

Un concept de sections minces en béton renforcé de fibres

Per-Anders Johansson

Sektionen för Väg & Vattenbyggnad
Avdelningen för bärande konstruktioner
Lunds Tekniska Högskola
Box 118
221 00 Lund

Department of Civil Engineering
Division of Structural Engineering
University of Lund
Lunds Tekniska Högskola
Box 118
221 00 Lund
Sweden

UN CONCEPT AVEC DE SECTIONS MINCES EN BETON RENFORCE DES FIBRES.

An application with Fibre reinforced cementitious composites.

av

Johansson, Per-Anders

1997

ABSTRACT: Development of concrete formulation reinforced by non-corrosive fibres, to realise thin sections. The mechanical properties were tested in the goal to evaluate an idea of application, which is a prefabricated sandwich-element integrating thermic isolation for external walls.

Rapport TVBK-5089
ISSN 0349-4969
ISRN: LUTVDG/TVBK--5089 --SE

Examensarbete

Handledare: Sven Thelandersson

September 1997

Projet de TFE avril-juin 1997.

Élève ingénieur à Ecole Centrale de Lyon, 1996/97

réalisée à DGCB, ENTPE, Vaulx en Velin.

Remerciements

Je donne un grand merci à Monsieur Gilles CHANVILLARD, mon tuteur pendant cette projet, pour son accueil chaleureux, son attention et pour la bonne coopération pendant ce projet.

Je vais également remercier Odile ROQUE et Bruno DI PIO, personnel de laboratoire à DGCB (Département Génie Civil de Bâtiments), qui m'ont aidé pendant le travail pratique dans le laboratoire.

Mes remerciement s'adresse aussi à mes amis Cyril JACOLIN et Eric BOILLOT qui ont fait de lecture chorégraphiques de mes rapports.

RÉSUMÉ	1
ABSTRACT (RÉSUMÉ EN ANGLAIS).....	4
PRÉSENTATION DU PROJET.....	6
OPTIMISATION DE LA MATRICE CIMENTAIRE.....	7
DOSAGE EN MICROFILLER.	7
PROPORTION SABLE / FINES DES MATRICES FIBRÉES.	9
<i>Matrice avec Fibraflex.</i>	9
<i>Matrice avec les fibres de 3M.</i>	10
PANNEAUX POUR DES MURS EXTÉRIEURS.....	13
NOTRE IDÉE DE PANNEAUX.	13
<i>Isolation thermique.</i>	15
LA FONCTION DE RAIDISSEUR.	16
<i>Déformation à cause de température.</i>	16
<i>Calcul de coût.</i>	18
LA FABRICATION.....	19
COMPORTEMENT MÉCANIQUE.....	20
ESSAIS DE COMPRESSION.....	20
ESSAI DES FLEXION SUR LES PLAQUES.	20
<i>Fibraflex</i>	21
<i>Les fibres synthétiques de 3M.</i>	22
ESSAI DES FLEXION SUR LES PANNEAUX.	22
<i>Fibraflex</i>	23
<i>Les fibres synthétiques de 3M.</i>	23
ANALYSE COMPARÉE DU COMPORTEMENT DE PLAQUE ET DE PANNEAUX	24
MODÉLISATION PAR UNE LOI IDÉAL ÉLASTO-PLASTIQUE PARFAITE.....	26
OUVERTURE DE FISSURE CRITIQUE.....	26
CALCUL DE MOMENT EN SUPPOSANT UN MODÈLE ÉLASTO-PLASTIQUE PARFAIT.	27
<i>Comment passer de $w_{critique}$ à \mathcal{E}.</i>	28
LES CHARGES SUR DE MURS EXTÉRIEUR.....	30
LE REMPLISSAGE ET L'ORIENTATION DES FIBRES.....	32
CONCLUSION	33
"LEARNING BY MISTAKE"	34
DE TRAVAIL QUI RESTE A FAIRE.....	34
BIBLIOGRAPHIE.....	35

Résumé

D'examiner la possibilité de réaliser de sections minces en béton renforcé des fibres et évaluer une idée concret d'application a été l'objectif de cette projet. Notre idée est une panneaux préfabriqué pour des murs extérieur, qui intègre l'isolation thermique. Nous proposons un élément sandwich fait d'une plaque de polystyrène extrudé entre deux couches de béton de sable renforcé de fibres. Deux différents types de fibres ont été utilisés, une fibre métallique "Fibraflex" et une fibre plastique "3M polyolefin Fibers". Il a été intéressant d'analyser le comportement de cette fibre synthétique qui est nouvelle sur le marché, est qui a surtout un prix moins élevé. Nous avons choisi de travailler avec un béton de sable comme base. Il s'agit d'un béton dont le plus gros granulat est le sable mais dont le dosage en ciment est du même ordre de grandeur que dans les bétons ordinaires.

La premier étape a été de développer de matrices cimentaires avec une consistance tellement fluide toute en évitant de phénomène de ressuage et de séparation du béton. L'optimisation a été fait en deux étapes, premièrement s'agit d'une optimisation de la pâte (ciment, filler, microfiller et eau) suivant par des essais sur des matrices complet ou nous avons aussi intégré le sable et les fibres. Nous sommes arrivés à trouver des matrices, pour les deux bétons avec les fibres différentes, qui avaient une bonne maniabilité.

Quand nous avons trouvé nos formulation des bétons, nous avons poursuit à la fabrication. Deux prototypes de panneaux, en petite taille (600 x 260 x 100 mm), avec chacun des nos deux bétons renforcé par des différentes types des fibres ont été fabriqué. Nous avons au même temps fabriqué, des plaques des dimensions 540 x 140 x 30 mm et des cylindres avec pour des essais mécanique.

Sur les plaques est les panneaux des testes en flexion ont été réalisé. Nous avons pu constater que le béton renforcé par les fibres synthétique de 3M n'arrive par au même performance de la résistance à la flexion, que les fibres métalliques.

En réalisant une coupure sur les prototypes de panneaux, nous avons pu évaluer le remplissage et aussi étudier l'orientation des fibres. Avec les deux types de béton avec les fibres différentes nous avons obtenu un bon remplissage. Les fibres ont un clair tendance de s'orienter dans la direction du flux de remplissage du béton. Ce phénomène peut être un potentiel pour obtenir d'orientation favorable par une méthode de remplissage choisi mais ça représente aussi une risque de créer involontairement de zone de faiblesse par une mono-orientation des fibres. Dans un panneaux nous avons pu constater que les fibres suivi la surface de la fissure de rupture.

L'idée d'un panneau "sandwich" avec du béton renforcé de fibres intégrant une isolation thermique a été évalué en considérant le point suivants:

- Satisfaction du besoin d'isolation thermique pour un mur extérieur
- Aspect de fabrication et remplissage de sections minces
- Résistance à des charges extérieures
- Coût

Par des calculs j'ai montré que le besoin d'isolation thermique peut être satisfait avec des éléments d'au moins 10 cm d'épaisseur totale. La fabrication des prototypes a montré que l'on peut obtenir un bon remplissage de sections mince. J'ai trouvé qu'avec le béton renforcé de Fibraflex, il est possible de réaliser des panneaux, dans des dimensions commerciales

d'aujourd'hui, qui résiste aux charges extérieures. Le calcul simplifié de comparaison de coût de matériaux entre nos panneaux et un panneau homogène avec armature classique montre que notre concept peut devenir concurrentiel.

Les résultats majeurs de ce projet de TFE sont résumés dans les points suivants :

- Nous avons pu développer des matrices cimentaires avec une maniabilité permettant un bon remplissage de sections minces.
- La nouvelle fibre synthétique de 3M n'est pas une alternative aux fibres métalliques quand on veut obtenir de valeur élevée sur la résistance mécanique.
- Notre concept des panneaux intégrant l'isolation thermique, est réalisable en utilisant du béton renforcé par des fibres métalliques..

Abstract (Résumé en Anglais)

This is project, done as an exam-work in my engineering studies. My specialisation is civil engineering and I have during this project worked with fibre reinforced cementitious composites. My goal has been to develop concrete formulation with a good workability that admit you to produce thin components with concrete reinforced by two different types of fibres. One is a metallic fibre, called Fibraflex and the other one is a new synthetic fibre developed by the company 3M. A certain interest was to investigate the mechanical potential with this new fibre. We have also evaluated an idea of an application, which is a sandwich element for external walls integrating the thermic isolation. The elements consist of a polystyrene plate with a thin covering of fibre reinforced concrete. We have worked with a sand-concrete, that will say a mix there the largest aggregate is sand but there the quantity of cement is the same as in a normal concrete.

The first step was to develop the concrete compositions that was quit fluent without a liquidated surface or separation of the mix. The optimisation was done in two phases, first we worked on the paste (cement, filler, microfiller and water) and then we continued with the completes mixes there we also integrated sand and fibres. We managed to find formulations, for the two different types of concrete reinforced by different fibres, with a good workability.

When we have find our recipes of concrete, we continued with the fabrication of elements for our tests. Two prototypes of our wall-element in small tail (600 x 260 x 100 mm) was fabricated with each of our two different types of concrete. At the same moment we also fabricated plates with the dimensions 540 x 140 x 30 and cylinders to use in completing mechanical tests.

With the plates and prototypes we made flexural strength tests. There we could see that the concrete with the new synthetic fibre didn't have the same strength as the concrete reinforced with metallic fibres.

We made some cuts through our prototypes to check if the concrete had well filed up the sections. A good packing with no empty area was what we found. In the surface of this cuts it was also possible to study the orientation of the fibres and we noted that they follows the direction of the concrete fluid that was created during the fabrication. This behaviour could probably be used to create an orientation advantageous for the mechanical properties. But it exist also a risk that you involuntary create a weak region with an unlucky mono-orientation of the fibres. We saw that in one of our prototype there you find the fibres on the surface of the failure crack.

The idea with a sandwich element with thermic isolation has been evaluated in regarding these aspects :

- Satisfying the demand of thermic isolation.
- Aspect de fabrication and concrete refuelling in thin sections.
- Mechanical resistance to dimensional forces on a wall.
- Costs.

By calculations I have shown that the demand of thermic isolation for French climate conditions could be satisfying with an element with an thickness of 10 cm. The fabrication of prototypes has shown a good refuelling in thin sections. My testes has given the conclusion the mechanical properties, for a concrete with the metallic fibre are sufficient for an element in an external wall. The simplified cost calculation has shown that this idea can be competitive to an prefabricated element with traditional armature.

The main results from this project can be resumed in these points :

- We have been able to develop formulations of concrete reinforced by fibres with a workability that make it possible to realise thin sections.
- The new synthetic fibre developed by 3M is not an alternative to metallic fibres when you need a good flexural strength.
- The idea with a sandwich element which integrate the thermic isolation could be realised if you use concrete reinforced by metallic fibres.

Présentation du projet.

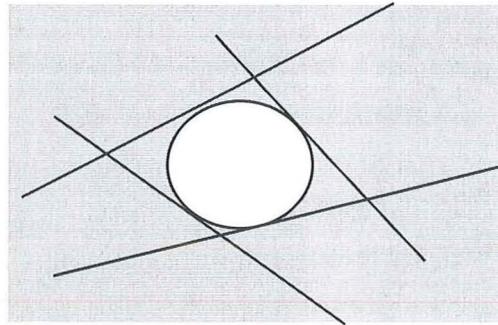
Mon projet de TFE est de tester et d'évaluer la possibilité de réaliser des éléments de bâtiments de sections minces en béton renforcé de fibres. Pour vous qui n'est pas familier avec les principes de renforcement de béton par des fibres, je vous propose de commencer avec mon report d'Etudes trimestriel, qui a été un étude bibliographique préparatoire pour mon TFE. Vous le trouvez dans l'annexe de cet document.

La première partie de mon travail a été de développer des matrices cimentaires susceptibles de permettre la réalisation de sections minces. Il faut que le béton soit suffisamment fluide tout en restant homogène, c'est à dire éviter les phénomènes de ressuges et de séparation des fibres. En travaillant sur cette problématique j'ai eu pour but d'envisager une application qui est un panneau "sandwich" consistant d'une plaque de polystyrène entourée par du béton. Par ce concept, nous voulons obtenir un élément préfabriqué pour des murs extérieurs, qui satisfait les critères d'isolation thermique. Un autre avantage de ce concept est la possibilité d'obtenir de bonnes surfaces qui ne requièrent pas de traitements particuliers. Pour évaluer l'intérêt de cette idée dans la pratique, des calculs de coûts ont été faits, ainsi que des calculs d'isolation thermique. Nous avons fabriqué des prototypes qui étaient des panneaux de petites tailles (0,6 x 0,26 m). Ceux ci ont subi des tests mécanique pour voir si la résistance de ces matériaux est suffisante pour supporter des charges dimensionnantes types. Les prototypes ont aussi permis d'examiner le bon remplissage des sections minces

Deux différents types de fibres ont été utilisés, une fibre métallique "Fibraflex" et une fibre plastique "3M polyolefin Fibers". Il a été intéressant d'analyser le comportement de cette fibre plastique qui est nouvelle sur le marché et n'avait jamais été testée en France auparavant.. Le premier intérêt de ces fibres réside dans son prix, moins élevé que les "Fibraflex".

Optimisation de la matrice cimentaire.

Un béton de sable a été choisi dans le cadre de cette étude. Il s'agit d'un béton dont le plus gros granulat est le sable mais dont le dosage en ciment est du même ordre de grandeur que dans les bétons ordinaires. Deux raisons motivent ce choix de travailler avec une matrice de granulats fins. D'une part, pour obtenir un matériau homogène dans des sections minces, il faut que la taille des granulats ne soit pas trop importante. D'autre part, la longueur des fibres doit être telle que le renforcement est plus efficace si on arrive à entourer les granulats par des fibres et tout en étant limité par les contraintes d'encombrement géométrique.



Notre béton de sable renforcé de fibres est alors constitué de trois tailles de graviers (sable, filler et ciment, microfiller), d'eau et des fibres. Un adjuvant superplastifiant a aussi été utilisé, pour permettre la défloculation des fibres. Une optimisation de la formulation en deux étapes a été faite dans le but de trouver un mélange assez "liquide" pour obtenir un bon remplissage des moules. En même temps il faut faire attention aux phénomènes de ressuage et de ségrégation. La ligne directrice qui a été suivie dans la démarche de formulation est basée sur une notion d'optimisation de la compacité. Dans un premier temps, nous avons optimisé la formulation de la pâte, c'est à dire du mélange ciment, filler et microfiller et eau en présence bien sûr du superplastifiant.

