de feuilles (sisal, abaca, paille de graminées, de fruits (noix de coco) et de graines (coton, kapok, etc.) ([21], [22]).

Suivant leur teneur en holocellulose (cellulose et hémicelluloses) et en lignine, on peut distinguer les fibres ligneuses (dures et rigides provenant de matériels ligneux tels que bois d'œuvre, résidus d'industrie du bois, etc.), les plus utilisées pour la fabrication des panneaux de particules, et les fibres non ligneuses (douces, souples, issues de végétaux non ligneux souvent annuels relativement moins riches en lignine tels que kénaf, chanvre, sisal, jute, lin, etc.) [20].

De par leur longueur, les fibres végétales peuvent être sériées en deux catégories : les fibres longues et les fibres courtes. Les fibres longues, dites libériennes, provenant de tiges et d'écorces de tiges de plantes annuelles sont douces. Par contre, les fibres longues lignocellulosiques issues de feuilles, de tronc d'arbres, d'enveloppe de fruits, etc., sont plus dures et rigides du fait de leur richesse en lignines. Les fibres courtes ou étoupes sont des fibres lignocellulosiques qui sont associées aux fibres longues.

Un cas particulier est celui des fibres longues des poils de la graine de coton qui sont monocellulaires et quasiment totalement cellulosiques.

II. 4.5.3. Morphologie de la fibre végétale :

Sur le plan morphologique, la fibre végétale présente une variabilité très importante en fonction de leur origine. En effet, les dimensions des fibres végétales dépendent de l'espèce et au sein de la même espèce, de l'organe de provenance, de l'état de maturité et aussi des conditions environnementales de croissance de la plante.

II.4.5.4. Les propriétés du béton renforcé par des fibres végétales :

II.4.5.4.1. Généralités sur les propriétés du béton de fibres végétales :

II.4.5.4.1.1. Propriétés à l'état frais :

L'ajout de fibres végétales à une matrice minérale conduit à une diminution de sa maniabilité, compensable par un ajustement du rapport E/L ou l'usage de super plastifiant ([24], [25]). Cette perte d'ouvrabilité est d'autant plus importante que la relation d'aspect (rapport de la longueur sur le diamètre des fibres) et le dosage en fibres sont importants [26].

La présence de fibres au moment du malaxage induit également une augmentation de la quantité d'air entraîné [27].

Enfin, plusieurs auteurs relèvent un retard de prise lié à l'incorporation de fibres végétales. Le retard de prise observé serait lié à la présence de sucres libres issus des fibres végétales. Fisher l'attribue plus précisément à la dégradation de carbohydrates solubles en acides sacchariniques, agents retardateurs de prise ([28] cité par [29], explication reprise par Reading pour lequel la prise du ciment serait inhibée par des oligosaccharides produits par la dégradation de l'hémicellulose en milieu alcalin ([30] cité par [31]). Govin [31] a étudié la modification des mécanismes d'hydratation d'un ciment portland en présence de peuplier, il note une action prépondérante du bois sur l'hydratation du C_3S et du C_2S . L'inhibition de la précipitation de la portlandite est d'après lui causée par l'acidification de la phase interstitielle par la présence du bois. Elle modifie également la polymérisation des C-S-H, notamment par création d'un gradient de rapport C/S entre la fibre de bois et la matrice.

Dans ses travaux sur le renforcement d'une matrice cimentaire par des fibres de chanvre, Sedan [29] conteste l'attribution du retard de prise à la seule présence de sucres neutres ou d'acides issus de la dégradation des fibres végétales. Il met en évidence la fixation des ions calcium par les pectines des fibres, mécanisme qui, d'après lui, inhibe la précipitation des C-S-H du fait de la trop faible concentration en calcium dans la solution interstitielle.

II.4.5.4.1.2 Propriétés à l'état durci

Comme dans les bétons renforcés conventionnels, les fibres agissent en limitant la Propagation et l'ouverture des fissures qui conduisent finalement à la rupture.

Les principales propriétés obtenues par incorporation de fibres végétales sont donc l'augmentation des résistances en traction, en flexion et au choc, la limitation de la fissuration au jeune âge par diminution du retrait plastique et l'amélioration de la ductilité.

