

YVES THERRIEN

**ÉTUDE SUR LA MULTIFISSURATION DU BÉTON RENFORCÉ DE
FIBRES D'ACIER ET LA DISTRIBUTION DES FIBRES**

**Mémoire
présenté
à la faculté des études supérieures
de l'Université Laval
pour l'obtention
du grade de maître ès sciences (M.Sc.)**

**Département de génie civil
FACULTÉ DES SCIENCES ET GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL**

Décembre 1998

© Yves Therrien, 1998



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*

Our file *Notre référence*

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-38198-6

RÉSUMÉ

Les principaux objectifs de ce projet étaient d'étudier la distribution des fibres d'acier à l'intérieur d'une réparation de béton de faible épaisseur et la multifissuration du béton renforcé de fibres d'acier. L'étude comportait donc une partie plus statistique où l'anisotropie et l'hétérogénéité des fibres étaient évaluées et une autre où la fissuration et le comportement post-fissuration étaient analysés. Les résultats indiquent qu'aucun procédé de mise en place spécial n'est nécessaire pour obtenir une distribution de fibres efficace à l'intérieur d'une réparation mince. Par contre, aucun mélange fabriqué, qu'il soit de faible ou forte résistance, avec beaucoup ou peu de fibres de différents types, n'a affiché un comportement multifissurant. En fait, lors des essais de traction, la chute de résistance après l'apparition de la première fissure est beaucoup trop élevée. Même à des dosages en fibres de l'ordre de 1,25%, les fibres ne permettent pas d'obtenir un pseudo-écrouissage en traction directe, un comportement pressenti comme une condition nécessaire à l'obtention de la multifissuration.

Yves Therrien

Richard Pleau

AVANT-PROPOS

Ce mémoire de maîtrise n'aurait jamais vu le jour sans la précieuse collaboration de plusieurs personnes, je tiens donc à les remercier chaleureusement.

Je remercie tout d'abord mes codirecteurs de recherche, soit Richard Pleau et Benoît Bissonnette, pour leur aide technique et leurs précieux conseils lors de l'élaboration de ce projet, ainsi que François Saucier pour en avoir été l'instigateur.

Un grand merci également à Michel Pigeon et aux gens de la Chaire industrielle sur le béton projeté et les réparations en béton pour leur soutien financier. Je remercie tous les membres du CRIB pour leur attention et en particulier Marcel Langlois, David Boily et Olivier Laurence pour leur aide au laboratoire. Les techniciens du département de génie civil m'ont beaucoup aidé également. Entre autres, il y a Denis Lagacé, Claude Savary et Jean-Claude Prince.

En terminant, je tiens à remercier tout particulièrement Johanne pour la compréhension qu'elle m'a offerte au cours des trois dernières années.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
AVANT-PROPOS	ii
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	vii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1: REVUE DE LA DOCUMENTATION	
1.1 Réfection des chaussées en béton de ciment.....	3
1.1.1 Types d'endommagement.....	3
1.1.1.1 Épaufrures	3
1.1.1.2 Fissuration.....	4
1.1.1.3 Autres.....	4
1.1.2 Techniques de réhabilitation superficielle.....	5
1.1.2.1 Resurfaçage adhérent.....	5
1.1.2.2 Resurfaçage partiellement adhérent.....	6
1.1.2.3 Resurfaçage non adhérent.....	6
1.1.3 Efficacité des réparations superficielles.....	6
1.1.3.1 Compatibilité déformationnelle.....	7
1.1.3.2 Compatibilité des perméabilités.....	9
1.1.3.3 Compatibilité chimique et électrochimique.....	9
1.1.4 Conclusion.....	9
1.2 Béton renforcé de fibres d'acier.....	9
1.2.1 Béton renforcé de fibres.....	9
1.2.2 Types de fibres.....	10
1.2.3 Retrait.....	11
1.2.4 Resurfaçages en BRFA.....	16
1.2.3.1 Généralités.....	16
1.2.3.2 Expériences antérieures.....	17
1.2.5 Conclusion.....	19
1.3 Fissuration du BRFA.....	20
1.3.1 Distribution des fibres	20

1.3.1.1	Mesure de l'anisotropie.....	21
1.3.1.2	Mesure de l'hétérogénéité.....	24
1.3.2	Multifissuration.....	26
1.3.2.1	Cas des fibres continues et alignées.....	27
1.3.2.2	Cas des fibres courtes et aléatoirement distribuées.....	28
1.3.2.3	Paramètres qui influencent la multifissuration.....	34
1.3.2.4	Essais.....	37
1.4	Conclusion.....	39
CHAPITRE 2: PROGRAMME DE RECHERCHE		
2.1	Contexte et objectif du projet.....	41
2.2	Programme d'essais.....	42
2.2.1	Étude de la distribution des fibres.....	42
2.2.2	Étude de la multifissuration.....	43
2.3	Matériaux utilisés et mélanges de béton.....	44
2.3.1	Étude de la distribution des fibres.....	44
2.3.1.1	Ciment.....	44
2.3.1.2	Granulats.....	45
2.3.1.3	Fibres.....	45
2.3.1.4	Adjuvants.....	46
2.3.1.5	Nomenclature et composition des mélanges.....	46
2.3.2	Étude de la multifissuration.....	47
2.3.2.1	Ciment.....	47
2.3.2.2	Granulats.....	48
2.3.2.3	Fibres.....	48
2.3.2.4	Adjuvants.....	49
2.3.2.5	Nomenclature et composition des mélanges.....	49
2.4	Procédures de fabrication des mélanges et d'essais.....	50
2.4.1	Distribution des fibres.....	50
2.4.1.1	Fabrication des mélanges.....	50
2.4.1.2	Essais sur le béton frais.....	51
2.4.1.3	Fabrication des corps d'épreuve.....	51
2.4.1.4	Essais sur le béton durci.....	52
2.4.2	Multifissuration.....	55
2.4.2.1	Fabrication des mélanges.....	55
2.4.2.2	Essais sur le béton frais.....	55
2.4.2.3	Fabrication des corps d'épreuve.....	56