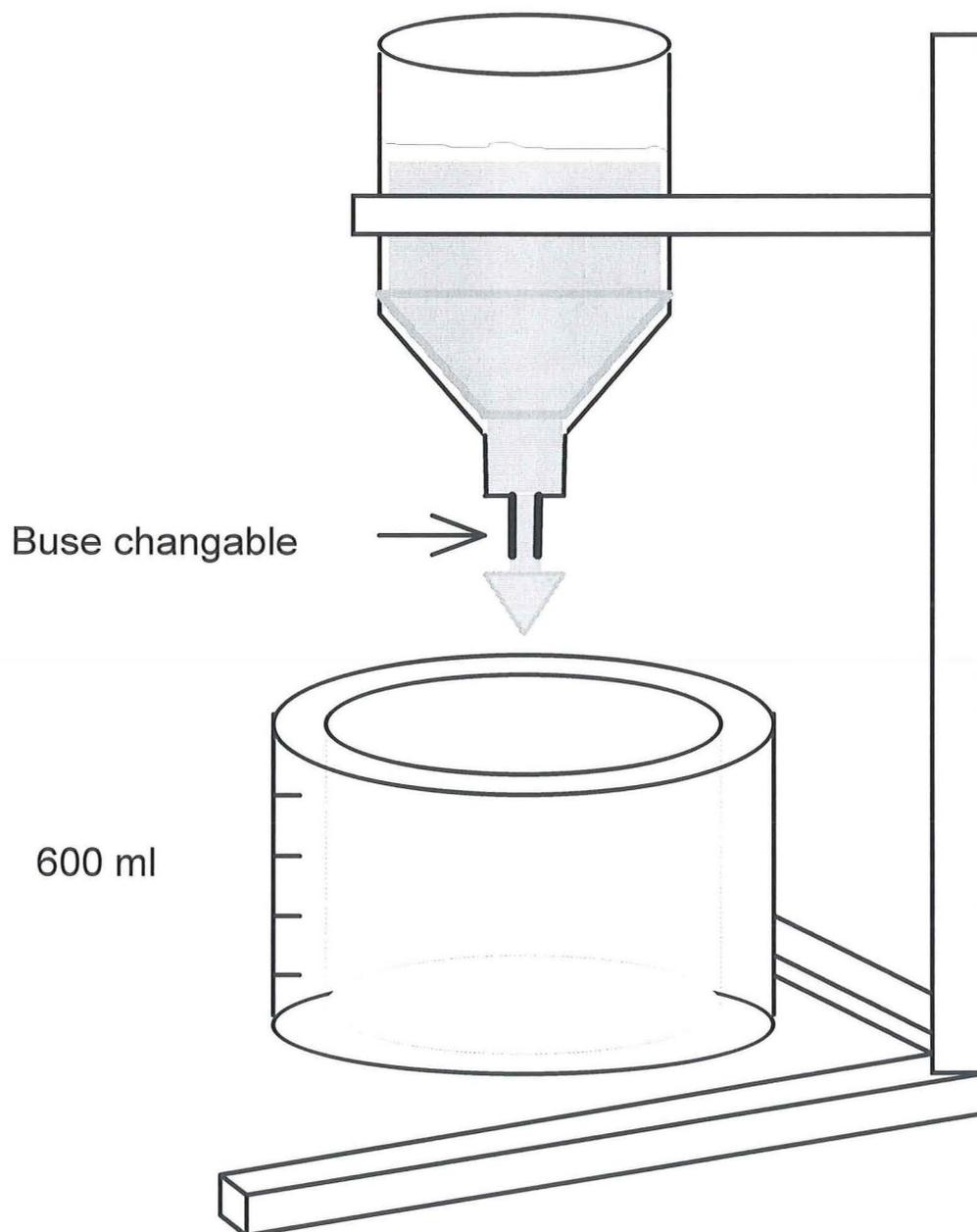
Dans un deuxième temps le mélange sable/fibres/pâte a fait l'objet d'une optimisation sur un critère d'ouvrabilité.

Dosage en microfiller.

Des travaux antérieurs sur la formulation du béton de sable avaient permis d'optimiser la compacité des matrices. En constatant que le ciment et le filler calcaire ont des granulométries comparables, ces deux composants jouent un rôle complémentaire vis à vis de cette compacité. Par suite, seul le dosage en microfiller, de granulométrie plus fine, permet d'optimiser la compacité : par des mesures de demande en eau, il a pu être établi que le dosage optimal en microfiller était de $\frac{3}{7}$ du dosage en filler et ciment.

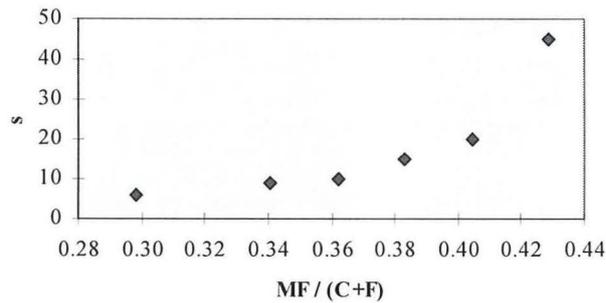
En pratique, les bétons de sable formulés sur cette base présentent un caractère visqueux assez prononcé qui nuit à sa mise en oeuvre et piège une quantité d'air importante. Pour corriger ce comportement, nous avons décidé de réduire le dosage en microfiller, au profit de l'eau afin de vérifier s'il existe un seuil de compacité qui provoque l'effet de viscosité.

Pour trouver ce seuil, nous avons travaillé à volume constant, en partant d'un mélange de base dans lequel nous avons successivement remplacé le microfiller par le même volume d'eau. Les essais ont été faits à l'aide d'un cône de March. Cet essai consiste à chronométrer le temps nécessaire pour l'écoulement d'un volume imposé de coulis à travers une buse. Le montage est illustré dans le dessin suivant:



Un litre de pâte a été fabriqué pour mesurer le temps d'écoulement de 600 ml par le cône. La dimension de la buse a été choisie pour obtenir un temps d'écoulement initial raisonnable (45 s), susceptible de nous permettre de détecter le seuil. Les formules utilisées dans cette série d'essais sont rappelées dans l'annexe et les résultats obtenus sont illustrés sur le graphe suivant:

Essais de cône



Nous pouvons constater que les variations de consistance sont moins importantes quand le rapport microfiller/(ciment+filler) est inférieur à environ 0,38. Nous avons adopté comme point "critique" le rapport 0,36. Il semble donc bien exister un effet de seuil qui correspond probablement au moment où l'eau remplit bien les espaces libre et le microfiller, ainsi que les autres fines, conserve une certaine mobilité avec des frottements réduits entre les particules.

Proportion Sable / fines des matrices fibreés.

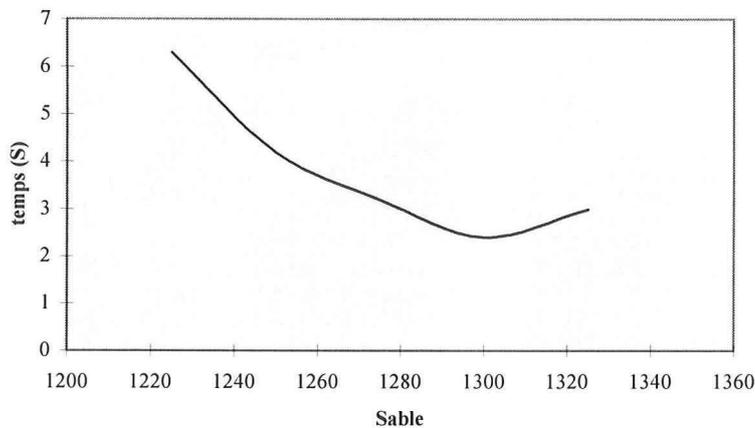
Après l'optimisation de la pâte, nous avons attaqué la deuxième étape, en intégrant le sable et les fibres dans le béton. Nous avons effectué différents types d'essais afin de qualifier la capacité d'écoulement : finalement c'est le maniabilimètre qui a été retenu. Ces essais ont été faits également à volume constant, en remplaçant progressivement le volume de sable par de la pâte (ciment, filler, microfiller). Le principe de cette démarche consiste à dire que le mélange le plus ouvrable est le mélange qui présente la compacité optimale. En fait, seuls deux dosages sont fixés, celui de l'eau et celui des fibres. En faisant varier les proportions sable/fine, nous recherchons les dosages qui conduisent à un empilement optimum, c'est à dire où l'eau nécessaire au remplissage de la porosité de l'empilement est réduite au maximum. Par suite, l'excès d'eau par rapport à cette eau de remplissage permet une dilution des grains et donne l'ouvrabilité.

Matrice avec Fibraflex.

Les fibres métalliques utilisé dans le cadre de ce projet s'appelle Fibraflex et sont produites par l'entreprise SEVA, filiale de St. Gobain. Ce sont des fibres de fonte amorphe ayant une bonne tenue à la corrosion, adaptée à une utilisation dans les milieux cimentaires. On peut pratiquement dire que c'est un matériau inoxydable. Leur défaut est leur coût élevé de l'ordre de 35 Fr./kg. La forme des fibres est rectangulaire avec une épaisseur très faible (30 μm). Nous avons utilisé la type FF20E6, qui a une longueur de 20 mm et une largeur de 1,6 mm.

Les fibres ont été dosées à 0,75 % volumique, dosage qui a déjà fait l'objet d'une optimisation dans le cadre du projet "Eléments minces de bâtiments en béton de sable renforcé de fibres de fonte amorphe" réalisée à l'ENTPE¹.

Les résultats obtenus dans la démarche d'optimisation sont illustrés sur le graphe suivant et l'ensemble des données est reporté en annexe;



Nous constatons qu'il existe bien un optimum où le béton est le plus ouvrable. Nous retenons cet optimum pour la formulation finale de notre matrice, soit le tableau suivant. Précisons que nous avons pu constater visuellement que cette matrice présentait une belle homogénéité et aucun signe de ressuage n'a été aperçu.

Constituants Béton (kg/m³)

Sable 0/5	1300
eau	201
microfiller	203
filler	217
ciment	347
superpl.	24.9
Fibres Fibraflex	54

tableau: formulation finale du béton avec les fibres métallique.

Matrice avec les fibres de 3M.

Le deuxième type de fibres utilisé dans le cadre de ce projet est une fibre synthétique fabriqué par 3M. A base de polyoléfine, les fibres sont droites avec une section globalement circulaire. Dans notre cas, la longueur est de 25 mm avec un diamètre de 0,38 mm. Cette fibre a surtout été essayée en faibles dosages pour éviter la création de fissures dues au retrait initial. Dans ce projet, nous avons voulu examiner leur potentiel mécanique. En effet il est bien connu que les fibres organiques, du fait de leur faible module d'élasticité par rapport au béton, présentent peu d'intérêt mécanique. Notre intention a alors été de travailler avec un fort dosage en fibres afin de mobiliser au maximum un comportement "post-pic". Précisons que dans les études auxquelles nous nous sommes référés, le dosage était limité à 1,5 %. Nous avons essayé des formulations avec différentes quantités de fibres, jusqu'à 3,5 %. Nous avons constaté que le béton a une bonne maniabilité avec des dosages inférieurs à 3,0 %. En intégrant plus de fibres, le comportement change substantiellement et les mélanges deviennent moins fluides. Pour satisfaire un bon remplissage des sections minces nous avons décidé de retenir un dosage volumique de 3 % pour ces fibres 3M.

Pour optimiser la formulation de la matrice, nous avons là encore procédé à une série d'essais en faisant varier le dosage en sable par rapport au dosage en pâte. (le volume d'eau et le volume de fibres étant imposés). Les résultats de cette optimisation sont illustrés par la figure suivante et le dosage critique en sable est de l'ordre de 1400 kg/m^3 .

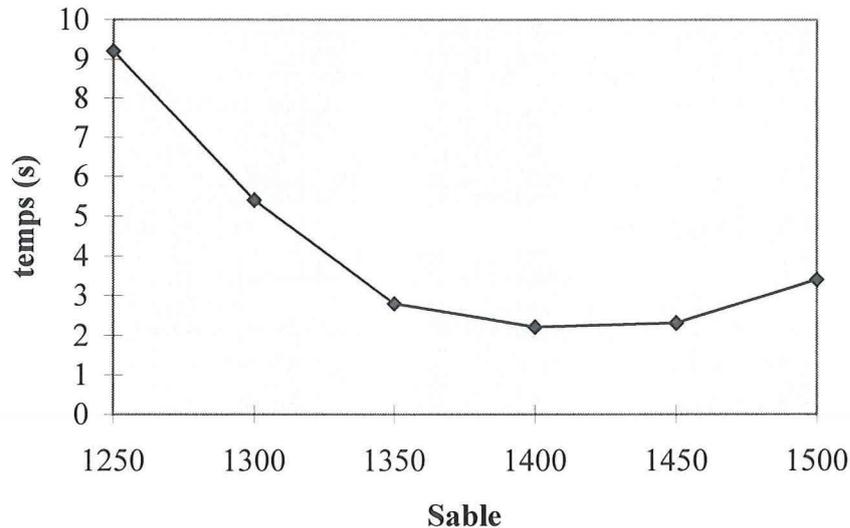


Figure 1

Ce mélange à base de fibre 3M a demandé plus de sable que le mélange avec les fibres de fonte amorphe. Ce résultat nous a semblé contradictoire à ce que nous pouvions attendre, en augmentant le dosage en fibres. Par expérience de la formulation des bétons de fibres ordinaires avec de gros granulats, plus le dosage en fibres augmente, plus le dosage en gros granulat est réduit et plus le dosage en sable augmente. Il existe donc une forte interaction entre les fibres et les granulats. Dans notre cas, le plus gros granulat est le sable et il faut donc analyser l'interaction fibre/sable.

En considérant le fait que la forme des deux types de fibres est différente, nous observons que le rapport surface/volume est sept fois plus élevé pour les fibres fibraflex que pour les fibres de 3M, ce qui fait que la surface totale des fibres 3M est moins élevée même en augmentant le dosage volumique par quatre, par rapport à la fibre fibraflex. Ainsi, par analogie avec le rôle des gros granulats dans les bétons, nous sommes amenés à conclure que les fibres fibraflex sont équivalentes à un granulat de dimension plus petite que le granulat équivalent des fibres de 3M; Ceci respecte la remarque sur la surface spécifique et est cohérent avec l'évaluation du dosage en sable.

Même si nous trouvons l'extremum vers 1400 kg/m^3 , le choix a été fait d'utiliser une formule avec 1350 kg/m^3 afin d'éviter des problèmes de ressuage. Cette tendance a pu être observée pour les mélanges avec les plus grandes quantités de sable. La formulation finale choisie est la suivante.

Le rapport E / C est le même dans les deux bétons avec les différentes fibres.

Constituants	Béton (kg/m ³)
Sable 0/5	1350
eau	193
microfiller	188
filler	191
ciment	333
superpl. (extraits sec)	23,1 (9,24)
Fibres 3M	27,4

tableau: formulation finale du béton avec des fibres 3M

Panneaux pour des murs extérieurs.

Dans de différents types de bâtiments, des panneaux préfabriqués sont utilisés dans les murs extérieurs. C'est une méthode de construction qui a certains avantages comme des courts délais de production sur chantier avec une diversité de formes et des surfaces architecturales intéressantes.

Voici un extrait d'un document d'information édité par la "Centre d'informations sur le ciment ses applications", CIMbéton², décrivant les différents types de panneaux :

Les façades sont constituées de panneaux, en béton préfabriqués autoporteurs formant bardage, peuvent être disposés en position verticale ou horizontale.

Les fonctions que les panneaux vont assurées concernant;

- La stabilité mécanique sous les sollicitations normales dues au poids propre des panneaux, aux déformations imposées par les phénomènes thermiques, climatiques et de retrait;
- la tenue aux chocs mécaniques;
- l'étanchéité à l'air et à la pluie;
- l'aspect extérieur de la construction;
- la contribution à la satisfaction aux exigences hygrothermiques, acoustiques et de résistance au feu.