Cependant, ces propriétés vont dépendre de nombreux facteurs, présentés dans le Tableau II.1 ci-après.

Tableau. II. 1: Paramètres influençant les propriétés des bétons à matrice minérale renforcés par des fibres végétale.

Facteur	Variable
Type de fibre	Noix de coco, sisal, bagasse, bambou, jute, bois... etc.
Géométrie de fibre	Longueur, diamètre, section, morphologie (boucles, crochets ...etc.)
Morphologie de fibre	Mono filamenteuse, faisceaux, frisotis, nœuds
Surface de fibre	Rugosité, présence d'agents de surface
Formulation de composite	Rapport E/L, super plastifiant, anti moussant, dosage en fibres
Méthode de malaxage	Type de malaxeur, séquence d'introduction des constituants, méthodes d'ajout des fibres, temps et vitesse de malaxage
Méthode de mise en œuvre	Vibration conventionnelle, égouttage sous vide, extrusion, projection
Méthode de moulage	Pression de moulage
Cure	Température, humidité.
Propriétés de la matrice	Type de ciment, nature et taille des granulats, adjuvants

Il est par conséquent difficile de comparer les résultats des travaux publiés tant le nombre de variables influençant les caractéristiques finales du béton est important. Nous présenterons donc seulement dans les deux parties suivantes quelques résultats significatifs en différenciant les bétons renforcés par des fibres transformées et ceux incorporant des fibres brutes.

II.4.5.4.1.3. Propriétés des Béton renforcés par des fibres végétales brutes :

Les études réalisées sur les matériaux à base de fibres végétales brutes mettent en évidence une modification du comportement mécanique du béton. Alors que la matrice cimentaire pure présente un comportement élastique linéaire fragile, les éprouvettes de béton fibré testées en flexion trois points conservent leur intégrité même au delà de la charge maximale, et continuent à supporter une charge significative dans la partie post-pic [27].

Ce phénomène est mis en évidence par la Figure II.10 représentant le comportement d'une matrice cimentaire pure et de la même matrice renforcée par 16% en volume de fibres de chanvre.

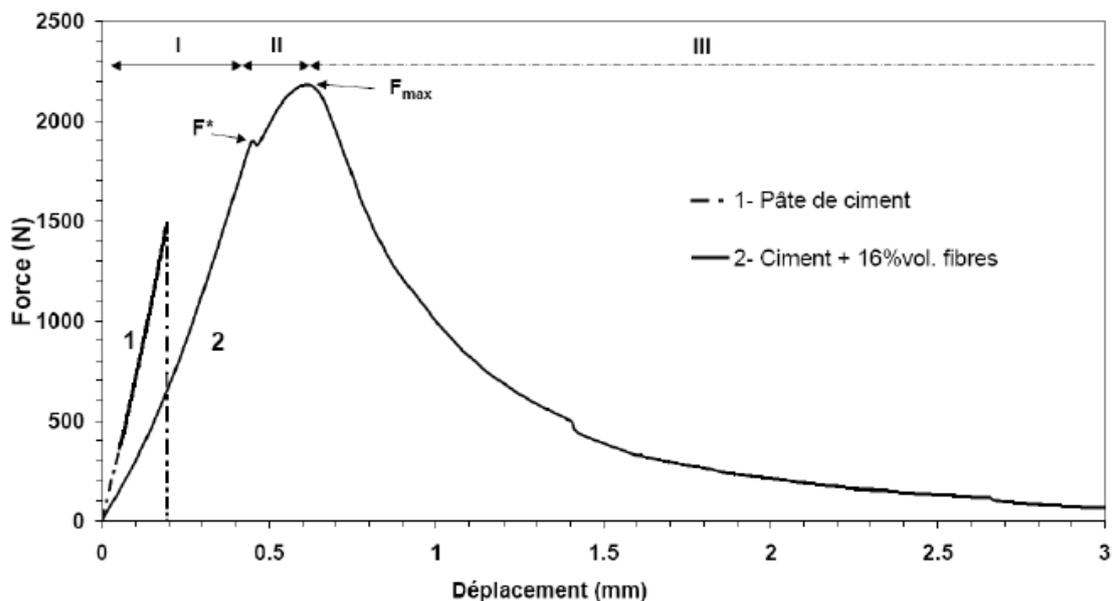


Figure II. 10: Courbes du comportement typique d'un échantillon de ciment pur (1) et d'un composite ciment/fibres de chanvre (2) en flexion 3 points. [18]