2.4.2.4 Essais sur le béton durci.....	57
CHAPITRE 3: DISTRIBUTION DES FIBRES: RÉSULTATS ET ANALYSE	
3.1 Introduction.....	64
3.2 Résultats généraux.....	64
3.3 Isotropie.....	66
3.4 Hétérogénéité.....	69
3.CHAPITRE 4: MULTIFISSURATION: RÉSULTATS ET ANALYSE	
4.1 Introduction.....	79
4.2 Essais de compression et de module élastique.....	79
4.3 Essais de flexion.....	81
4.4 Essais de retrait libre.....	90
4.5 Essais de retrait restreint.....	96
4.6 Essais de traction thermique.....	103
4.7 Essais de traction avec le vérin.....	112
CONCLUSION	115
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	118
ANNEXE A: Variation de l'humidité relative et de la température à l'intérieur du laboratoire de béton	
ANNEXE B: Évolution du retrait libre (tableau complet et tableau résumé)	
ANNEXE C: Calcul du module élastique du béton	
ANNEXE D: Calibration des ponts de jauges en fonction de la température	
ANNEXE E: Tableaux des résultats du comptage des fibres	

LISTE DES TABLEAUX

tableau 2.1: Caractéristiques du ciment.....	44
tableau 2.2: Granulométrie du sable.....	45
tableau 2.3: Composition des mélanges.....	47
tableau 2.4: Caractéristiques du ciment.....	47
tableau 2.5: Granulométrie du sable et de la pierre.....	48
tableau 2.6: Composition des mélanges.....	50
tableau 2.7: Essais sur le béton frais.....	51
tableau 2.8: Essais sur le béton frais.....	56
tableau 3.1: Variation du nombre de fibres sur les plans longitudinaux à la dalle.....	71
tableau 4.1: Résistance à la compression.....	80
tableau 4.2: Résistance à la flexion.....	82
tableau 4.3: Écarts de température et d'humidité relative.....	95
tableau 4.4: Correspondance entre les mélanges et les cadres d'acier.....	100
tableau 4.5: Relation voltage vs température.....	108
tableau 4.6: Essai de traction thermique.....	109
tableau 4.7: Densité de fibres: flexion vs traction	111

LISTE DES FIGURES

figure 1.1: Diagramme des efforts de compression pour deux bétons de module d'élasticité différents, après une réparation.....	7
figure 1.2: Différents effets du retrait différentiel entre deux bétons.....	8
figure 1.3: Influence des fibres d'acier ondulées sur le retrait libre du béton.....	13
figure 1.4: Influence du rapport d'élanement des fibres sur le retrait libre du béton.....	13
figure 1.5: Types d'essais de retrait restreint.....	14
figure 1.6: Largeur moyenne des fissures en fonction de la fraction volumique de fibres....	15
figure 1.7: Facteur d'efficacité global.....	22
figure 1.8: Effet de la dimension de l'éprouvette sur le facteur d'orientation.....	23
figure 1.9: Évolution du facteur d'orientation axial et transversal.....	24
figure 1.10: Distribution du nombre de fibres dans une éprouvette rompue.....	25
figure 1.11: Illustration du modèle ACK.....	27
figure 1.12: Courbe contrainte-déformation typique en traction.....	28
figure 1.13: Différents termes énergétiques considérés dans le modèle.....	30
figure 1.14: Multifissuration d'un composite renforcé de fibres courtes.....	31
figure 1.15: Détermination du volume critique de fibres.....	32
figure 1.16: Multifissuration d'une pâte de ciment renforcée de fibres.....	34
figure 1.17: Essais de traction directe et de flexion 4-points.....	38
figure 2.1: Géométrie des fibres.....	46
figure 2.2: Géométrie des fibres.....	49
figure 2.3: Description des dalles.....	54
figure 2.4: Schéma du montage de l'essai de retrait restreint.....	59
figure 2.5: Disposition des plots.....	61
figure 2.6: Schéma de l'essai de traction.....	62
figure 3.1: Orientation globale des fibres selon différentes méthodes.....	66
figure 3.2: Variation du nombre de fibres par unité de surface en fonction du type de structuration.....	67
figure 3.3: Relation entre la maniabilité des mélanges et leur anisotropie.....	68
figure 3.4: Orientation des fibres en fonction de la profondeur de l'échantillon.....	68