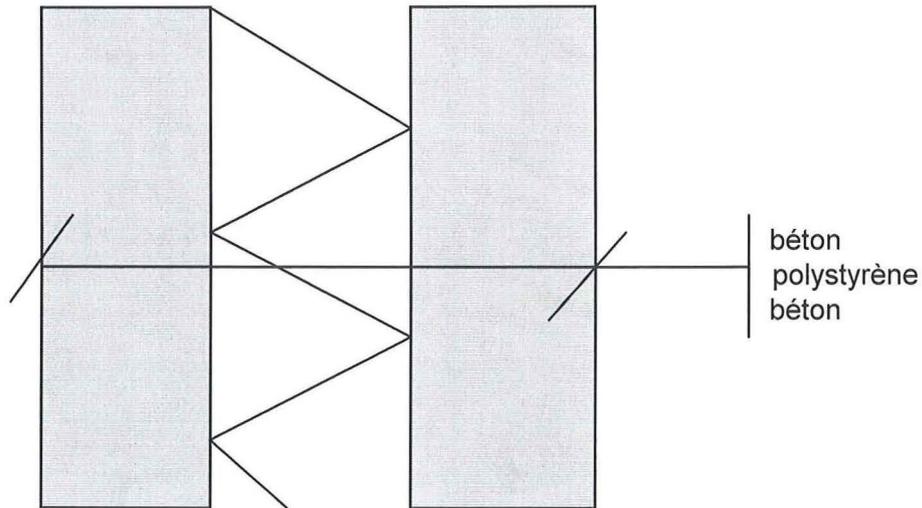
Dans leur principe, les panneaux peuvent être :

- des panneaux sandwichs à voiles de béton liés rigidement par des nervures en béton armé.
- des panneaux sandwichs lourds à voile extérieur librement dilatable.
- des panneaux composites à base de béton de granulats légers.
- des panneaux de type plaque pleine ou nervurée en béton ordinaire.
- des panneaux alvéolés de béton.
- des panneaux alvéolaires de béton cellulaire

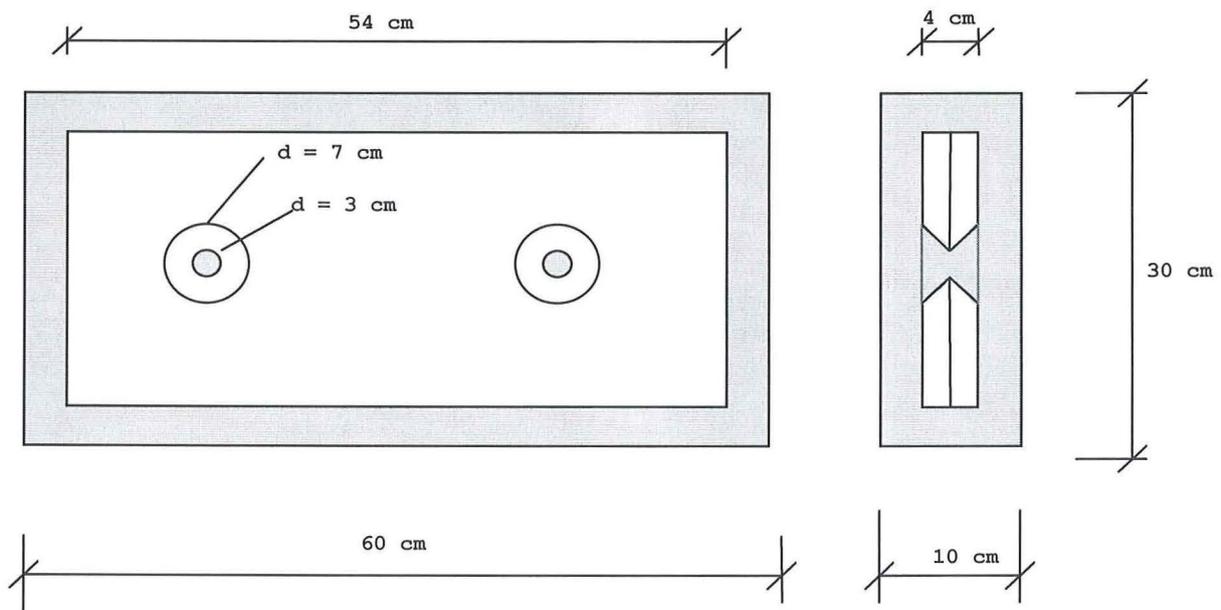
Une contrainte concerne le besoin de couverture de béton pour l'acier (enrobage) dans le choix de l'épaisseur des panneaux en béton armé. Cet enrobage est nécessaire pour protéger l'acier à la corrosion et éviter des fissures qui suivent les treillis.

Notre idée de panneaux.

Notre idée est d'envisager un panneau préfabriqué pour bardage de clos couvert, satisfaisant d'une part les exigences mécaniques, d'autre part l'isolation thermique pour un mur extérieur et enfin ayant de bonnes surfaces qui ne demandent pas de traitement particulier. Pour satisfaire ces contraintes, nous proposons un élément sandwich fait d'une plaque de polystyrène extrudé entre deux couches de béton de sable renforcé de fibres. La section transversale est illustrée sur le schéma suivant:



Pour augmenter la rigidité des panneaux, nous avons décidé de traverser le polystyrène pour connecter les deux plans extérieurs. Dans nos panneaux d'essais, nous avons fait des trous circulaires et coniques, dans la plaque de polystyrène qui sont remplis de béton pendant le coulage.



Pour l'isolation thermique, il est vraiment punissant d'avoir du béton traversant la section isolante, constituée de polystyrène. En effet la résistance thermique du matériaux pour le béton est 50 fois moins élevée que pour celle du polystyrène. Par suite, plus il sera possible de diminuer la quantité de béton traversant meilleur sera l'isolation. L'analyse de ces panneaux montre que près de 30% de la section centrale est faite de béton, ce qui provient du fait que les prototypes sont de petite taille, les bords ont une importance relative non négligeable. Pour un panneau de grande taille, la quantité relative de béton traversante est beaucoup moins importante. Dans les calculs qui suivent, je suppose que cette quantité est inférieure à 10 %, ce chiffre est obtenu par un panneau type de 6 x 0,6 m.

Isolation thermique.

Dans notre concept de panneaux complets pour des murs extérieurs, l'épaisseur du polystyrène est choisie en prenant en compte le besoin d'isolation thermique. Pour faire le calcul, les formules suivantes ont été utilisées.

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

R = résistance thermique ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$)

d = épaisseur (m)

λ = coefficient de matériaux ($\text{W} / \text{m } ^\circ\text{C}$)

Pour une section constituée de différents matériaux en série, la résultante est la somme des résistances de chaque matériaux :

$$R_{\text{tot}} = R_1 + R_2 + \text{etc.}$$

Données; $\lambda_{\text{Polystyrène}} = 0,03 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\lambda_{\text{Béton}} = 1,4 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Avec les épaisseurs $d_{\text{béton}} = 2 \times 3 \text{ cm}$ et $d_{\text{polystyrène}} = 4 \text{ cm}$, les calculs deviennent, en supposant que les renforcements de bétons dans les trous de la plaque de polystyrène ainsi que le bord extérieur représente 10 % de la surface;

$$R_{\text{tot}} = 0,03 + \frac{2 \times 0,03}{1,4} + 0,90 \times \frac{0,04}{0,03} + 0,10 \times \frac{0,04}{1,4} + 0,12 = 1,40 \text{ (m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W)}$$

Cette valeur moyennes est suffisante pour l'isolation thermique d'un mur externe pour les conditions climatiques en France. Les deux termes 0,03 et 0,12 représentent la résistance apportée par des couches d'air sur les surfaces des murs extérieurs et intérieurs.

Souvent la résistance thermique est exprimé par U, coefficient de transmission thermique qui est son inverse, dans notre cas :

$$U = \frac{1}{R_{\text{tot}}} = 0,72 \text{ (W} / \text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

Le tableau suivant permet d'évaluer l'épaisseur de polystyrène requise en fonction des exigences thermiques.

Tableau du valeur d'isolation thermique avec différentes épaisseurs de polystyrène.

épaisseur de polystyrène (mm)	épaisseur totale	R ($m^2^\circ\text{C}/\text{W}$)	U ($\text{W}/m^2^\circ\text{C}$)
20	80	0,79	1,26
40	100	1,40	0,72
60	120	2,00	0,50
80	140	2,60	0,38
100	160	3,20	0,31

La fonction de raidisseur.

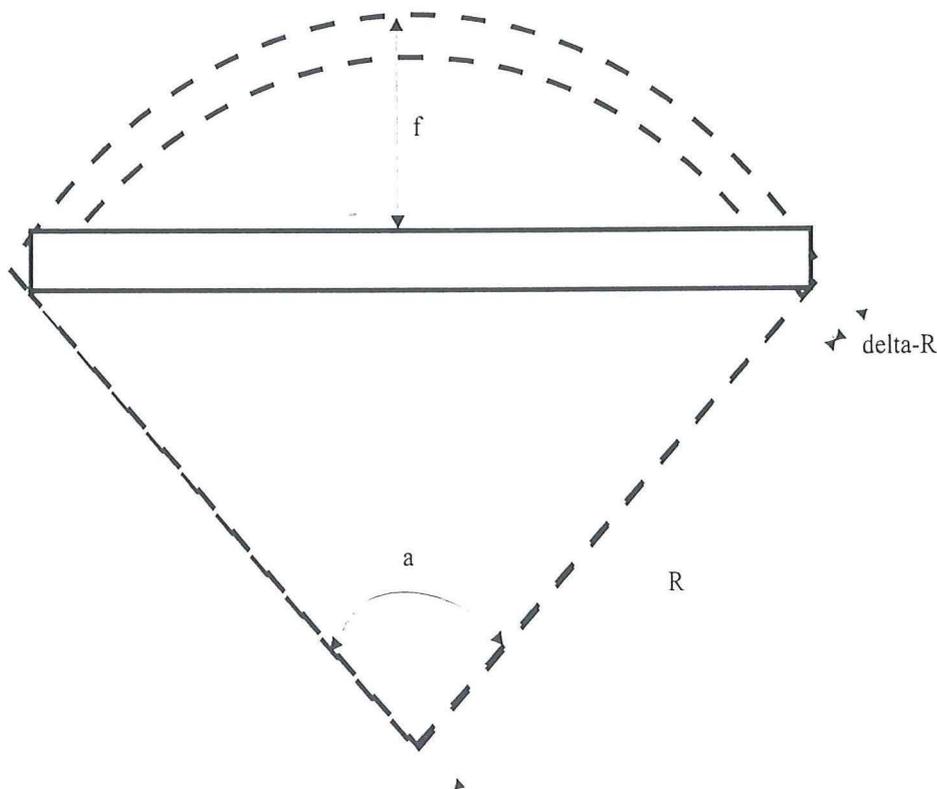
D'avoir de raidisseur dans nos panneaux nous semble nécessaire pour créer un ensemble rigide du système multicouche, même si strictement mécanique ils représentent peu d'intérêt.

Déformation à cause de température.

Nous avons deux surface de béton séparé par un isolation thermique. L'écart de la température de les deux bords va être la même que la différences entre la température extérieur est intérieur de bâtiment. Si je prend une jour avec du soleil on peut arriver à une température sur la surface extérieur de 40°C mais la température intérieur peut rester toujours normale vers 20°C, la différence devient 20°C.

$$\left. \begin{array}{l} \Delta L = \alpha \times \Delta T \times L \\ \alpha = 10^{-5} (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1} \\ \Delta T = 20^\circ\text{C} \\ L = 6\text{m} \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta L = 1,2\text{mm}$$

Quelles sont les conséquences de cette déformation due à la différence de température. On peut supposer que le panneaux s'adapte à une forme "circulaire" avec une flèche vers l'extérieur, exagéré dans l'illustration suivant.



$$\left. \begin{array}{l} R\alpha = L \\ (R + \Delta R)\alpha = L + \Delta L \end{array} \right\} \Rightarrow \alpha = \frac{L}{R} \Rightarrow r = \frac{\Delta R}{\Delta L}$$

$$\left. \begin{array}{l} L = 6 \text{ m} \\ \Delta R = 0,07 \text{ m} \\ \Delta L = 1,2 \times 10^{-3} \text{ m} \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} R = 350 \text{ m} \\ \alpha = 0,0171 \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$f = (R + \Delta R) \times \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right) = 3,67 \times 10^{-5}$$

Une flèche de cette ordre de grandeur n'est pas géant de tout, mais c'est important que l'installation de permet le panneau à régir par cette manière. Si le panneau n'a pas la possibilité les effort tranchant a cause d'une déplacement dans les bordes de extrémité peuvent devenir tellement élevé est crée un rupture, voir le calcul suivant ;

$$\left. \begin{array}{l} \tau = \gamma \times G \\ G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \\ \gamma = \frac{\Delta L / 2}{h} \\ E = 30000 \text{ M P a} \\ \nu = 0,2 \\ h = 10 \text{ m m} \\ \Delta L = 1,2 \text{ m m} \end{array} \right\} \Rightarrow \tau = 94 \text{ M a}$$

Calcul de coût

Le coût des matériaux pour une section de panneaux par m^2 est calculé ici ;

Panneaux avec béton renforcé par Fibraflex. (base Fibraflex: 35 F/kg; 54 kg/m^3)

2 x 3 cm béton:	$2 \times 0,03 \times 2600$	= 156 F / m^2
2 x 2 cm de polystyrène:	2×20	= 40 F / m^2
5 % de béton au milieu :	$0,10 \times 0,04 \times 2600$	= 10 F / m^2
	Σ	= 206 F / m^2

Panneaux avec béton renforcé par polyefin 3M (base 3M: 20 F/kg; 28 kg/m^3)

2 x 3 cm béton :	$2 \times 0,03 \times 1200$	= 72 F / m^2
2 x 2 cm de polystyrène:	2×20	= 40 F / m^2
5 % de béton au milieu :	$0,10 \times 0,04 \times 1200$	= 5 F / m^2
	Σ	= 117 F / m^2

En terme de coût, le béton avec la fibre synthétique est beaucoup plus avantageux. Il s'agit là d'un coût matériaux et nous pouvons admettre que les coûts annexe de mise en œuvre du béton, puis du panneau sur la structure sont indépendants du type de béton.

Panneaux en béton homogène

10 cm béton :	$0,10 \times 670$	= 67 F / m^2
Treillis soudé - 2 x ϕ 6mm s100:	2×15	= 30 F / m^2
	Σ	= 107 F / m^2

Le coût pour nos panneaux en béton renforcé de fibres est naturellement plus élevé que celui des panneaux homogènes en béton armé. La question est de savoir si l'isolation thermique intégrée dans nos panneaux compense les surcoûts ? La question est posée aux acteurs sur le marché du bâtiment. L'estimation proposée tend à montrer que même si les panneaux renforcés par des fibres métalliques sont plus chers, peuvent devenir concurrentiel .

La fabrication

Deux panneaux ont été fabriqués pour chaque type de béton. Nous avons adapté un coffrage en bois déjà existant pour les dimensions de nos panneaux. Le coffrage est fait de bois de 1,5 m de longueur, de 0,5 m de hauteur tel que l'on peut varier l'épaisseur en changeant la largeur sur les coffrages entretoises. Pour faire un panneau de 60 cm de longueur, nous avons fabriqué un séparateur de dimensions 30 x 26 x 10 cm que nous avons mis au milieu et nous avons ainsi pu couler deux panneaux dans chaque coffrage. La plaque de polystyrène a été fixée par des vis avec deux bouts de tube en cuivre de 3 cm pour fixer la distance entre le coffrage et le polystyrène de chaque côté. Dans l'annexe, des photos montrent le coffrage.

Le coffrage a été rempli par le haut de béton, à petites pelletés. Le coffrage a été mis sur une table vibrante et après remplissage total, il a été vibré pendant une minute. Cette vibration est nécessaire pour faciliter l'écoulement du béton. Les effets négatifs sur la maniabilité des fibres sont presque éliminés quand on fait vibrer le béton³ et ce dernier est beaucoup moins "collant".