L'auteur [29] distingue trois phases dans le comportement du béton fibré :

- **phase I** : comportement quasi-linéaire proche de celui de la pâte de ciment seule, dans cette phase les efforts sont majoritairement repris par la matrice ;
- **phase II** : à partir de F^* apparition de la première fissure de la matrice, puis reprise de la charge par les fibres, qui, d'après l'auteur, limitent la propagation de la fissure par un effet de pontage ;
- **phase III** : au delà de F_{max} , diminution contrôlée de la charge contrairement à la pâte de ciment seule qui casse brutalement. L'auteur associe cette phase à une rupture progressive des interfaces fibres/matrice suivie d'un déchaussement des fibres.

L'incorporation de fibres végétales modifie peu la charge d'apparition de la première fissure, qui est liée principalement aux propriétés de la matrice, mais une fois la fissure apparue, les fibres limitent la propagation de la fissure [27].

Le passage d'une matrice fragile à un béton fibré ductile présentant un comportement post-pic adoucissant est relevé par tous les auteurs. Cependant, cette modification du comportement ne va pas forcément de pair avec une amélioration de la résistance en flexion [24], c'est pourquoi le paramètre prépondérant pour rendre compte de la contribution des fibres dans le comportement du béton est sa ténacité qui représente l'aptitude du matériau à absorber une certaine quantité d'énergie avant la rupture [26].

-Les performances du béton dépendent notamment du dosage et de la longueur des fibres.

Mansur et al [32] ont étudié le renforcement de mortiers de ciment par des fibres de jute (Figure II.11).