figure 3.5: Système cartésien utilisé.....	69
figure 3.6: Nombre de fibres traversantes sur les plans horizontaux.....	70
figure 3.7: Nombre de fibres traversantes sur les plans verticaux.....	70
figure 3.8: Nombre de fibres sur les plans longitudinaux et transversaux.....	71
figure 3.9: Variation du nombre de fibres sur les plans longitudinaux de la dalle 35-D-20..	72
figure 3.10: Variation du nombre de fibres sur les plans longitudinaux de la dalle 45-D-20.	72
figure 3.11: Variation du nombre de fibres sur les plans longitudinaux de la dalle 35-D-40.	73
figure 3.12: Variation du nombre de fibres sur les plans longitudinaux de la dalle 45-D-40.	73
figure 3.13: Variation du nombre de fibres sur les plans longitudinaux de la dalle 35-D-60.	74
figure 3.14: Variation du nombre de fibres sur les plans longitudinaux de la dalle 45-D-60.	74
figure 3.15: Variation du nombre de fibres sur les plans transversaux de la dalle 35-D-20..	75
figure 3.16: Variation du nombre de fibres sur les plans transversaux de la dalle 45-D-20..	75
figure 3.17: Variation du nombre de fibres sur les plans transversaux de la dalle 35-D-40..	76
figure 3.18: Variation du nombre de fibres sur les plans transversaux de la dalle 45-D-40..	76
figure 3.19: Variation du nombre de fibres sur les plans transversaux de la dalle 35-D-60..	77
figure 3.20: Variation du nombre de fibres sur les plans transversaux de la dalle 45-D-60..	77
figure 4.1: Essai de flexion du mélange 40-X-X.....	81
figure 4.2: Essai de flexion du mélange 40-T-40.....	83
figure 4.3: Essai de flexion du mélange 40-T-60.....	84
figure 4.4: Essai de flexion du mélange 40-T-100.....	84
figure 4.5: Essai de flexion du mélange 40-D-100.....	85
figure 4.6: Essai de flexion du mélange 60-T-100.....	85
figure 4.7: Essai de flexion du mélange 80-D-100 à 3 jours.....	86
figure 4.8: Essai de flexion du mélange 80-D-100 à 28 jours.	86
figure 4.9: Module de rupture moyen et charge maximale moyenne pour les différents mélanges.....	88
figure 4.10: Efficacité en flexion des différents types de fibres pour les mélanges de rapport eau/ciment de 0,40.....	88
figure 4.11: Évolution du retrait libre pour le mélange 40-X-X.....	90
figure 4.12: Évolution du retrait libre pour le mélange 40-T-40.....	90
figure 4.13: Évolution du retrait libre pour le mélange 40-T-60.....	91
figure 4.14: Évolution du retrait libre pour le mélange 40-T-100.....	91
figure 4.15: Évolution du retrait libre pour le mélange 40-D-100.....	92
figure 4.16: Évolution du retrait libre pour le mélange 60-T-100.....	92
figure 4.17: Évolution du retrait libre pour le mélange 80-D-100.....	93
figure 4.18: Retrait libre des différents mélanges à 100 jours.....	94

figure 4.19: Perte de masse des différents mélanges à 100 jours.....	96
figure 4.20: Évolution des contraintes pour le mélange 40-X-X.....	97
figure 4.21: Évolution des contraintes pour le mélange 40-T-40.....	97
figure 4.22: Évolution des contraintes pour le mélange 40-T-60.....	98
figure 4.23: Évolution des contraintes pour le mélange 40-T-100.....	98
figure 4.24: Évolution des contraintes pour le mélange 40-D-100.....	99
figure 4.25: Évolution des contraintes pour le mélange 60-T-100.....	99
figure 4.26: Évolution des contraintes pour le mélange 80-D-100.....	100
figure 4.27: Contrainte de traction atteinte lors du retrait restreint.....	101
figure 4.28: Essai de traction thermique du mélange 40-X-X.....	103
figure 4.29: Essai de traction thermique du mélange 40-T-40.....	104
figure 4.30: Essai de traction thermique du mélange 40-T-60.....	104
figure 4.31: Essai de traction thermique du mélange 40-T-100.....	105
figure 4.32: Essai de traction thermique du mélange 40-D-100.....	105
figure 4.33: Essai de traction thermique du mélange 60-T-100.....	106
figure 4.34: Essai de traction thermique du mélange 80-D-100 à 3 jours.....	106
figure 4.35: Essai de traction thermique du mélange 80-D-100 à 28 jours.....	107
figure 4.36: Essai de traction directe avec un vérin (mélange 40-T-40).....	112
figure 4.37: Essai de traction directe avec un vérin (mélange 40-T-60).....	113
figure 4.38: Essai de traction directe avec un vérin (mélange 40-T-100).....	113

INTRODUCTION

Problématique et mise en contexte

Depuis quelques années, on étudie l'alternative du béton renforcé de fibres d'acier (BRFA) dans le domaine des réfections superficielles. Parmi les réparations minces de ce type, on compte celles des routes, en particulier certaines autoroutes et grandes artères de la province de Québec. Les hivers rigoureux, les dégels du printemps ainsi que l'augmentation des charges routières font que plusieurs kilomètres de routes québécoises sont détériorés de façon plus ou moins importantes.