En outre deux fois trois plaques de 540 x 140 x 30 mm et des cylindres ont été fabriqués pour des tests mécaniques complémentaires.

Le jour suivant le coulage nous avons décoffré les éléments, qui ont été conservés immergés dans l'eau pendant les semaines suivantes.

Comportement mécanique.

Dans la pratique, on admet que le béton a atteint sa résistance ultime après 28 jours. Nos essais mécaniques ont été réalisés 31 à 38 jours après le coulage.

Essais de compression.

Pour tester la résistance à la compression, des essais de compression ont été réalisés sur des cylindres de 110 mm de diamètre et 220 mm de hauteur. Les résultats obtenus, en valeur moyenne sont les suivants ;

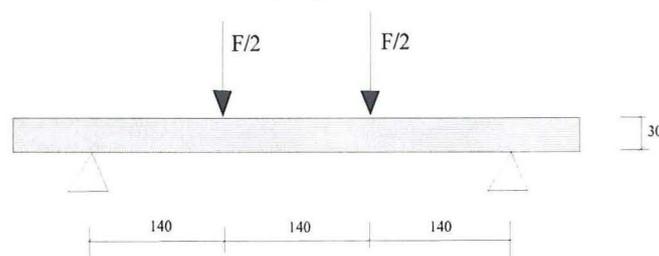
Fibraflex: $\sigma_{\text{comp}} = 54,4 \text{ MPa}$

3M: $\sigma_{\text{comp}} = 50,2 \text{ MPa}$

Les valeurs sont du même ordre de grandeur que celles obtenues dans une étude sur le béton de sable, sans renforcement par des fibres, par Chanvillard et Basuyaux à l'ENTPE, présentée dans le rapport, "Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées"⁴. Les résultats correspondent également à ceux obtenus dans le projet "Eléments minces de Bâtiment en béton de sable renforcé de fibres de fonte amorphe"⁵ auquel j'ai déjà fait référence à plusieurs reprises. Normalement les fibres n'ont pas d'influence importante sur la résistance à la compression. On peut toutefois s'attendre à une faible diminution de la résistance à la compression en incorporant des fibres dans le béton, du fait d'une augmentation de la porosité globale. Les nombres d'essais effectués n'est pas suffisant pour en tirer des conclusions valables, mais on peut dire que la tendance est une petite diminution de la résistance de le béton renforcé des fibres comparé au béton sans renforcement de fibres, ce qui est en accord avec l'expérience générale. Nous pouvons cependant constater que les valeurs et tellement élevées et sont suffisamment élevées pour des applications quotidiennes et dans l'application évalué dans ce projet.

Essai des flexion sur les plaques.

Pour tester la résistance à la tension, des essais de flexion ont été réalisés sur des plaques de dimensions 140 x 540 x 30 mm. La montage que nous avons utilisé est le suivant;

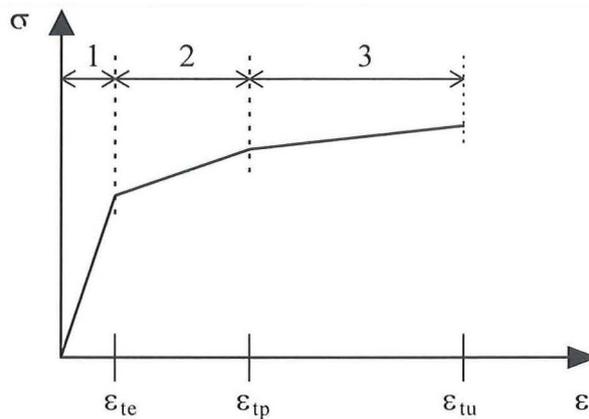
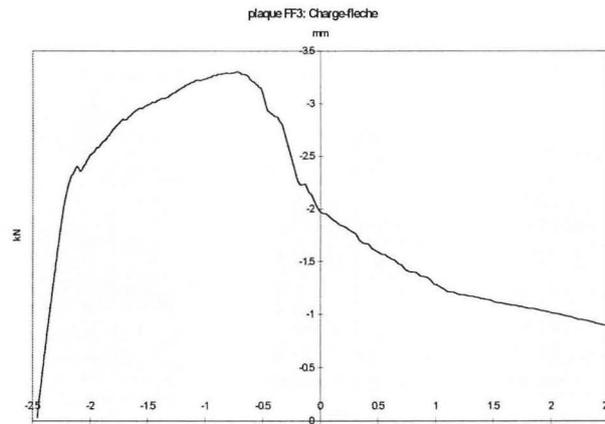


Le montage est classique pour des tests de flexion. Entre les deux charges ponctuelles, le moment est constant. On crée ainsi une zone en flexion circulaire (sans effort tranchant) dans laquelle la rupture va se développer alors que l'on connaît bien la valeur du moment.

La presse a été utilisée avec un déplacement constant du piston en mesurant la charge et la flèche. Nous avons initialement mené les essais en utilisant le capteur de la flèche pour l'asservissement, mais cela s'est avéré infructueux, probablement à cause des vibrations dans le système sous de faibles charges.

Fibraflex

Le comportement du béton renforcé par des fibres métalliques est caractérisé par un domaine élastique en début de chargement (1), un domaine élasto-plastique (2) quand l'élément commence à se fissurer et un phase de post-fissuration (3). La charge augmente continuellement pendant les trois phases, ce qui caractérise d'un comportement non-fragile en flexion.



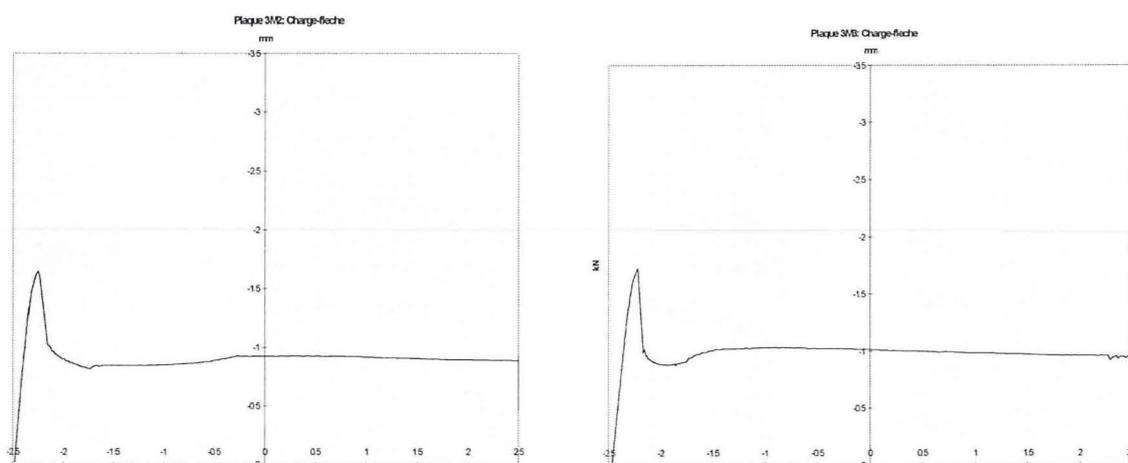
Ce comportement correspond aux résultats obtenus par Nathan dans ses essais⁶. Pendant la deuxième phase, le béton se fissure à de multiples endroits, avec beaucoup de microfissures invisibles ce qui constitue une preuve de l'action des fibres. Dans la troisième phase la fissuration se concentre en une fissure unique de rupture. La limite élastique de la contrainte, σ_e est calculer par les formules classique de la mécanique.

$$\sigma_e = \frac{M_e}{W} \quad \text{avec; } M = \frac{F}{2} \times d$$

$$W = \frac{bh^2}{6}$$

Nous obtenons une valeur $\sigma_e = 5,0 \text{ MPa}$. C'est une valeur qui correspond bien aux résultats obtenus dans le projet « Eléments minces de bâtiment en béton de sable renforcé des fibres de fonte amorphe »¹. Nous pouvons également calculer la contrainte moyenne élastique équivalente du moment de la rupture, défini par la charge maximale que peut supporter l'éprouvette. On obtient: $\sigma_r = 11,0 \text{ MPa}$ qui est une valeur assez élevée, mais là encore, d'autres essais amènent à des rapports du même ordre de grandeur (~ 2) entre la limite élastique et la rupture. Une analyse élasto-plastique sera développée dans la suite qui affirmera l'analyse du comportement mécanique.

Les fibres synthétiques de 3M.

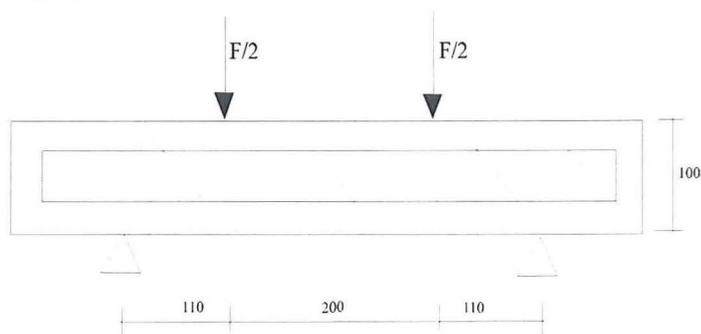


Le mode de rupture des plaques à fibres synthétiques a été plus fragile. Après avoir passé la limite élastique, on obtient très vite la valeur maximale d'où la chute brutale de la valeur de la charge à un niveau beaucoup plus bas. Les valeurs moyennes obtenues sont:

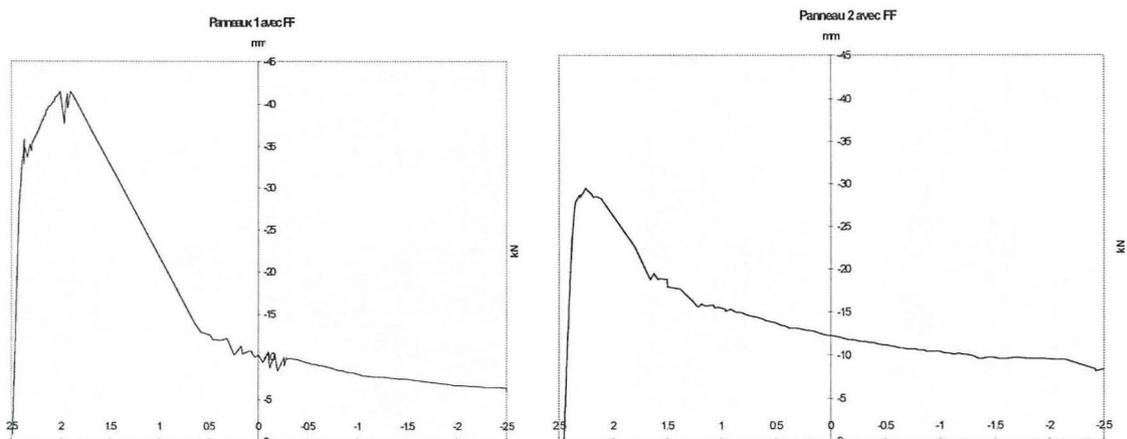
$$\sigma_e = 4,0 \text{ MPa et } \sigma_r = 4,9 \text{ MPa}$$

Essai des flexion sur les panneaux.

Les essais ont été faits de la même manière que les essais des plaques avec les panneaux couchés (qui est la direction ou ils vont travailler contre les charges dans une application de bardage par exemple).



Fibraflex

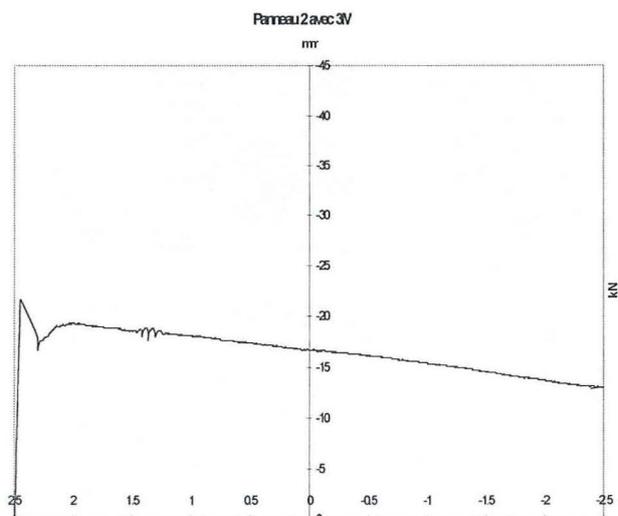


Le comportement de rupture correspond à celui observé sur les plaques mais la phase de post-fissuration où la charge augmente continuellement est moins importante. Cela s'explique par l'hétérogénéité de la section. Nous pouvons là encore calculer des contraintes de fissuration et de rupture en négligeant le rôle du polystyrène et en calculant l'inertie de la section de béton. Nous obtenons les valeurs suivantes :

$$\sigma_e = 3,6 \text{ MPa et } \sigma_r = 4,7 \text{ MPa}$$

Les fibres synthétiques de 3M.

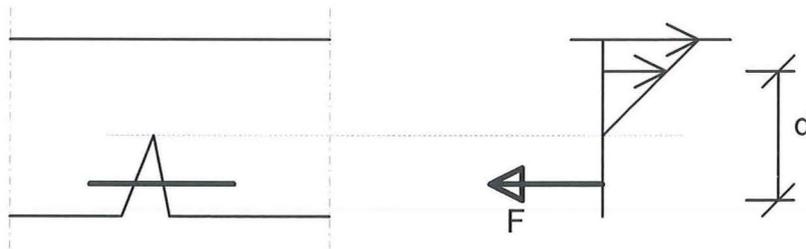
Une de deux panneaux a eu une rupture immédiate. Après analyse des courbes, nous avons conclu à une perte de contrôle de la presse. Dans les courbes, on peut voir des vibrations avant la rupture. Seul le deuxième essai est alors exploité.



Le mode de rupture correspond bien également ici avec les essais sur les plaques. La charge maximale est obtenu quand on reste toujours dans la zone élastique. La charge diminuer ensuite et se stabilise sur un plateau.

$\sigma_e = 2,9 \text{ MPa}$ et $\sigma_r = 2,9 \text{ MPa}$ (L'éléments reste dans la zone élastique jusqu'à on obtient le maximum)

Le fait que la résistance dans le plateau post-pic soit sur un niveau plus élevé comparé aux plaques, s'explique par le fait que le bras de levier du moment intérieur de la section (appelé d dans l'illustration) est plus élevé, et par suite que la force de chaque fibre avant leur rupture apporte un moment plus élevé.



Ceci n'est en fait pas très intéressant car c'est le comportement avant rupture qui nous intéressons. Si la charge maximale coïncide avec la charge de fissuration, le comportement global est fragile. Le panneau ne présente alors aucune sécurité vis à vis de la ruine.

Analyse comparée du comportement de plaque et de panneaux .

Il paraît évident que le comportement des fibres synthétiques n'arrive pas aux mêmes performances que les fibres métalliques. Pour des raisons évidentes de comportement en service, le dimensionnement des murs est fait en utilisant la limite élastique des matériaux.

Résistance à la flexion, σ_e , en MPa

	Fibraflex	3M
Plaques	5,0	4,0
Panneaux	3,5	2,9

Le comportement des fibres synthétiques avec une rupture plus fragile est défavorable. Avec les fibres métallique il y a une marge de sécurité jusqu'au moment de rupture au delà de la zone élastique. Même si les fibres métalliques ont une résistance supérieure, on ne peut pas conclure que les fibres synthétiques sont inintéressantes. Il faut rappeler que le prix de ce béton est de moitié inférieur à celui du béton avec les fibres Fibraflex.