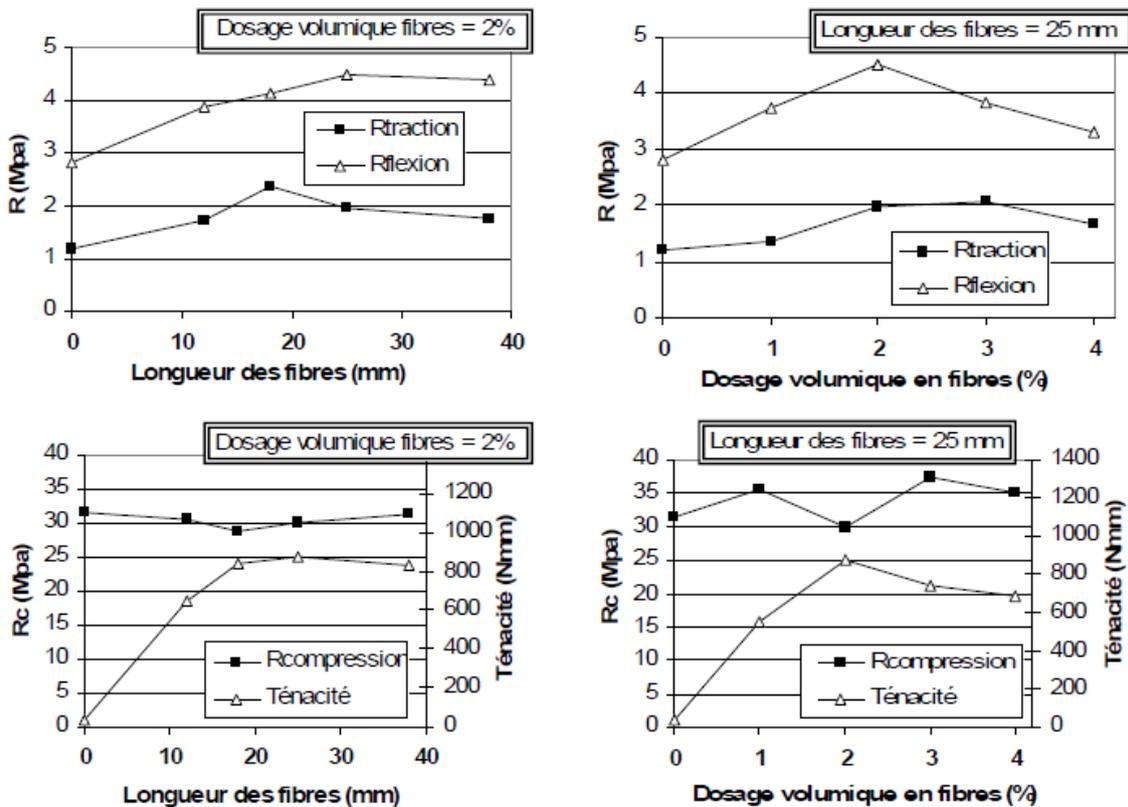


Figure II. 11: Influence du dosage et de la longueur des fibres de jute sur les propriétés du béton.

Les résultats de la Figure II.11 montrent que l'incorporation de fibres végétales permet d'améliorer les résistances en traction et en flexion ainsi que la ténacité du composite sans modifier fortement la résistance en compression.

Concernant la résistance en compression, ces résultats diffèrent de ceux de Kriker et al. [24] dont l'étude met en évidence une diminution de la résistance en compression avec l'augmentation du dosage en fibres et de la longueur des fibres. La résistance d'un béton renforcé par 2% en volume de fibres de palmier dattier de longueur 15 mm représente 90% de celle du béton non renforcé alors que celle d'un béton renforcé par 3% de fibres de 60 mm de longueur ne représente plus qu'environ 55% de celle du béton seul. L'auteur attribue cette diminution à l'augmentation du nombre de défauts et à la non-uniformité de la répartition des fibres.

On peut noter aussi sur cette même figure que les performances en flexion et en traction du béton sont dépendantes de la longueur et du dosage en fibres de jute. Dans un premier temps, plus la longueur des fibres est importante, plus les résistances en traction et en flexion ainsi que la ténacité du béton sont améliorées. Cependant, au delà d'une longueur critique (environ 25 mm) les propriétés n'augmentent plus. De la même manière, à longueur de fibres constante, l'augmentation du dosage en fibres de jute permettra l'amélioration des propriétés jusqu'à un certain seuil, ici environ 2 % en volume.

Cette limitation est attribuée par l'auteur au phénomène de « boulochage », c'est-à-dire qu'au delà d'une certaine longueur ou d'un certain dosage, les fibres ont tendance à s'entremêler en rendant plus difficile leur dispersion dans la matrice, elles restent regroupées en amas et la liaison à l'interface fibre/matrice est diminuée.

Le dosage optimal et la longueur optimale des fibres dépendent du type de fibres et de la méthode de mise en œuvre. Dans Gupta *et al* ([38] cité par [33]) étudient le renforcement d'une pâte de ciment par des fibres de noix de coco et relèvent une amélioration optimale des propriétés pour un dosage volumique de 4% et une longueur de fibres de 38 mm.

Sedan [29] quant à lui, obtient une amélioration optimale pour un dosage de 16% en volume de fibres de chanvre de longueur comprise entre 10 et 20 mm (voir **Figure II.12**).