Comme la fondation de ces routes est parfois construite en béton, une nouvelle réparation en béton devient une solution parfois envisageable. Le problème majeur des réparations en béton est qu'elles sont très onéreuses compte tenu du fait que parfois leur durée de vie ne dépasse guère celle d'une réparation en béton bitumineux.

C'est donc en ce qui a trait à la durée de vie que le BRFA pourrait faire sa marque. L'idée de base se résume à mettre en oeuvre un béton ayant la possibilité de "contrôler" par lui-même sa fissuration, c'est-à-dire qu'il se fissurerait à de nombreux endroits et ces fissures demeurerait très étroites, donc moins dommageables. Si la réparation de béton ne possède pas de joint pour dissiper les changements volumétriques, les coûts de mise en oeuvre et d'entretien seront diminués et les zones de faiblesse que constituent ces joints seraient absentes de la réparation, résultant en une espérance de vie plus longue. Le désavantage marqué de ce type de béton est son coût de production. Aux dosages les plus élevés rencontrés usuellement en pratique, soit de l'ordre de 40 kg/m^3 , le prix du béton est accru de 50 à 100%.

Ce projet a été initié à la suite d'une étude sur la "survie après fissuration" du béton armé de fibres sollicité en fatigue. Cette étude avait démontré qu'une rupture écrouissante et ductile pouvait être obtenue en flexion [Saucier et coll. 1996]. Ce type de rupture étant

considéré comme une condition essentielle à l'obtention de la multifissuration. Cependant, les résultats étaient très variables étant donné une variation élevée du nombre de fibres dans les plans de rupture.

Objectifs

Au cours de ce projet, nous tenterons de mettre au point un mélange de béton dit multifissurant. Dans un premier temps, nous étudierons la distribution des fibres à l'intérieur d'une réparation de faible épaisseur de manière à évaluer si une mise en place spéciale serait nécessaire pour obtenir une contribution plus efficace des fibres. Cette étude, purement statistique, s'effectuera en comptant les fibres sur différents plans d'une dalle mince.

Suite à cela, nous effectuerons des essais de retrait restreint sur des corps d'épreuve de grande taille de manière à reproduire de façon relativement fidèle le comportement d'éléments réels en condition d'utilisation. En plus de ces essais particulier, d'autres plus conventionnels seront menés en parallèle de manière à bien caractériser les bétons étudiés.

Grâce au programme expérimental fondé sur ces objectifs de base ainsi que les résultats qui seront obtenus, nous espérons mettre en évidence les bénéfices potentiels liés à l'utilisation des BRFA dans le domaine des réparations superficielles en béton, tant pour les applications routières que pour d'autres types d'applications.

Cette étude est menée dans le cadre d'une série de projets couvrant l'axe "whitetopping" de la Chaire industrielle sur les réparations de béton et le béton projeté.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA DOCUMENTATION

1.1 Réfection des chaussées en béton de ciment

Le réseau routier québécois compte l'équivalent d'environ 500 km de routes à deux voies construites en béton de ciment. Étant donné que la plupart ont 20 à 35 ans de service, plusieurs d'entre elles montrent des signes de dégradation plus ou moins sévères. Il faut donc réagir maintenant, et procéder à l'entretien et à la réhabilitation nécessaires afin de conserver un réseau routier qui réponde aux besoins des usagers [Chanvillard et coll. 1989].

Malgré qu'il existe différentes techniques pour la construction des chaussées en béton, c'est-à-dire les chaussées béton/béton bitumineux, les chaussées en béton ordinaire avec joints, les chaussées en béton renforcé avec joints et les chaussées en béton renforcé continûment, il n'en demeure pas moins que les désordres qu'on y observe sont souvent les mêmes. Dans les prochains paragraphes, les dommages les plus caractéristiques des routes en béton ainsi que les diverses techniques de réhabilitation sont présentées.

1.1.1 Types d'endommagement

1.1.1.1 *Épaufrures*

La douceur de roulement est une qualité essentielle d'une bonne route. Malheureusement la présence d'épaufrures aux joints de contrôle et aux joints d'expansion rend la chaussée à la fois très désagréable et dommageable pour les véhicules qui y circulent. Au fil des années, avec les intempéries et la circulation routière intense, les sollicitations thermiques et mécaniques endommagent les joints en causant la fissuration du béton de

chaque côté de ceux-ci depuis la base jusqu'à la surface en suivant une diagonale plus ou moins inclinée. Ceci cause de grandes failles sur une route de béton et le remplissage de ces dernières avec du béton bitumineux ou tout autre matériau n'est pas très efficace. Comme les joints sont espacés de 7 à 30 m, ce type d'endommagement est l'un des plus importants et l'un des plus coûteux à corriger.