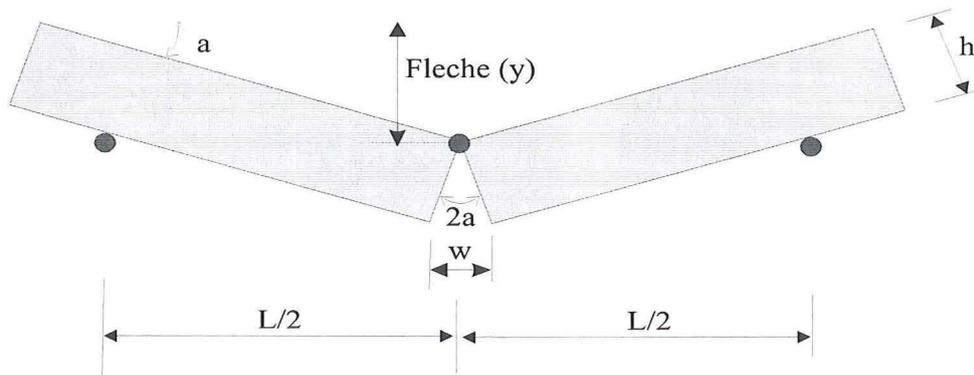
Nous remarquons également sur ce tableau que la valeur de la contrainte élastiques sont systématiquement inférieures dans le cas de panneaux par rapport aux plaques. Ceci peut s'expliquer par l'anisotropie de la distribution des fibres lors du coulage qui crée dors des zones de faiblesses.

En observant la surface de rupture, je trouve que parmi les fibres métalliques il y a une combinaison de glissement et de rupture des fibres. Mais dans le béton avec les fibres synthétiques il n'y a aucune rupture des fibres, elles ont toutes glissé. Ceci met en évidence le point faible de cette fibre, l'adhérence entre les fibres et le béton qui pourrait faire l'objet d'une optimisation.

Modélisation par une loi idéal élasto-plastique parfaite.

Ouverture de fissure critique.

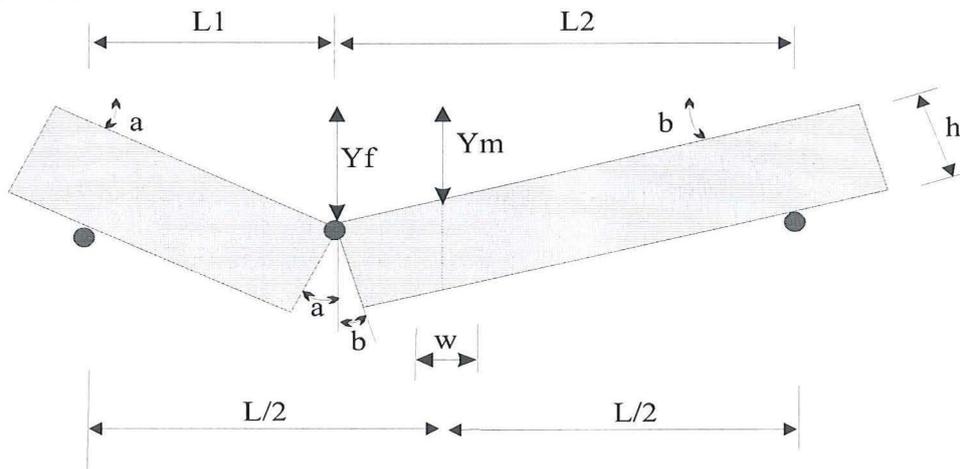
C'est logique de supposer que l'ouverture critique de la fissure correspond à la rupture où les fibres ne tiennent plus. En représentant le comportement par le modèle simplifié suivant, nous avons calculer l'ouverture de fissure dans nos essais.



Par ce modèle la flèche (y) au moment de la rupture peut être traduite en une valeur de fissure (w) par l'équation suivante:

$$\frac{w/2}{h} = \frac{y}{L/2} \Rightarrow w = \frac{4 h y}{L}$$

Cette équation est valable si la fissure se produit exactement au milieu du prisme où nous avons mesuré la flèche. Sinon il faut calculer la flèche au droit de la fissure et modifier les équations :



$$\frac{y_f}{L_2} = \frac{y_m}{L} \Rightarrow y_f = \frac{L_2}{L} \times y_m$$

$$w = \left(\frac{h}{L_1} + \frac{h}{L_2} \right) \times y_f = \left(\frac{h}{L_1} + \frac{h}{L_2} \right) \times \frac{L_2}{L} \times y_m$$

Ce modèle doit être une bonne approximation de la situation réelle. On peut supposer que les autres fissures sont déchargées et se referme quand la fissure principale devient dominante et

avec une seule fissure de rupture, nous ne sommes pas loin de notre modèle. Les valeurs de $w_{critique}$ obtenues dans mes essais sont donnés dans le tableau suivant:

Tableau de $w_{critique}$

	<u>Plaque-1</u>	<u>Panneau-1</u>	<u>Panneau-2</u>
Fibraflex	0.503	0.633	0.210*
	<u>Plaque-1</u>	<u>Plaque-2</u>	<u>Panneau-1</u>
3M	0.092	0.098	0.085

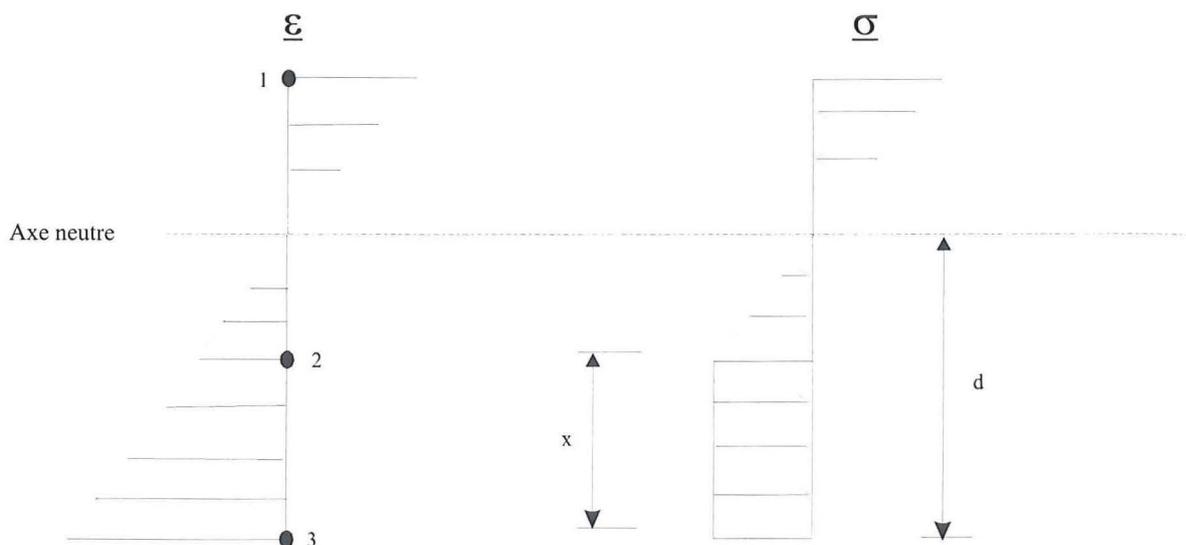
*éléments avec une mono-orientation des fibres suivant la direction de la fissure.

On constate que les $w_{critique}$ obtenus pour les éléments avec les fibres de 3M sont presque exactement les mêmes. Si on ne prend pas en compte les panneaux avec le problème d'une zone de faiblesse due à une mono-orientation des fibres, on peut aussi dire que les fissures critiques, dans les éléments avec le béton renforcé avec les Fibraflex sont du même ordre de grandeur.

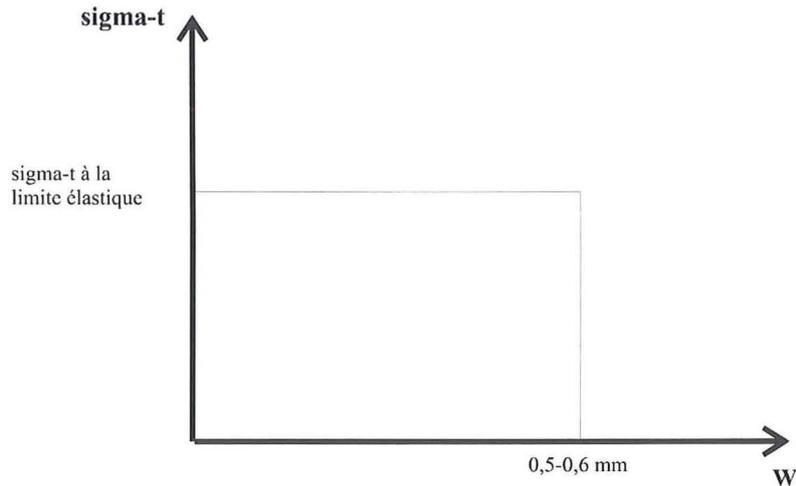
La valeur beaucoup moins élevée pour les fibres de 3M montre aussi que les fibres ne travaillent pas bien dans cette matrice. Comme cette fibre a un module élastique moins élevé que les fibres métalliques, la fissure doit être plus grande pour mobiliser des forces dans les fibres, comme la force est proportionnelle à la déformation de chaque fibre. Dans la suite de ce chapitre je me limite à évaluer le comportement du béton avec les fibres métalliques.

Calcul de moment en supposant un modèle élasto-plastique parfait.

Est-ce que nous pouvons arriver à calculer le moment de rupture par un modèle élasto-plastique parfait, en prenant l'hypothèse de linéarité de ϵ ?



La modélisation de cette manière sur une poutre homogène a été proposée par Hannant⁸. Dans ce modèle, je suppose que la contrainte tendue est constante le long de la fissure



Par des relations RDM de la section la distance à l'axe neutre a et la contrainte de compression ont été calculées.

$$\int \sigma \times x dx = N = 0$$

$$\iint \sigma \times x dx^2 = M_r$$

La déformation maximale dans la zone tendue (ϵ_3) a été calculé par les équations suivantes:

$$\epsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} = \frac{[\sigma_2 = \sigma_t]}{E} \rightarrow \epsilon_2 = \frac{\sigma_t}{E}$$

$$\epsilon_3 = \epsilon_2 \times \frac{d}{(d-x)} = \frac{\sigma_t}{E} \times \frac{d}{(d-x)}$$

Les résultats, obtenus par un solution numérique fait avec le “ solveur ” dans le programme informatique Excel, sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau 1

Eléments	plaque-1	Panneau-1	Panneau-2
M_e	105	1607	1323
σ_t	5	3.9	3.2
M_r	232	2269	1619
d	21	54	51
x	13.8	24.5	11.3
ϵ_3	0.0015	0.00014	0.00014

Le plaque qui est homogène a une valeur qui donne une rapport $\sim 0,7$ de d à la référence de la hauteur qui est du même ordre de grandeur que celle de Hannant qui a propose la relation $\frac{3}{4}$ basée sur ces expériences des essais sur des poutres.

Comment passer de $w_{critique}$ à ϵ .

La rupture d'un béton renforcé de fibres se produit quand on arrive à une fissure critique. Si on arrive à passer d'une w_{critique} à une ε_{max} le moment de rupture pourra être calculée par un modèle élasto-plastique. Il reste des difficultés d'intégrer directement celle là pour le calcul.

Pour homogénéiser les calculs pour une section quelconque nous pouvons établir une longueur fictive L_r :

$$L_r = \frac{W}{\varepsilon}$$

Ce qui est évident est que L_r dépend de :
- l'échelle (h)
- la section

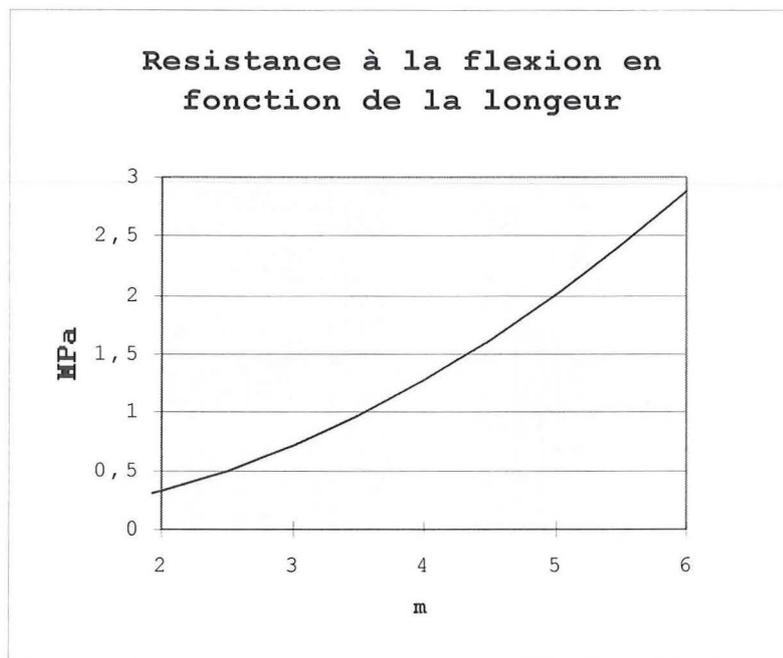
Expérimentalement nous avons constaté qu'il y a un champ de multifissuration entre le champ élastique et le moment de rupture. Mais on finit avec une seule fissure qui permet de définir le w_{critique} . L'interaction dans les mécaniques de fissuration, donne une forte hétérogénéité des champs de déformation le long de la poutre. A cause de cette complexité nous ne sommes pas arrivé à trouver un chemin simple pour passer de w_{critique} à ε . Peut être la seule manière de le faire est de chercher une équation expérimentale, qui dépend de l'échelle et de l'inertie de la section.

Les charges sur de murs extérieur.

La charge principale pour un mur, sans fonction porteuse, est la charge du vent et du poids propre. La charge horizontale du vent dans la réglementation française est de 1 kN/m^2 . Nous allons voir l'influence de cette charge en fonction de la longueur pour un élément de même type que notre prototype:

$$M = \frac{ql^2}{8} \quad \text{avec } q = 1 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{\min} = \frac{M}{W} \quad \text{avec } W = 1,56 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$



Les panneaux préfabriqués sont souvent d'une longueur de l'ordre de 6 mètres. Pour les fibres synthétiques on est prêt de la valeur critique. Les valeurs que j'utilise ici sont aussi des valeurs moyennes qui proviennent directement des essais, pour des valeurs de dimensionnement il faut aussi introduire des facteurs de sécurité suivant les réglementations de dimensionnement de bâtiments. Aucune réglementation française ou européenne concernant le dimensionnement en béton des fibres n'est en rigueur actuellement pour prendre en compte cet aspect. Le processus plus simple à suivre pour obtenir l'autorisation de construction pour un panneau de ce type est une autorisation basée sur des essais de panneaux à l'échelle un. Cette méthode de dimensionnement est autorisée en suivant alors des règles basées sur les théories de la statistique.