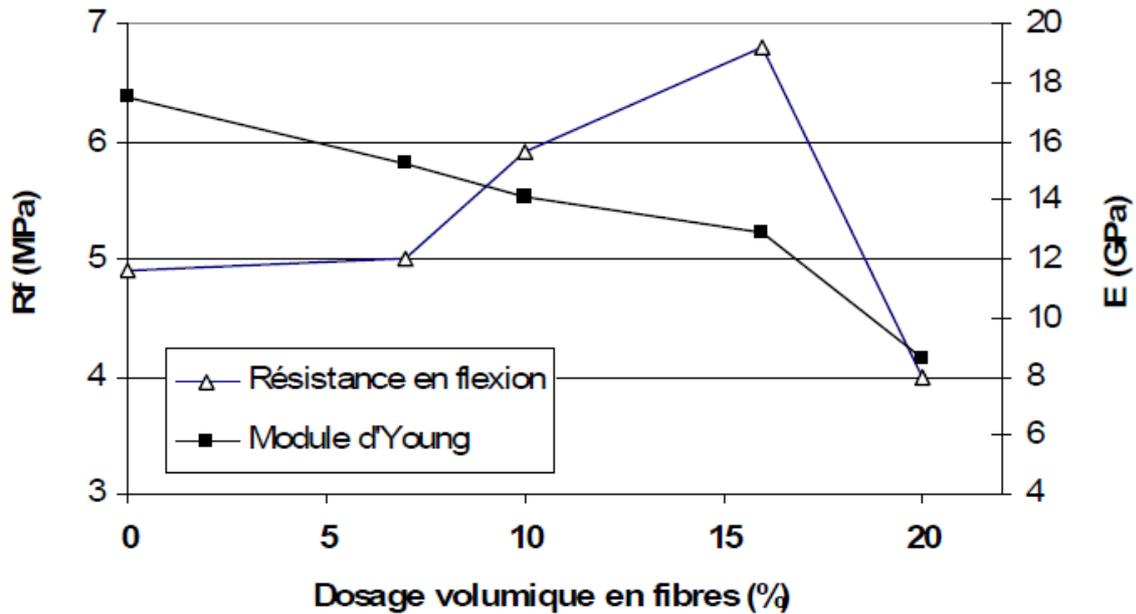


Figure II. 12: Evolution de la résistance en flexion et du module d'élasticité d'une pâte de ciment Renforcée par des fibres de chanvre en fonction de la teneur en fibres. [29]

Parallèlement à la résistance en flexion, Sedan a mesuré le module d'Young des différents mélanges par échographie ultrasonore en milieu infini. Il note que l'amélioration de la Résistance en flexion du béton s'accompagne d'une diminution de la rigidité du béton qu'il attribue à une augmentation de la porosité.

Outre les matrices cimentaires, certains auteurs ont travaillé sur le comportement mécanique des bétons de plâtre fibrés.

C'est le cas d'Hernandez-Olivares et al. [34] dont les travaux portent sur le renforcement d'une matrice de plâtre par des fibres de sisal. Comme pour les matrices cimentaires, la modification du comportement mécanique en flexion est nettement mise en évidence. La matrice de plâtre seule a un comportement élastique linéaire fragile. La chute de résistance est brutale et la rupture intervient immédiatement après l'atteinte de la contrainte maximale. Au contraire, sur la courbe contrainte/déplacement du béton (Figure II.12) apparaît une discontinuité, qui correspond à la rupture de la matrice puis une remontée de la contrainte correspondant à la reprise des efforts par les fibres qui jouent le rôle d'armatures reliant les deux surfaces de part et d'autre de la fracture.

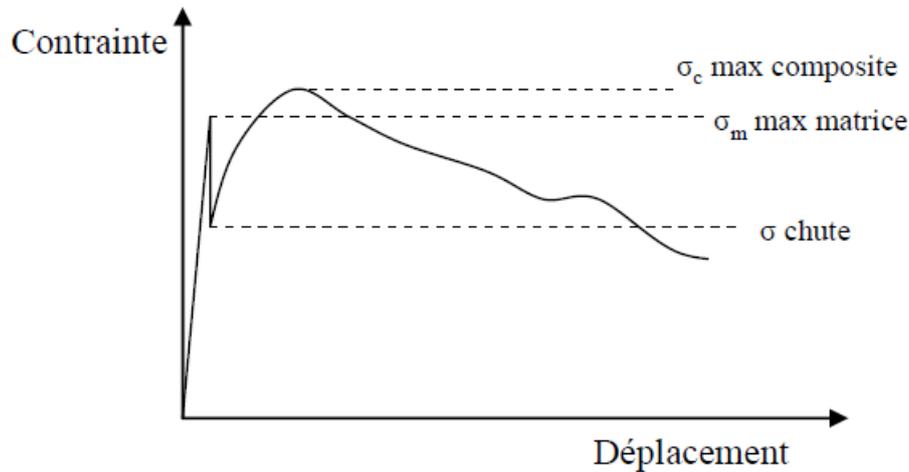


Figure II. 13: Courbe contrainte/déplacement type d'une matrice de plâtre renforcée par des fibres de sisal. [34]

Les auteurs ont défini trois contraintes caractéristiques de ce comportement, la contrainte maximale de la matrice, la contrainte maximale du plâtre fibres de sisal (qui peut être supérieure à la résistance résiduelle juste après rupture de la matrice).