1.1.1.2 *Fissuration*

Malgré la présence des joints de retrait et des joints d'expansion, le contrôle de la fissuration n'est pas assuré à 100%. Qu'elles soient transversales ou longitudinales, les fissures causées par les changements volumétriques du béton, sont toutes aussi nuisibles qu'un joint endommagé si leur ouverture est assez large. En effet, en plus d'altérer le profil de la chaussée, tous ces défauts de grande dimension facilitent la pénétration d'agents agressifs dans le béton et peuvent dans certains cas, si la fissure se propage sur toute la profondeur de la dalle, provoquer un lessivage local de la fondation.

La cambrure des dalles au séchage peut également provoquer de la fissuration. Suite au séchage différentiel entre la partie supérieure et la partie inférieure de la dalle de béton, le gradient de retrait qui en résulte fait légèrement remonter les coins des dalles [Rollings 1993]. Sous leur poids propre et l'action des charges routières, les coins de dalles sont très fortement sollicités et on assiste à l'apparition de fissures obliques localisées.

1.1.1.3 *Autres*

En plus des désordres fréquents évoqués dans les sous-sections qui précèdent, les chaussées en béton de ciment peuvent être atteintes de quelques autres types de dégradation. On a qu'à penser au vieillissement de la surface par érosion et abrasion qui se traduit par un orniérage, à l'écaillage de la surface dû aux cycles de gel et de dégel jumelés à l'utilisation des sels fondants et à la corrosion des barres d'armature. L'éjection d'eau et de matériels fins à travers les joints (pompage) et les fissures, la différence d'élévation entre les deux côtés d'un joint ou d'une fissure et enfin différentes dégradations chimiques liées à la composition du ciment et aux types de granulats (ex. réaction alcali-granat) représentent d'autres désordres plus ou moins importants quoique généralement présents. Peu importe le mécanisme, le résultat est généralement le même, l'avancement progressif de la dégradation de la chaussée de béton de ciment.

1.1.2 Techniques de réhabilitation superficielle

Pour remédier à ces dégradations, qui peuvent devenir préjudiciables aux usagers, et pour prolonger la durée de vie de la chaussée, il est indispensable d'entreprendre un programme de réhabilitation. Selon l'ampleur des dégradations, quelques options de réhabilitation peuvent être envisagées. Il y a entre autre le recyclage, la reconstruction et le resurfaçage [Chanvillard et coll. 1994]. Lorsque la dégradation n'est pas trop importante, l'option offerte par le resurfaçage est la plus avantageuse, car d'une part, elle est plus économique et d'autre part, elle peut être utilisée pour corriger une déficience de surface, corriger une déficience structurale ou simplement augmenter la capacité structurale de la chaussée. Il existe plusieurs types de resurfaçage et, selon la nature et l'état de la chaussée existante, on retrouve les resurfaçages adhérents, partiellement adhérents et non adhérents. Le choix du degré d'adhérence entre les deux bétons conditionne la conception et le type de construction du resurfaçage [Chanvillard et coll. 1989].

1.1.2.1 *Resurfaçage adhérent*

L'interface adhérente est obtenue en procédant à un nettoyage très soigné de l'ancienne dalle pour éliminer les particules lâches et toutes les substances (huiles, caoutchouc, etc.) susceptibles d'empêcher le resurfaçage de bien adhérer à la base. Les principales techniques utilisées pour traiter la surface sont le marteau pneumatique, la scarification à froid, le jet de sable, le jet d'eau et la projection de billes d'acier. L'hydrodémolition apparaît comme l'une des meilleures techniques, car elle est moins dommageable pour le support que les techniques plus traditionnelles de type mécanique [Schroder 1992].

Tout juste avant la mise en place du béton de resurfaçage, un mortier ou un coulis est généralement répandu sur l'ancienne dalle à l'aide d'un balai ou d'une brosse pour améliorer l'adhérence au contact des deux dalles. Le but recherché lorsqu'on opte pour une interface totalement adhérente est d'obtenir une action composite totale (comportement monolithique). Comme une liaison intime avec l'ancienne dalle favorise grandement la réflexion des défauts, tels que les fissures, on utilise plutôt l'interface adhérente dans le cas des chaussées dont la structure est encore en bon état. Pour éviter la création de fissures secondaires dans le resurfaçage causées par les mouvements de la dalle principale, il est essentiel de placer les joints du resurfaçage aux mêmes endroits que ceux de l'ancienne dalle. De plus, pour obtenir une nouvelle structure semblable à l'ancienne, les joints doivent être pratiqués sur l'épaisseur

totale du resurfaçage. L'avantage de ce type d'interface est la faible épaisseur du resurfaçage, mais ses inconvénients sont la réflexion des fissures et la difficulté à développer systématiquement une bonne adhérence.

1.1.2.2 *Resurfaçage partiellement adhérent*

Pour obtenir une interface partiellement adhérente, aucune attention particulière n'est requise afin de favoriser ou d'empêcher une adhérence entre les deux dalles, mais il faut quand même retirer de la surface les produits qui pourraient nuire au développement d'une adhérence ou d'une friction naturelle. Tout comme pour l'interface adhérente, les joints doivent se prolonger sur l'épaisseur totale du resurfaçage. L'avantage marqué de cette technique est sa simplicité de réalisation puisqu'aucune précaution majeure ne doit être prise. Il suffit que le béton soit mis en place en respectant les règles de l'art. Les inconvénients sont que l'épaisseur de béton requise est supérieure au cas adhérent et que la réflexion des fissures est probable. Il est donc conseillé d'utiliser ce type de resurfaçage sur une dalle en assez bon état et ne nécessitant pas une augmentation de capacité portante.