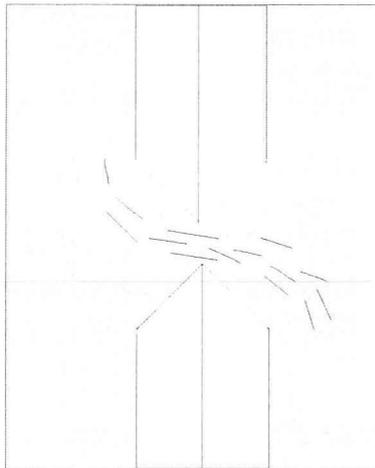
Mes essais permettent quand même de se faire une opinion sur les possibilités de réaliser des panneaux avec ces deux différents bétons renforcés des fibres. Si on veut utiliser le béton renforcé des fibres de 3M, je trouve qu'il faut probablement se limiter à des panneaux de 3 mètres de longueur. Avec les fibres métalliques, il est possible de faire des panneaux de 6 mètres en toute sécurité.

Il faut aussi que les panneaux aient une certaine résistance aux chocs. Cela reste à vérifier mais des essais sur des éléments minces homogènes réalisés à l'ENTPE a montré que le béton renforcé de fibres résiste bien aux chocs⁷. Même s'il faut le vérifier avant commercialisation, on peut espérer que des panneaux de ce type présente des caractéristiques mécaniques suffisantes..

Le remplissage et l'orientation des fibres.

Après les essais, nous avons fait des coupures transversales au niveau de la perforation des plaques de polystyrène dans les panneaux pour vérifier le remplissage. J'ai trouvé que le béton a bien rempli le volume, pour les deux bétons que nous avons utilisés.

Dans la surface de coupure, il est aussi possible de se faire une idée de la façon dont les fibres se sont orientées. D'après nous, les fibres, comme le béton est suffisamment fluide, vont s'orienter dans la direction qui suit le flux de remplissage pour le béton. Ce que nous pouvons voir au niveau de la section de béton traversant souligne cette idée. Par le dessin suivant, l'arrangement des fibres que nous avons trouvé est illustré:



La direction des fibres suit bien le flux créé par un remplissage du côté gauche de l'illustration avec du béton qui traverse le trou vers l'autre côté. Comme le remplissage a été fait de manière à avoir le niveau supérieur d'un côté de la plaque, il y a une tendance claire des fibres à suivre la direction du flux. En maîtrisant cet aspect, on peut jouer sur la méthode de remplissage pour obtenir une direction de fibre favorable. En même temps il faut faire attention à ne pas tomber, involontairement, dans la situation contraire avec des orientations défavorables. Dans un des panneaux avec les fibres de fonte, il semble que la fissure a suivi une partie où il n'avait presque pas de fibres traversante. En regardant la rupture, nous avons constaté que les fibres sont dirigées sur la surface suivant la fissure. Cette plaque a donné la résistance la moins élevée et en regardant la forme de la fissure, la conclusion qui s'impose est que le flux né pendant le remplissage qui a développé une zone de faiblesse due à une mono-orientation des fibres.

Il y a donc une problématique si on essaye de travailler avec le flux du béton pour obtenir une direction favorable à la résistance contre la charge majeure, c'est de perdre l'homogénéité de matériaux. Nous avons remarqué ce phénomène mais il reste à évaluer les améliorations potentielles du comportement mécanique en travaillant sur le flux de remplissage et à cerner les risques.

Conclusion

Mon projet de TFE se résume en trois points:

- Trouver une matrice cimentaire avec une consistance permettant un bon remplissage de sections minces.
- Evaluer les possibilités mécaniques avec les fibres polyoléfiniques de 3M.
- Vérifier si le concept de panneaux intégrant un isolateur thermique est réalisable.

Je suis parvenu à développer des formules de bétons de sable renforcés par des fibres, avec les deux différents types de fibres utilisés dans ce projet, avec la possibilité d'obtenir un bon remplissage tout en évitant le ressuage et la ségrégation du béton. J'ai également constaté qu'il y a une orientation des fibres qui suit le flux de remplissage du béton. Je conclus qu'il est possible de formuler des matrices cimentaires avec la caractéristique nécessaire pour obtenir un bon remplissage dans des sections minces.

Un certain intérêt dans le cadre de ce projet a été d'évaluer la possibilité d'obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques avec des valeurs intéressantes. Les résultats obtenus dans mes essais ne sont pas favorables pour les nouvelles fibres, les valeurs obtenues ne sont pas au même niveau que les fibres métalliques et le comportement (rupture fragile) est aussi défavorable. La conclusion est que pour des applications où l'on cherche des résistances à la flexion élevées pour des bétons renforcés de fibres, les fibres synthétiques ne sont pas une alternative aux fibres métalliques. Cependant, le coût moindre du béton renforcé avec les fibres de 3M est intéressant par rapport au béton renforcé avec les Fibraflex, et mérite certainement que l'association fibre/matrice soit travaillée pour développer un meilleur ancrage de cette fibre.

L'idée d'un panneau "sandwich" avec du béton renforcé de fibres intégrant une isolation thermique a été évalué en considérant le point suivants:

- Satisfaction du besoin d'isolation thermique pour un mur extérieur
- Aspect de fabrication et remplissage de sections minces
- Résistance à des charges extérieures
- Coût

Par des calculs j'ai montré que le besoin d'isolation thermique peut être satisfait avec des éléments d'au moins 10 cm d'épaisseur totale. La fabrication des prototypes a montré que l'on peut obtenir un bon remplissage de sections mince (dans notre cas des épaisseurs de 3 cm de béton sur chaque face). J'ai trouvé qu'avec le béton renforcé de Fibraflex, il est possible de réaliser des panneaux, dans des dimensions commerciales d'aujourd'hui, qui résiste aux charges extérieures. Et présentant une sécurité à la fragilité. Mais la résistance pour les panneaux avec les fibres de 3M n'est pas suffisante pour satisfaire cette contrainte. Le calcul de comparaison de coût de matériaux entre nos panneaux et un panneau homogène avec armature classique donne que des prix de 206 Fr/ m² avec le béton renforcé par Fibraflex et 107 Fr / m² pour le panneau homogène. Est-ce que la valeur de l'isolation thermique intégré et la valeur architecturale d'un mur extérieur en faible épaisseur, sont supérieurs à ~100 Fr. /m² ? La question est à poser aux acteurs travaillant dans le secteur du bâtiment.

"Learning by mistake"

A quoi sert un projet de Travail de Fin d'Etudes ? Si, je l'avais considéré comme une forme d'examen, ce chapitre n'aurait jamais été écrit et j'aurais plutôt essayé de dissimuler les erreurs que j'ai faites. Mais en regardant le projet comme une préparation à la vie professionnelle, l'expérience des erreurs est peut-être importante pour qu'on les refasse pas.

Une chose que je ne peux pas assez souligner c'est l'importance d'être prudent en chaque moment. J'en ai eu deux exemples pendant mon projet où j'ai fait des erreurs juste par ignorance. J'ai juste mélangé deux chiffres de dosage dans un tableau quand j'ai fait des essais sur la pâte et toute une série d'essais qui m'a servi à rien. L'autre était quand j'ai fait de calcul du volume nécessaire pour la fabrication de mes éprouvettes j'ai fait une erreur de calcul et il a manqué du béton pour faire les 6 cylindres prévus. C'est souvent que les erreurs de calcul apparaissent dans les moments les moins compliqués, mais la conséquence finale ne dépend pas de la complexité dans les équations où l'erreur est entrée.

Le nombre de mes pièces dans chaque série a été limité dans mon projet et en plus j'ai perdu certaines pièces sans avoir pu récupérer les valeurs par mal conduit et mal connaissance du programme informatique qui a enregistré les valeurs pendant les essais mécaniques. Dans le cadre d'un travail de la laboratoire, j'ai compris qu'il est nécessaire de prendre une marge de sécurité en cas d'accident pendant les essais.

De travail qui reste à faire

Pendant un projet de trois mois, il n'y a pas beaucoup de temps pour réaliser des essais complémentaires pour répondre aux questions qui peuvent se poser pendant les essais où quand on fait l'évaluation de ses résultats. J'ai deux points à ce sujet qui me semblent intéressants à traiter: le premier est l'orientation des fibres créée par un flux de remplissage et la deuxième est de voir si il est possible d'obtenir une amélioration avec la fibre de 3M en modifiant ses dimensions ou sa surface d'adhérence.

Le phénomène d'orientation qui suit le flux du béton pendant le remplissage a bien été constaté et nous semblait probable avant la réalisation de nos essais. Les essais ont vérifié que les fibres pourraient alors être orientées sur la surface de la fissure de rupture ce qui constitue un risque de cette phénomène. Je pense qu'il serait intéressant de travailler plus systématiquement avec différentes manières de remplissage des coffrages posés horizontalement pour voir les améliorations possibles en travaillant sur différents flux de remplissage. Il s'agit à ce niveau d'une optimisation du processus de mise en oeuvre.

Bibliographie

1. Chanvillard G, ENTPE; Peiffer G, Pont-A-Mousson; Boucheret J-M, SEVA; Giraudon G, GFC, *Eléments minces de bâtiments en béton de sable renforcé de fibres de fonte amorphe*. Avril 1997. Chapitre 1.4 et annexe 4.
2. CIM-béton, *Batiment d'industri, de commerce et de stockage à base de composants en béton*, Mars 1997. p.36-37
3. Bentur A. & Mindess S, *Fibre reinforced cementious composites*. Department of Civil Engineering, National Building Research Institute, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, Israel and Departement of Civil Engineering, University of British Clumbia, Vancouver, Canada. p.137
4. Chanvillard G. & Basuyaux O. , *Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées*. Ecole nationale des travaux publics de l'Etat, bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées septembre-octobre 1996. p.58
5. Chanvillard G, ENTPE; Peiffer G, Pont-A-Mousson; Boucheret J-M, SEVA; Giraudon G, GFC, *Eléments minces de bâtiments en béton de sable renforcé de fibres de fonte amorphe*. Avril 1997. Chapitre 2.7.
6. Bentur A. & Mindess S, *Fibre reinforced cementious composites*. Department of Civil Engineering, National Building Research Institute, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, Israel and Departement of Civil Engineering, University of British Clumbia, Vancouver, Canada. p.122
7. Chanvillard G, ENTPE; Peiffer G, Pont-A-Mousson; Boucheret J-M, SEVA; Giraudon G, GFC, *Eléments minces de bâtiments en béton de sable renforcé de fibres de fonte amorphe*. Avril 1997. Chapitre 2.5.
8. Bentur A. & Mindess S, *Fibre reinforced cementious composites*. Department of Civil Engineering, National Building Research Institute, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, Israel and Departement of Civil Engineering, University of British Clumbia, Vancouver, Canada. p.126-130.

Annexe

1. Tableaux: Tableaux des essais p. 1-2
 coûts de matériaux p. 3
2. Album de photos.
3. Béton Renforcé des fibres, étude bibliographique préparatoire du
 projet de TFE, par Per-Anders JOHANSSON Avril 1997.

Tableau d'optimisation de la matrice cimentiers.

Résultats des essais de cône pour choisir la proportion filler/microfiller.

	1	2	3	4	5	6	7
eau	415	426	436	445	455	465	475
ciment	727	727	727	727	727	727	727
microfiller	503	475	450	425	400	375	350
filler	447	447	447	447	447	447	447
superpl.	54.5	53.6	52.8	52.0	51.2	50.3	49.5
Le temps (s)	45	20	15	10	9	-	6

Essais de maniabilité avec de béton avec la fibre Fibraflex.

	1	2	3	4	5	6
Sable 0/5	1350	1325	1300	1275	1250	1225
eau ¹	202	201	201	200	199	199
microfiller	188	195	203	210	217	225
filler	201	209	217	225	233	241
ciment	322	335	347	360	373	385
superpl.	23.1	24.0	24.9	25.8	26.7	27.7
fibres	54	54	54	54	54	54
Cône (s)	4	3	2.4	3.2	4.2	6.3

Essais de maniabilité avec de béton avec la fibre de 3M.

	1	2	3	4	5	6	7
Sable 0/5	1150	1250	1300	1350	1400	1450	1500
eau ¹	188.911	191.089	192	193.089	194.178	195.267	196.356
microfiller	247	217	203	188	173	159	144
filler	265	233	217	201	185	170	154
ciment	423	373	347	322	296	271	246
superpl.	30.4	26.7	24.9	23.1	21.3	19.5	17.7
fibre 3M	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4	27.4
Cône (s)	27.8	9.2	5.4	2.8	2.2	2.3	3.4

1. La variation de la quantité de l'eau vient de que la superplastifiant utilisé consiste de 60 % de l'eau. La super-plastifiant est dosé à 1,3 % de la poids de matériaux fines. Comme on a fait varié la quantité de fine il faut adapter le dosage de adjuvants et l'eau.

Coûts de matériaux.

Tableau 1

prix de matériaux primaire

Sable	100 Fr / ton
Cement	500 Fr / ton
Filler	200 Fr / ton
Microfiller	500 Fr / ton
Super plastifiant	10 Fr / kg
Fibraflex	35 Fr / kg
3M 25/38	20 Fr / kg

Tableau 2

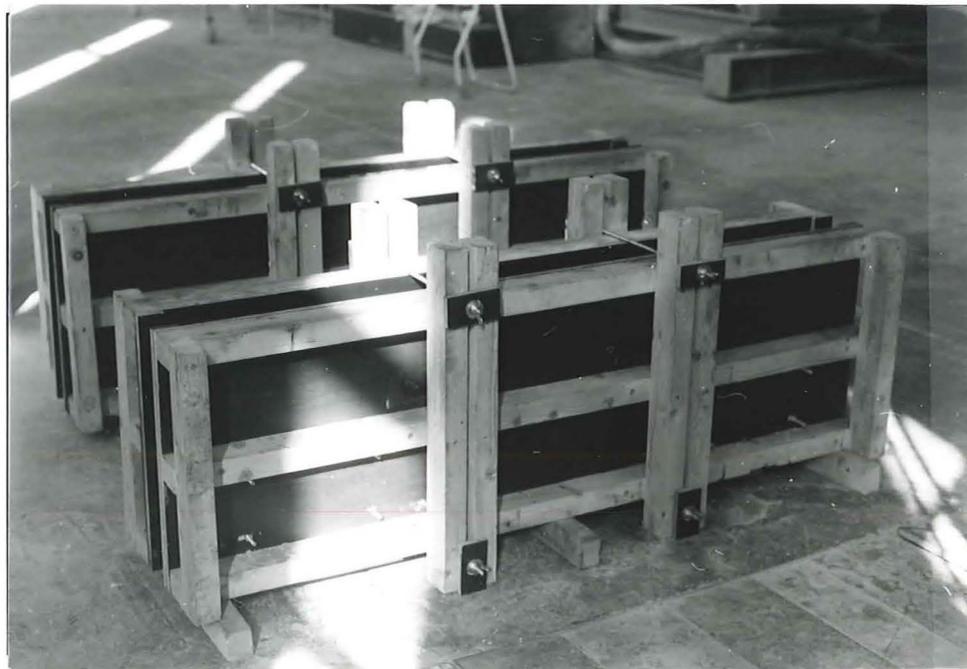
Prix de béton avec les fibres Fibraflex

	kg/m ³	Fr/m3
Sable	1300	130
Cement	347	174
Filler	217	43
Microfille r	203	102
Super plastifiant	24.9	249
Fibraflex	54	1890
	totale:	2587