Les mêmes auteurs ont réalisé différents mélanges en faisant varier d'une part la teneur en fibres (de 1 à 3% en masse) et la longueur des fibres (de 10 à 40 mm). Ils ont identifié l'influence de ces paramètres sur les contraintes caractéristiques définies ci-avant (Figure II.13)

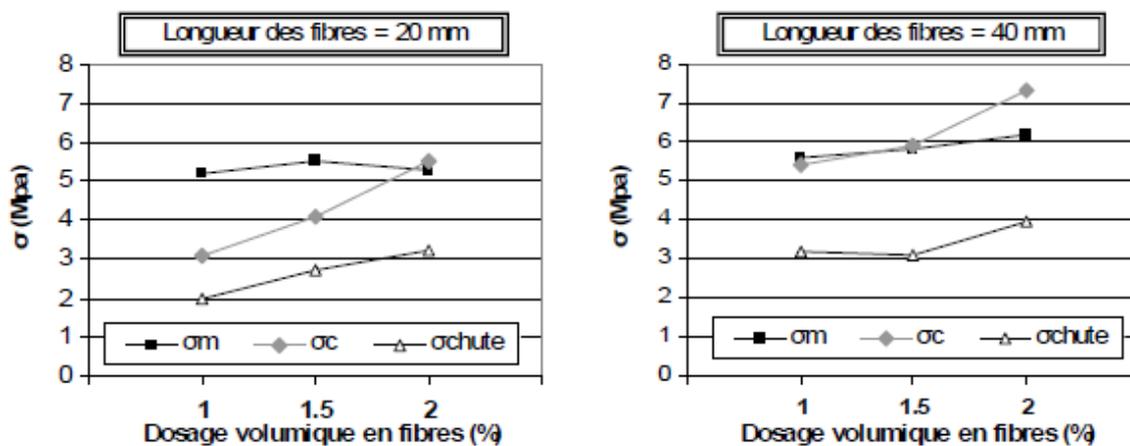


Figure II. 14: Influence du dosage et de la longueur des fibres de sisal sur les propriétés mécaniques en flexion des composites à matrice de plâtre [34]

Les résultats obtenus montrent que :

- la résistance maximale de la matrice σ_m reste quasiment constante quels que soient la Longueur et le dosage des fibres.
- la résistance maximale du plâtre fibrée σ_c augmente avec la longueur et le dosage en fibres. Pour la longueur et le dosage en fibres maximaux (40 mm et 2%), la résistance en flexion du composite surpasse de 18% environ celle de la matrice seule ;
- la résistance σ_{chute} augmente également avec le dosage en fibres et la longueur de ces dernières.

Cette dernière observation avait également été faite par Castro [25] sur des mortiers de Ciment renforcés par des fibres d'agave le chuguilla et maguey. Pour des bétons renforcés par 5% en volume de fibres, un comportement semblable à celui présenté (Figure II.14) était observé. En revanche, pour des dosages supérieurs (de 7 à 11%), σ_{chute} augmentait et devenait même supérieure à σ_m .

En ce qui concerne l'amélioration de la résistance en flexion du béton, on constate dans les travaux d'Hernandez-Olivares qu'elle n'est pas systématique puisque finalement, seule la résistance du mélange avec des fibres de 40 mm dosées à 2% surpasse celle de la matrice pure. Encore une fois le paramètre qui rend compte le plus précisément de la modification du comportement en traction par l'incorporation de fibres s'avère être la ténacité. Dans ses travaux, elle augmente avec la longueur des fibres, elle est ainsi trois fois plus élevée pour les bétons renforcés avec les fibres de 40 mm que pour ceux renforcés avec celles de 20 mm, et ce quel que soit le dosage. A longueur constante, la ténacité augmente avec le dosage en fibres.