1.1.2.3 *Resurfaçage non adhérent*

Pour ce qui est des resurfaçages avec l'interface non adhérente, le but est d'obtenir deux dalles indépendantes du point de vue mécanique. Pour en arriver à cela, un matériau qui ne possède pas d'adhérence naturelle avec le béton est placé entre les deux dalles de béton et c'est ce matériau intermédiaire qui constitue l'interface. On doit simplement colmater les fissures et les joints ainsi que les défauts majeurs avant l'application du matériau intermédiaire. Quant aux joints, leur espacement dépendra uniquement du type de béton choisi pour le resurfaçage, mais peu importe le choix, leur disposition est indépendante des joints de la chaussée existante. Les principaux inconvénients de cette technique sont la grande épaisseur de béton requise et la nécessité d'une couche supplémentaire pour rompre l'adhérence. Cette technique est utilisée dans le cas d'une chaussée existante en mauvais état.

1.1.3 Efficacité des réparations superficielles

Lorsqu'on utilise un resurfaçage adhérent ou partiellement adhérent, comme c'est généralement le cas, la nature composite de la dalle résultante devient un problème de premier plan, puisque l'ancien et le nouveau béton sont liés par une interface qui constitue souvent le point de faiblesse du système. Comme les deux matériaux affichent inévitablement des

différences de comportement volumétrique et possèdent dans certains cas des propriétés très différentes, des contraintes de traction et de cisaillement importantes peuvent être générées dans l'élément, notamment au niveau de l'interface, ce qui peut résulter en une détérioration rapide de la réparation. Dans les sous-sections qui suivent, on résume brièvement les différents problèmes de compatibilité des réparations minces répertoriés par Saucier (1990).

1.1.3.1 Compatibilité déformationnelle

Il y a tout d'abord la compatibilité élastique des matériaux qui est un aspect important, principalement dans les réparations de nature structurale. Une différence dans les valeurs de modules élastiques provoque un débalancement des contraintes vers le matériau le plus rigide (voir la figure 1.1).

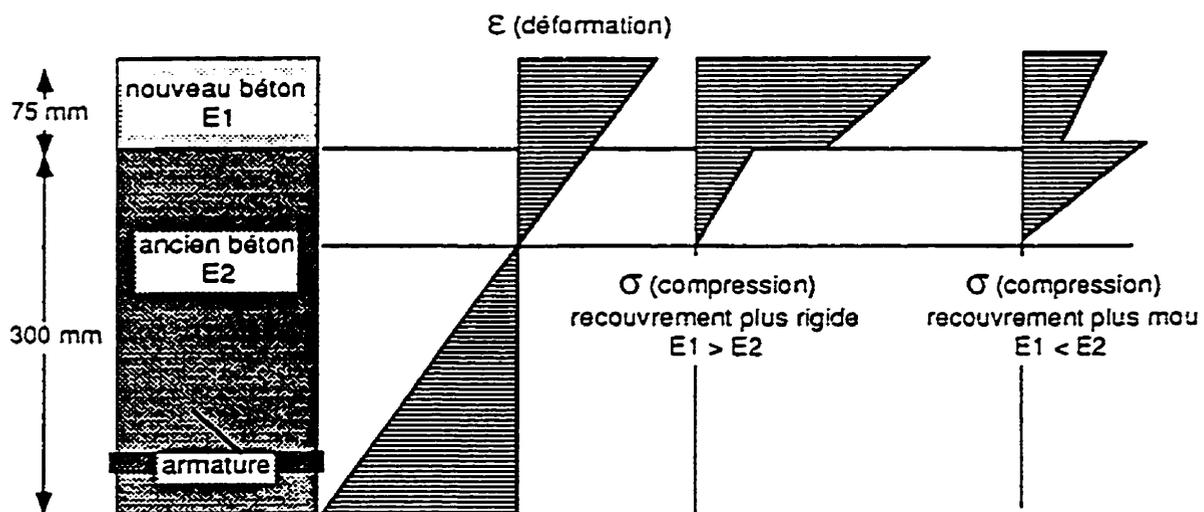


Figure 1.1: Diagramme des efforts de compression pour deux bétons de module d'élasticité différents, après une réparation (Saucier 1990)

Comme le béton est un matériau poreux et hétérogène complexe, des variations dans les conditions environnantes, qu'elles soient d'ordre thermique ou hydrique, entraînent inévitablement des changements volumétriques qui peuvent affecter la durabilité d'une réparation.

Le meilleur exemple est sûrement le retrait différentiel entre un ancien béton et le béton de réparation. Après 10 à 20 ans d'exposition à l'humidité ambiante, l'ancien béton a atteint

un état de stabilité hydrique relatif tandis que le retrait de séchage du béton de réparation (500 à 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$) débute. L'interface étant adhérente, le retrait du béton de réparation est restreint par le support rigide et des contraintes de traction et de cisaillement sont créées. Si ces contraintes dépassent la résistance du béton de réparation et/ou de la zone interfaciale, différents types de désordres peuvent survenir (voir la figure 1.2).