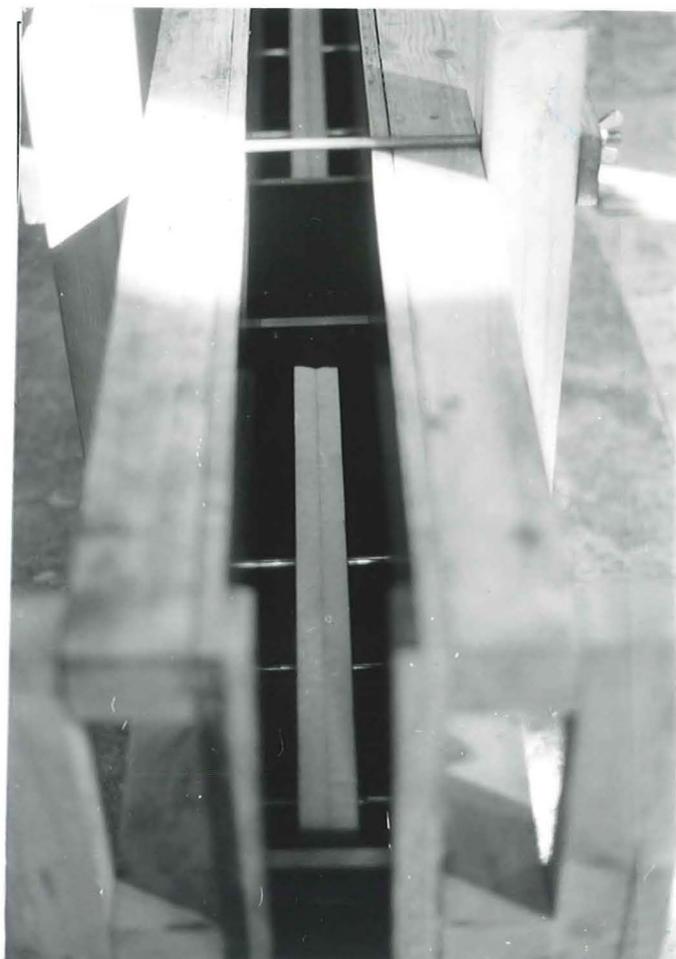
Prix de béton avec les fibres de 3M

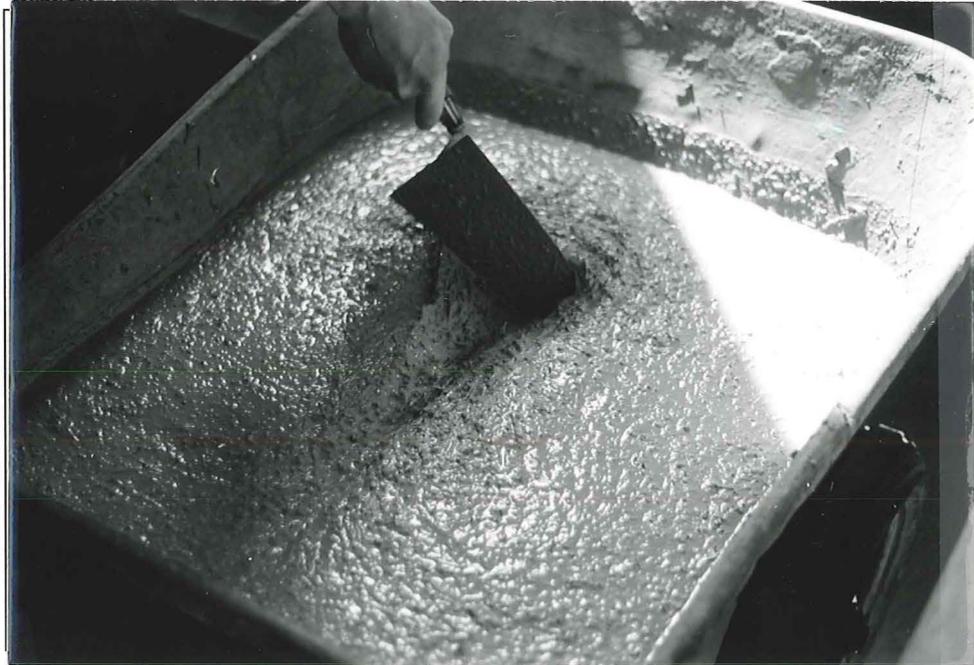
	kg/m ³	Fr/m3
Sable	1350	135
Cement	333	167
Filler	191	38
Microfiller	188	94
Super plastifiant	23.1	231
3M 25/38	27.4	548
	totale:	1213

Album de photos

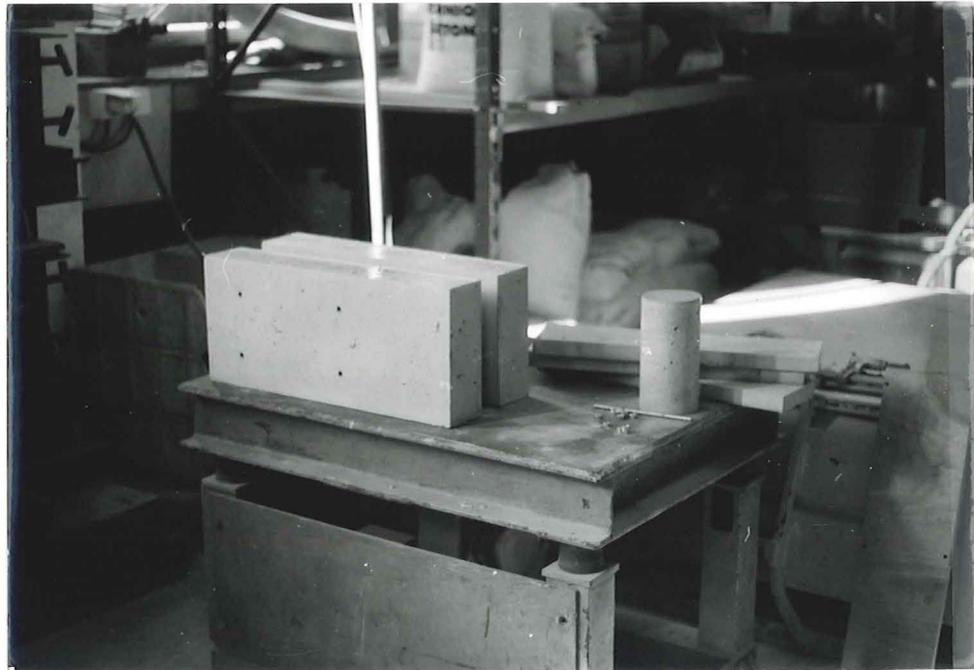


Les coffrages des panneaux

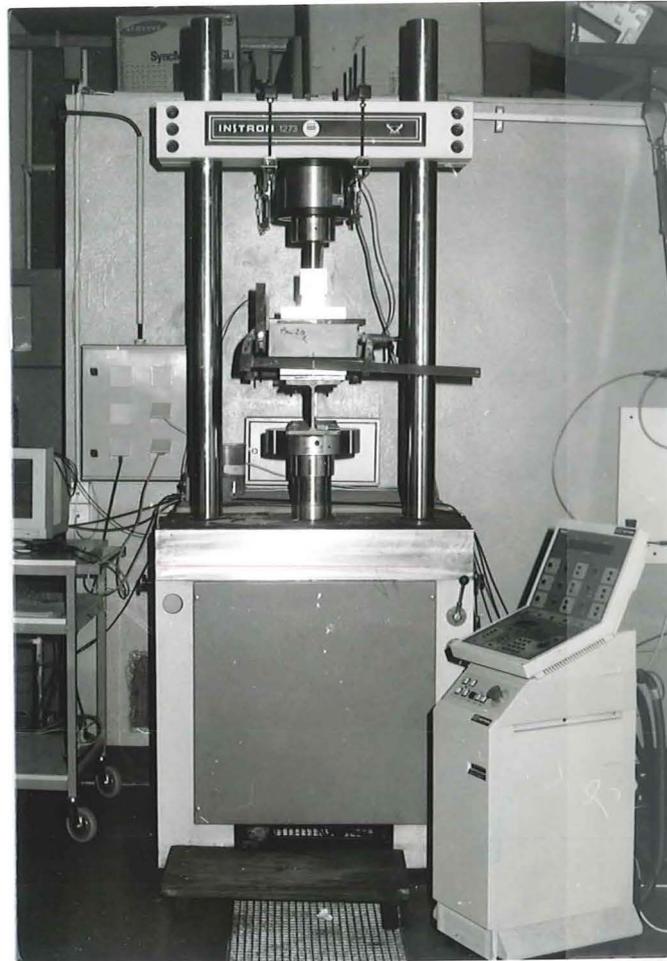




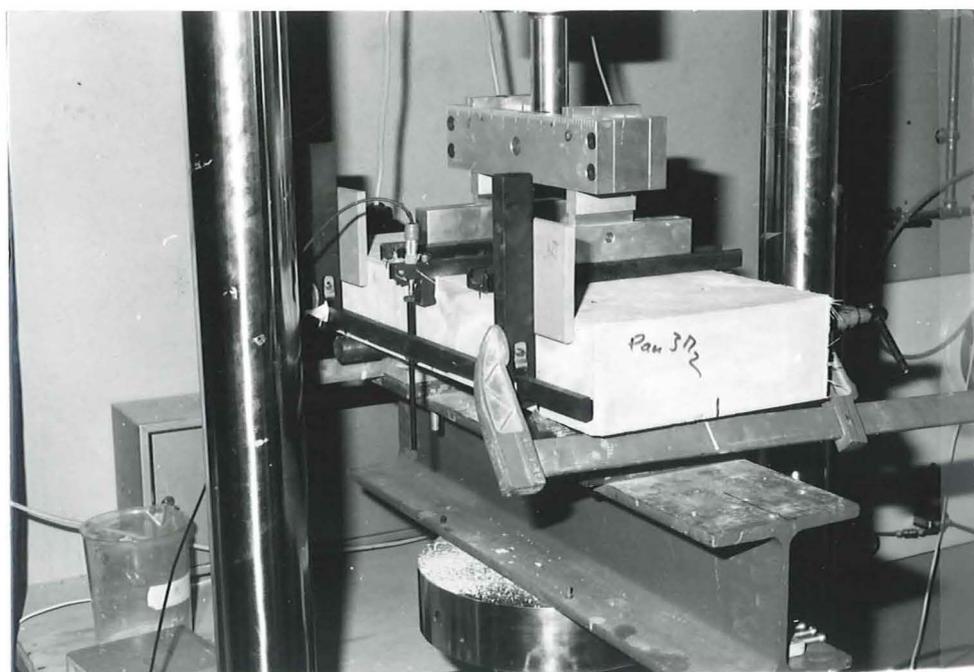
Du joli béton



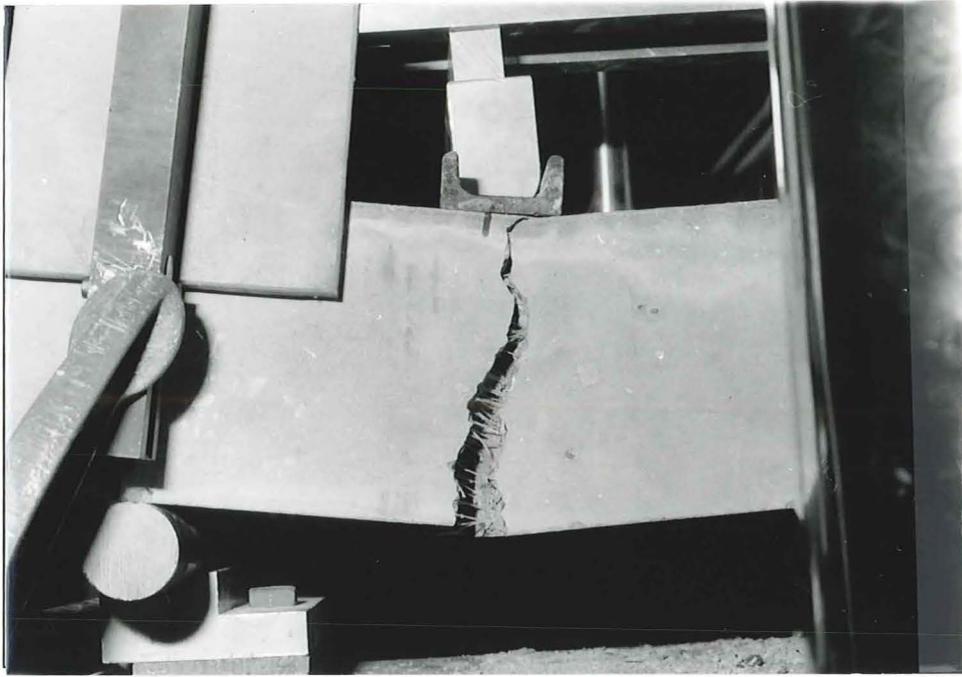
Les éléments en béton renforcé par Fibraflex juste après décoffrage.



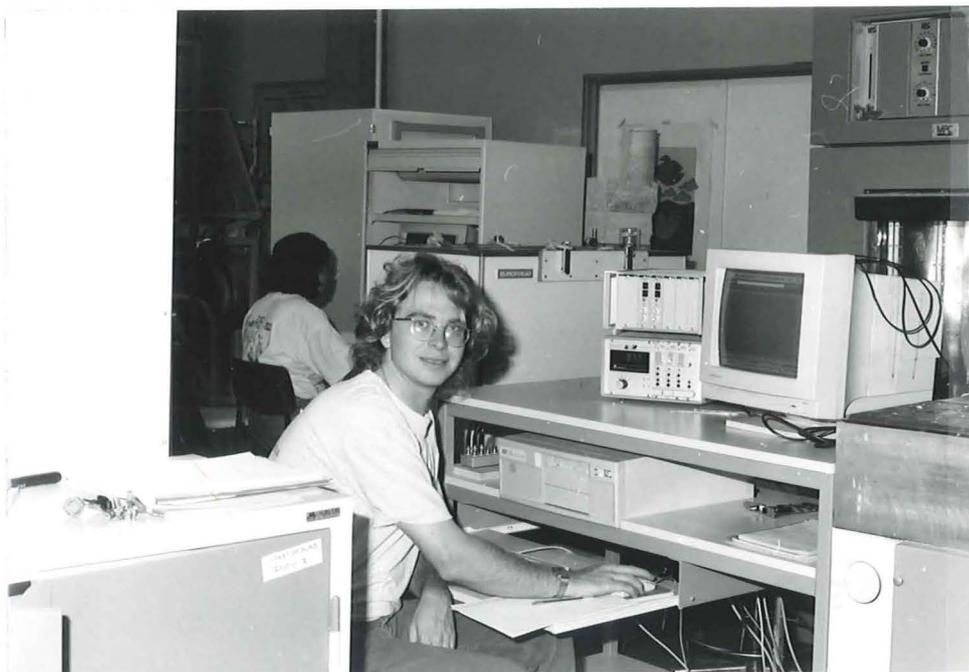
La presse que nous avons utilisé pour les essais des flexion.



Le montage d'un panneau pour l'essai de flexion.



La fissure à la fin d'une essais.



Moi devant le micro que nous avons utilisé pour enregistrer l'information pendant nos essais.

Béton renforcé des fibres.

Etude bibliographique et
présentation du projet de TFE.

Par:

Per-Anders Johansson

élève ingénieur à ECL 1996/97.