L'incorporation de fibres végétales dans une matrice fragile permet également d'améliorer sa résistance à l'impact. L'étude de la résistance au choc de mortiers de ciment renforcés par des fibres végétales de coir, sisal, jute et hibiscus menée par Ramakrishna [35] conclut à des performances 3 à 18 fois plus élevées pour les matériaux renforcés que pour la matrice pure.

Ces propriétés rendent les bétons à base de fibres végétales particulièrement intéressants Pour les petits éléments préfabriqués pour lesquels des désordres accidentels causés par des Impacts génèrent beaucoup de perte [27]. Savastano et al. [36] ont par exemple Travaillé sur des tuiles renforcées par des fibres de sisal et d'eucalyptus dont la ténacité atteint 148 J/m² tandis que celle de la matrice pure était de 56 J/m².

Outre l'amélioration du comportement du béton en flexion et au choc, on peut trouver dans la littérature des travaux faisant état d'une limitation du retrait plastique par l'incorporation de fibres végétales.

Le retrait plastique correspond à la variation dimensionnelle qui intervient dans tous les matériaux à base de ciment à l'état frais, pendant les premières heures qui suivent la mise en place. Dans le cas où le retrait est empêché, le phénomène conduit au développement de contraintes dans le ciment et à la création de fissures. Cette fissuration précoce peut conduire, à terme à la dégradation des ouvrages notamment lorsqu'ils sont exposés à des cycles d'humidification/séchage ou de gel/dégel.

Afin d'identifier l'influence des fibres végétales sur ce phénomène, Toledo Filho et al [37] ont réalisé des mesures de retrait libre et empêché. Ils concluent que l'incorporation de fibres de sisal limite le retrait plastique libre et ce d'autant plus que le dosage en fibres est important. L'addition de 0.2% de fibres en volume réduit le retrait libre de 23 à 34%.

Concernant le retrait empêché, l'incorporation de fibres de sisal et de coco permet de retarder l'apparition de la première fissure, le délai passant de 90 minutes pour la matrice pure à 180 minutes pour la matrice renforcée. Elle permet également de contrôler l'ouverture de la fissure par la suite. Ce phénomène est attribué par l'auteur au module d'élasticité plus élevé des fibres ainsi qu'à l'effet de couture des fissures par les fibres qui empêchent leurs ouvertures au jeune âge.

Enfin, l'étude de Toledo Filho et al démontre que les fibres végétales facilitent l'autocicatrisation des fissures. En effet, les fibres sont des éléments poreux à fort pouvoir absorbant qui lient les deux surfaces de la fissure, facilitant ainsi le dépôt de nouveaux produits d'hydratation qui conduisent à la fermeture de la fissure.

II.4.5.4.2. Evolution du comportement en compression des bétons renforcés par des fibres Végétales :

Nous avons mis en évidence l'amélioration du comportement en flexion de la matrice par incorporation de fibres végétales. Il faut néanmoins également contrôler leur influence sur la performance en béton qui, d'après certains travaux, pourrait en être affectée, les résultats de la bibliographie restant contradictoires à ce sujet. Ainsi, alors qu'Aziz et al. [27] ne relèvent pas ou peu d'influence de l'incorporation de fibres de jute dans un mortier de ciment, Kriker et al. [24] observent une diminution de la résistance en compression d'un béton renforcé par des fibres de palmier dattier.

Les résultats obtenus sur les éprouvettes conservées en extérieur en conditions non contrôlées ne permettent pas de distinguer d'effet significatif de l'incorporation des fibres végétales sur la résistance en compression du béton.

Les résultats pour les éprouvettes conservées à l'intérieur, en conditions d'humidité relative contrôlée ($HR > 95\%$) sont présentés sur la (Figure II.15).