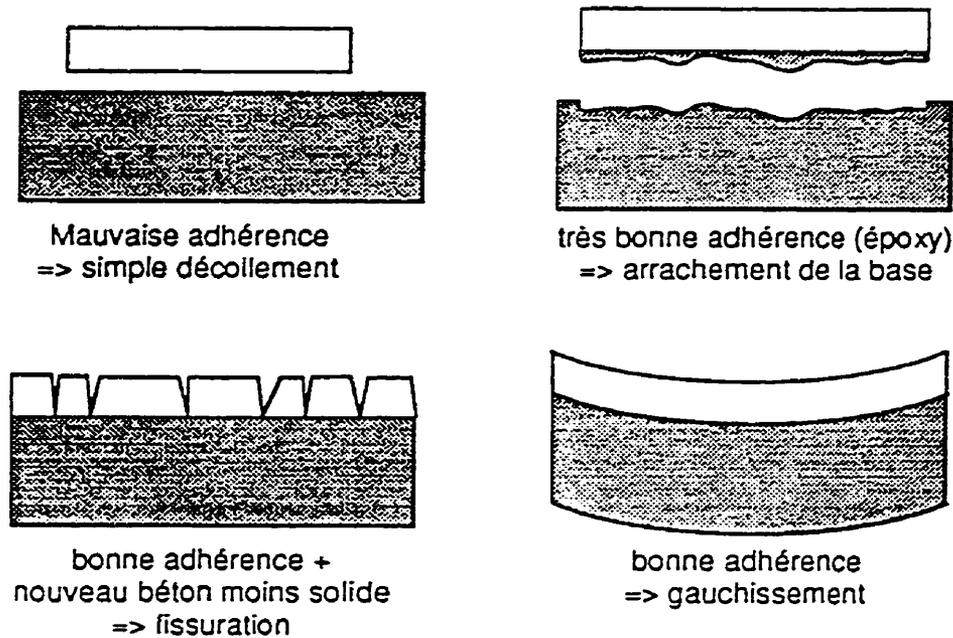


Figure 1.2: Différents effets du retrait différentiel entre deux bétons (Saucier 1990)

Lorsque l'on fait sécher une éprouvette de béton, le retrait est inévitable et c'est la pâte de ciment qui en est la cause. Le retrait de séchage est influencé, entre autre, par la quantité de pâte dans le béton, le dosage et la nature du granulat. Il faut toutefois distinguer le retrait de séchage du retrait endogène (autodessication) et du retrait au jeune âge car ces mécanismes ne sont pas étudiés dans le cadre de ce projet.

Le second paramètre causant les changements volumétriques du béton est la variation de la température. Dans le cas d'une réparation, les problèmes de compatibilité peuvent découler d'un écart de température significatif entre les deux bétons lors de la réparation ou bien une différence trop importante entre leur coefficient de dilatation thermique respectif. Comme dans le cas du retrait, des contraintes importantes peuvent être générées à l'interface et contribuer à la détérioration de l'adhérence.

1.1.3.2 *Compatibilité des perméabilités*

Les bétons de réparation ne possèdent pas toujours des propriétés physiques semblables à celles du béton existant. Parmi celles-ci, se trouve généralement une différence de perméabilité qui peut parfois entraîner une saturation de l'ancien béton et une accumulation d'eau à l'interface si une source d'humidité est présente (sol, eau). Toute cette eau est nuisible au béton lors des cycles de gel et de dégel car son mouvement est restreint par la présence de la réparation et son expansion peut faire éclater le béton.

1.1.3.3 *Compatibilité chimique et électrochimique*

Ajoutons enfin que les désordres d'origine chimique et électrochimique, comme ceux causés par les réactions alcalis-granulats et la corrosion des barres d'armature, peuvent également entraîner des problèmes de compatibilité. Le choix des matériaux de réparation devient alors très important, en particulier dans les cas où la réparation est effectuée à la suite d'un désordre de ce type [Bissonnette 1996].

1.1.4 Conclusion

Lorsque vient le temps de choisir un type de réparation plutôt qu'un autre, différents paramètres doivent être pris en compte et la réalisation d'un resurfaçage économique et durable représente un défi de taille pour les concepteurs. Ce défi inclut les problèmes de conception d'une chaussée, l'évaluation du pavage existant ainsi que l'évaluation du degré de compatibilité du nouveau béton avec l'ancien. Le choix du type d'interface (adhérent vs non-adhérent) et celui du matériau est très important, car ce sont eux qui conditionnent le mode de fonctionnement du resurfaçage.

1.2 **Béton renforcé de fibres d'acier**

1.2.1 Béton renforcé de fibres

Le béton ordinaire est un matériau quasi-fragile qui possède une résistance en traction et une déformation à la rupture faibles. L'addition de barres d'armature, aux endroits propices, permet de reprendre les efforts de traction à l'intérieur d'éléments structuraux. De leur côté, les fibres, discontinues et aléatoirement distribuées dans la masse de béton, jouent un rôle à l'échelle du matériau en s'opposant à la propagation de la fissuration, mais elles ne

contribuent pas significativement à la capacité structurale. C'est donc dire que les fibres ne sont pas un substitut aux barres d'armature, mais plutôt un complément [Bentur et Mindess 1990].