1. INTRODUCTION	3
2. L'AMÉLIORATION DES MATÉRIAUX GRÂCE AUX FIBRES.	4
2.1 La fonction des fibres	4
3. LES DIFFÉRENTS TYPES DE FIBRES UTILISÉES POUR RENFORCE BÉTON.	5
3.1 Les matériaux. ⁽¹⁾	5
3.1.1 L'acier	5
3.1.2 Le verre	6
3.1.3 L'Amiante	6
3.1.4 Synthétiques	7
3.1.5 Matériaux naturels	7
3.1.6 Résumé sur les différents matériaux.	7
4. LES APPLICATIONS.	9
4.1 Aujourd'hui	9
4.2 Dans l'avenir	10
5. PROJET DE TFE- RÉALISATION DE SECTION MINCE.	11
5.1 Planification de temps.	11
6. BIBLIOGRAPHIE	12

Introduction

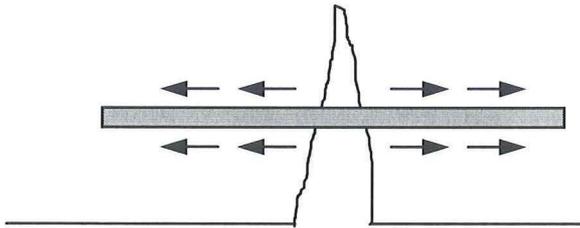
Le béton est un matériaux qui est beaucoup utilisé dans les bâtiments et les constructions de travaux publics. Le caractère de béton est une résistance élevée à la compression au même temps que la résistance à la tension est faible. C'est pourquoi le béton est renforcé par des barres en acier, le béton armé. Une autre idée est de mélanger des petites fibres dans le béton pour augmenter la résistance à la tension. Des fibres en différents matériaux et formes ont été utilisé. Dans une étude bibliographique pendant le deuxième trimestre j'ai regardé ce qui a été fait dans ce domaine. Cette étude est une préparation pour mon TFE (Travail de Fin d'Etudes). Mon projet est de développer de matrices cimentaires avec des fibres, qui permet des réaliser des produits minces. Je fais ici une brève présentation générale concernant l'utilisation et les essais qui ont été fait dans le domaine du béton de fibre. Vers la fin de ce rapport je présente aussi mon projet.

L'amélioration des matériaux grâce aux fibres.

L'idée de base pour utiliser des fibres est de diminuer la fragilité du béton due à sa faible résistance à la tension. L'expérience montre, par des essais et applications, que l'amélioration de la résistance à la tension et à la flexion n'est pas suffisamment importante pour devenir une alternative au béton armé classique. Mais il y a surtout des effets 'secondaire' qui sont intéressants, comme la protection contre les fissures, la résistance aux chocs et aux poids concentrés. Ce sont plutôt les domaines pour l'utilisation de béton renforcé par des fibres. Dans certaines applications ça peut être intéressant d'utiliser des fibres comme renforcement primaire, par exemple des sections minces et des sections avec des formes spéciales où le travail d'armature devient compliqué. Autrement le béton de fibres ne peut pas remplacer le béton armé classique, ni au niveau du comportement et ni en terme économique.

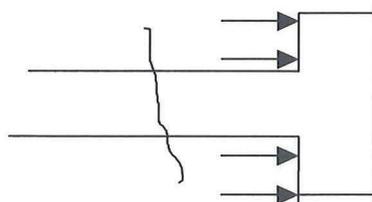
La fonction des fibres

Quand le béton fissure les fibres font des liens de pont avec des transferts d'efforts à travers les fissures. Le module élastique des fibres détermine la relation entre la taille de la fissure et la force engendrée dans la fibre. Plus le module est élevé, moins la taille des fissures est grande.



A part les propres paramètres des fibres, comme la résistance à la traction et le module élastique, la possibilité de créer une connexion pour transmettre des efforts entre le béton et les fibres est un facteur majeur. Ce transfert est en général obtenu par adhérence et friction sur les surfaces des fibres. Il y a deux modes de rupture: décollement dans l'interface ou rupture de la fibre. En fonction de ces deux phénomènes, différentes sections transversales et différentes longueurs ont été proposées. Le rapport entre la longueur et le diamètre (ou le diamètre équivalent) est utilisé pour dimensionner les fibres.

Il y a aussi des fibres avec des crochets ou des blocs aux extrémités et certaines sur des formes ondulées. Pour obtenir un autre type de transmission pour les efforts, plutôt dans le principe comme j'ai illustré dans ce dessin:



Les différents types de fibres utilisées pour renforcer le béton.

Des différents types de fibres ont été utilisés pour renforcer le béton. Ils sont produits à partir d'acier, de plastiques, de verres et de matériaux naturels sous différentes formes et dimensions. Chacune de ces catégories de fibres procure au béton des propriétés spécifiques et on ne peut pas regarder le béton avec une fibre comme un matériau. Il vaudrait mieux le regarder comme une famille de matériaux où chaque type a son propre comportement.

Les matériaux. ⁽¹⁾

L'acier

Les fibres en acier sont les plus utilisées dans le béton. Même si l'adhérence avec le béton est réellement bonne, des fibres non-droites sont aussi utilisées. Les fibres sont disponibles en plusieurs formes et en différentes dimensions.

La résistance à la traction va de 1000 à 2000 Mpa avec un module élastique de 200 Gpa. Ces valeurs élevées sont un avantage pour l'utilisation de ces fibres. Les fibres peuvent aussi être fabriquées dans presque n'importe quelle dimension et formes choisies. La sensibilité à la corrosion est un point faible. À cause de ça il faut souvent utiliser des matériaux avec une haute résistance à la corrosion. C'est souvent des aciers coûteux qui font que ce béton devient moins intéressant en comparaison économique avec d'autres alternatives.

Pendant le collage il y a aussi un risque de séparation des fibres parce que la densité d'acier est plus élevée que les autres matériaux dans le béton. Les fibres ont aussi une tendance à se grouper. À cause de ces phénomènes, il faut utiliser des méthodes adaptées pour la fabrication et la mise en place de ce béton.

Le verre

Des fibres en verre sont utilisées dans des composites de haute performance basés sur différents matériaux. Bien sur, des essais et applications avec des fibres en verre mélangé avec du béton ont été faits. Il y a un problème majeur, c'est que le verre ne support pas bien l'alcali. Pour éviter cette faiblesse on a attaqué les problèmes par deux directions. La première en développant un verre plus résistant, la seconde en trouvant un béton moins alcalin. Mais même avec ces efforts la durée de vie pour ces produits est toujours incertaine.

Pour la fabrication la méthode de projection parallèle des fibres et de la pâte est à recommander. Dans des mélanges c'est difficile d'obtenir une distribution homogène. Pour la maniabilité le béton demande aussi beaucoup d'eau et le facteur E/C augmente, et donne comme résultat une faible qualité.

L'Amiante

Amiante était le premier type de fibres utilisées dans le renforcement du béton. Les fibres s'intègrent bien avec les matrices cimentiers et c'est possible d'intégrer un nombre relativement important de fibres(10 % est même plus).

Aujourd'hui ces fibres ne sont plus utilisées à cause des effets négatifs sûr la santé. Les fibres sont cancérigènes et ça donne des problèmes pendant la production et pour la démolition. Rencontrer ces types de matériaux dans un projet de restauration est terrible pour le maître d'œuvre parce qu'il faut prendre des précautions énormes et souvent utilisées des entreprises spécialisées dans ces types de nettoyage. Mais en même temps le béton non-touché n'est pas dangereux parce que c'est de le respirer qui est dangereux et quand les fibres restent dans le béton il n'y a pas de problèmes. Pour des applications spéciales avec des préfabrication en usine, il est possible que l'utilisation de ce béton puisse revenir.

Synthétiques

Des fibres avec différents matériaux existent. On peut faire une distinction entre les fibres avec un module élastique élevé et celles où il est plus faible. Les matériaux utilisés, avec un module d'Young important, sont le Carbone, l'Aramide (Kevlar), l'Acrylique et la PVA. Les fibres avec un module plus faible sont surtout des produits en polypropylène. Le grand avantage en comparaison avec l'acier est que ces fibres sont inoxydables.

Souvent ces types de fibres sont mélangées dans le béton sont distribuées au hasard. Il faut toujours faire attention au phénomène de groupement des fibres pendant la fabrication. En générale la distribution est bonne et permet d'obtenir un matériel homogène.

Matériaux naturels

Des fibres des plante, comme le coton, le coïr (fibre de coco), le bois, le bambou, l'herbe à éléphant et des autres matériaux ont été utilisés dans des bétons, souvent pour développer des matériaux moins chers. Pour certaines applications des matrices avec des caractéristiques intéressante ont été développées. Pour ces matériaux on ne peut pas faire une conclusion générale sur les caractéristiques et je n'ai pas plongé mon étude dans ce grand domaine diversifié. Mais il y quelques phénomènes supplémentaires à prendre en compte avec les fibres naturelles. Elles peuvent être sensible aux attaques biologique et sont souvent très sensibles au changement d'humidité.

Résumé sur les différents matériaux.

Dans le tableau je présente les modules élastiques, les volumes des fibres qui peuvent être utilisées dans le béton et les résistances à la tension obtenue dans des essais ^(1,3).

Matériaux	Module élastique	volume des fibres	Résistance à tension en flexion
Acier	200 GPa	0,5 - 5 %	7 - 40 MPa
Verre	70 GPa	jusque 5%	9 - 14 MPa*
Amiante	150 GPa	2 - 15 %	14 - 25 MPa
Synthétique polypropylène	32 GPa	2 - 8 %	presque pas des influence sur la résistance
kevlar	70 - 125 GPa	1 - 5 %	11 - 24 MPa
acrylique	~ 15 GPa	~3 %	6 MPa
PVA	20 - 35 Gpa	1 - 2 %	35 MPa
Cellulose	18 Gpa	3%	25 MPa

* composite âgée

Même si de nombreux matériaux ont été utilisés dans des essais, on peut dire que c'est surtout deux catégories qui sont devenues des matériaux commerciaux, c'est l'acier et les fibres en plastique. C'est probablement ces familles qui vont être utilisées aussi dans l'avenir, pour des raisons techniques et économiques.

Les applications.

Aujourd'hui

Les bétons renforcés de fibres sont déjà établis comme des matériaux commerciaux dans certaines applications. C'est surtout les fibres en acier qui sont utilisées mais aussi des différentes fibres plastiques commencent à être de plus en plus intéressante. L'utilisation est tout naturellement orientée vers les structures présentant des phénomènes de fissurations avec des bétons conventionnels.

Quelques exemples²;

- les dalles:

Les dalles d'aéroport ou les dallages industriels sont soumis à des sollicitations complexes (charges importantes, poinçonnement, rotations ponctuelles). Avec des fibres dans tout le volume de béton, le renforcement est quasi-isotrope, ce qui évite des dégradations locales de ces structures.

Dans le cas des dallages, l'expérience a montré qu'un dosage adéquat de fibres (pour des fibres en acier de l'ordre de 20 kg/m³) peut avantageusement remplacer les treillis traditionnels, réduisant ainsi les coûts de construction.

- les resurfaçages:

Les resurfaçages minces constituent une technique intéressante pour restaurer les dégradations de surface des chaussées ou des infrastructures routières. La présence des fibres dans ces chapes d'épaisseur réduite permet de stabiliser les éventuelles fissures qu'elles soient d'origine physique (retrait, dilation) ou mécaniques (réflexion de la sous-structure).

- le béton projeté:

L'utilisation d'un béton renforcé de fibres comme béton projeté apporte de nombreux avantages. En particulier, les fibres peuvent remplacer les treillis traditionnels, ce qui se traduit par une réduction considérable du volume de béton nécessaire (il suffit de suivre le profil naturel de la paroi).

- autres applications:

Les usines de préfabrication utilisent les bétons renforcés de fibres dans certains éléments aux formes complexes et aux parois minces. Pour les fibres en acier certains problèmes relatifs à la corrosion en surface des fibres d'acier limitent toutefois ces développements. Il en est de même pour l'utilisation de fibres en verre mais à cause de l'incertitude sur la durée de vie de ces matériaux l'utilisation est limitée aux éléments qui n'ont pas de fonction constructive.

Dans l'avenir

Quelles sont les perspectives d'avenir pour les applications du béton renforcé de fibres ? Remplacer le béton armé par un matériaux ayant un comportement mécaniquement isotrope, réalisé par un renforcement avec des fibres est aujourd'hui un rêve non réalisable et va probablement rester un rêve à mon avis.

Mais c'est possible que les fibres puissent devenir une alternative aux armatures secondaires (générale) qui sont utilisées aujourd'hui et qui n'ont pas une fonction structurale autre que de garantir que le béton reste assemblé. Si les fibres deviennent moins chères elles peuvent devenir avantageuses même pour d'autres applications que des dalles, en prenant en compte la réduction des coûts de construction.

Un domaine où le béton de fibres peut trouver des applications sont dans des constructions qui n'ont pas de fonction porteuse primaire. Par exemple pour des panneaux de bâtiments où je vais évaluer les possibilités d'un concept dans mon TFE, présenté dans la chapitre suivant.

Projet de TFE- réalisation de section mince.

Mon projet de TFE est de réaliser de section mince de béton renforcé de fibres. Je vais travailler avec deux différents types de fibres, une fibre métallique "Fibraflex" et une fibre plastique "3M polyolefin Fibers". Pour les deux différents renforcements, il faut développer des matrices cimentiers avec des comportements voulu dans le but d'envisager une application, qui est un panneaux qui composé d'une plaque de polystyrène entouré de béton. Avec cette idée on peut obtenir un élément préfabriqué pour des murs extérieur avec une isolation thermique et avec deux bonnes surfaces. Pour tester cette idée je vais fabriquer des petits panneaux (0,3 x 0,6 m) et évaluer le remplissage est les caractéristiques mécaniques.

Je fais le travail dans le laboratoire de l'ENTPE (Ecole Nationale de Travaux Publics de l'Etat) à Vaux en Velin, en coopération avec M. Gilles Chanvillard, chercheur dans le domaine du béton et spécialiste sur le béton renforce de fibres.

La fibre métallique a déjà beaucoup été utilisées dans différentes travaux de M. Chanvillard mais la fibre de 3M est un nouveau produit qui vient de sortir sur le marché américain. Comme ça il y a aussi l'intérêt d'étudier le comportement du béton avec ce nouveau produit et faire la comparaison.

Planification de temps.

- | | |
|-------------|--|
| Sem. 15- 16 | Essais sur la pâte frais pour trouver des bonnes matrices de béton. |
| Sem 17 | Fabrication des panneaux. |
| Sem. 18-22 | Période d'attente pour que le béton prendre force. Temps pour écrire les premières parties du rapport et faire des calculs économiques, isolation acoustique etc.. |
| Sem. 23 | Teste de flexion et des autres testes mécaniques. |
| Sem. 24 - | Evaluation des testes mécaniques et travail de rapport. |
| 3 Juillet | Soutenance. |

Bibliographie

1. Bentur A. & Mindess S, *Fibre reinforced cementitious composites*. Department of Civil Engineering, National Building Research Institute, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, Israel and Departement of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
2. Chanvillard G., *Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d'acier tréfilées, ancrées dans une matrice cimentaire*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris.
3. Pierre ROSSI, Stephane RENWEZ et François GUERRIER, *Les Bétons à ultra-hautes performances fibres: Formulation comportement mécanique, modélisation*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris.
4. Ramakrishnan V. , *Evaluation of Non-Metallic Fiber Reinforced concrete in PCC Pavements and structures*. Department of Civil and Environmental Engineering, Rapi City, USA.
5. *Polyolefin Fibers (Product Data, Technical data, Guide Specification)*, 3M Polyolefin Fibers Team, 3M Center, St. Paul. USA.
6. Chanvillard G. & Basuyaux O. , *Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées*. Ecole nationale des travaux publics de l'Etat, bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées septembre-octobre 1996.