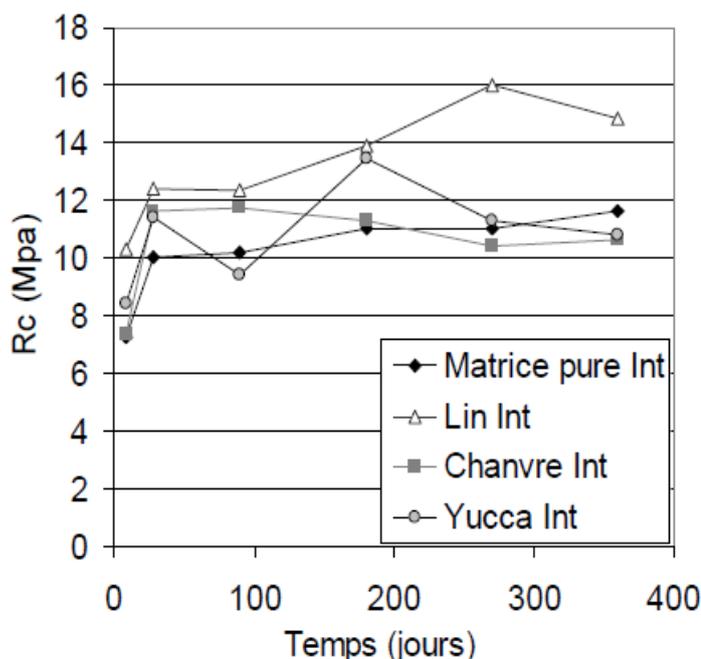


Figure II. 15: Evolution de la résistance en compression des éprouvettes de matrice pure et de Béton renforcés par 1% de fibres de lin, chanvre ou yucca conservées en ambiance contrôlée ($HR > 95\%$).

On note une augmentation des performances entre 9 et 28 jours pour tous les mélanges. Ce résultat est en accord avec la cinétique d'hydratation et de gain de résistance de la matrice.

Au-delà de 28 jours, on relève, pour les bétons renforcés par des fibres de yucca, une évolution irrégulière des performances. Nous avons relevé la forte teneur en éléments ligneux de taille importante dans ces fibres. Ils pourraient induire la formation de points faibles, de défauts dans la matrice, ce qui expliquerait son hétérogénéité et la dispersion expérimentale des résistances en compression de ce béton fibré.

Le renforcement de la matrice par des fibres de chanvre et de lin ne semble pas, quant à lui, pénaliser sa résistance en compression.

Pour les bétons renforcés par des fibres de chanvre, on peut dire que la résistance en compression est du même ordre de grandeur que la matrice pure.

Pour les bétons renforcés par des fibres de lin, les résultats mettent en évidence une amélioration significative de leur performance en compression pour les échéances les plus longues. Après 1 an de vieillissement, le béton fibré à base de lin présente une résistance en compression de quasiment 15 MPa, tandis que la performance de la matrice témoin et du béton renforcé par les fibres de chanvre atteignent respectivement 11.6 et 10.6 MPa

Cette amélioration peut être corrélée, dans le comportement en flexion, à l'augmentation de la résistance au pic des bétons renforcés par des fibres de lin. Le mécanisme de couture des microfissures de la matrice pourrait également expliquer la légère amélioration de la d'après cette revue bibliographique, l'incorporation des fibres végétales à une matrice minérale permet donc d'obtenir un matériau aux propriétés améliorées particulièrement en termes de comportement mécanique en flexion. Cependant, les résultats rapportés dans cette partie ont été obtenus à court ou moyen terme. Or, comme nous allons le voir dans la partie suivante, les chercheurs ont rapidement souligné le problème de la durabilité des fibres végétales dans une matrice alcaline et celui des pertes de performances résistance en compression

II.5.CONCLUSION :

Nous avons acquis dans ce chapitre des connaissances sur les différents types des fibres végétales conventionnels ainsi que ses domaines d'application et la diffusion de son utilisation, par la suite nous allons voire l'identification des matériaux de notre étude qui sont étudiés dans laboratoire du génie civil au niveau de l'université de Tiaret. Sachant que notre matériau d'étude est un béton fibré par la filasse.