Dans leur ouvrage général, Bentur et Mindess (1990) nous apprennent que le béton renforcé de fibres est apparu vers 1950. Contrairement au béton ordinaire, le béton renforcé de fibres affiche un comportement pseudo-ductile et une ténacité significative. Les fibres ont toutefois peu d'effet sur les résistances en compression et en traction directe. La résistance en flexion n'est que légèrement améliorée, mais la ténacité en flexion augmente énormément. La résistance à la fatigue et la résistance à l'impact sont également augmentées. Pour ce qui est de la résistance à l'abrasion, l'érosion et la cavitation, les résultats sont mitigés. D'une part, des essais ont démontré qu'un courant d'eau de faible vitesse était dommageable autant pour le béton renforcé de fibres que le béton ordinaire. La résistance dépendrait alors de la qualité des granulats et de la dureté du béton. D'autre part, lorsque le courant d'eau est fort, le béton renforcé de fibres a un bien meilleur comportement que le béton ordinaire. La durabilité du béton renforcé de fibres aux cycles de gel-dégel est également améliorée si un bon réseau de bulles d'air est présent dans le béton. Pour ce qui est de la corrosion des fibres, le problème n'est pas très aigu puisque la corrosion des fibres d'acier en surface ne provoquent pas d'écaillage.

1.2.2 Types de fibres

Il existe différents types de fibres, soit les fibres de verre, les fibres naturelles ou synthétiques et les fibres métalliques. Ici, on s'intéressera davantage aux fibres métalliques et plus particulièrement aux fibres d'acier.

L'acier utilisé pour fabriquer les fibres est de l'acier au carbone pour les applications classiques ou bien un alliage d'acier pour assurer une protection adéquate contre la corrosion dans les structures marines par exemple. Elles peuvent être produites de plusieurs façons. Les fibres circulaires sont produites en coupant des longs fils et les fibres plates peuvent être produites en coupant des feuilles d'acier ou en écrasant des fils. Les fibres peuvent également être moulées. Leur résistance en traction élevée, qui peut atteindre jusqu'à 2100 MPa selon la nuance d'acier, est essentielle pour une action de renforcement, tandis que leur grande rigidité favorise le transfert des charges de la matrice vers les fibres. Leur déformation ultime peut varier de 0,5 % à 35 % [Bentur et Mindess 1990].

Les fibres d'acier sont utilisées dans diverses applications, dont les dallages industriels, les structures parasismiques, les structures soumises à des chocs répétés et le béton projeté. Leur longueur varie généralement entre 20 mm et 60 mm, tandis que leur diamètre (diamètre équivalent pour les sections rectangulaires) se situe typiquement entre 0,5 mm et 1,1 mm.

La plupart du temps, les fibres sont évaluées par le biais du rapport d'élanement (L/d). Comme la majorité des études sur le béton renforcé de fibres concluent qu'une augmentation du rapport d'élanement améliore les propriétés du béton, la tendance générale est donc d'opter pour une fibre longue et de faible diamètre sans se soucier des autres caractéristiques des fibres. Le rapport d'élanement est toutefois trompeur pour les fibres d'acier, car beaucoup d'entre elles sont déformées aux extrémités, ce qui contribue à l'amélioration des propriétés mécaniques sans pour autant affecter le rapport d'élanement. L'efficacité des différents types d'ancrage varie beaucoup selon la géométrie.

1.2.3 Retrait

Les propriétés des BRFA ont été brièvement expliquées à la section 1.2.1. Nous nous concentrerons ici sur le retrait et la fissuration due au retrait restreint.

Il est bien connu que la valeur de retrait libre d'une pâte de ciment est plus élevée que celle d'un béton. La raison est que les inclusions rigides (granulats) restreignent les mouvements de la pâte. Des modèles théoriques comme celui de Bazant et Panula (modèle B.P.) permettent une prédiction relativement bonne du retrait libre d'un béton ordinaire à partir de la connaissance des constituants et des conditions environnementales [Young et Chern 1991].

Lorsqu'on introduit des fibres dans le mélange de béton, la complexité des mécanismes augmente. Bien qu'elles constituent également des inclusions rigides, les fibres n'agissent pas sur le retrait de la même façon que le font les granulats. Les granulats s'opposent aux mouvements par contact direct en jouant un rôle de butée et les fibres restreignent le retrait par l'entremise de leur lien fibre-matrice. Chacune des fibres restreint donc une zone cylindrique. Leur espacement, leur élanement ainsi que les propriétés de leur interface jouent donc des rôles très importants qu'on ne peut négliger lorsqu'on tente d'évaluer l'influence des fibres sur le retrait libre [Mangat et Azari 1984].

Sur la base de ces explications, Mangat et Azari (1984) ont pu produire un modèle théorique pour le retrait libre d'un béton renforcé de fibres. Une version empirique simple de leur modèle, basée sur de nombreux essais, s'exprime comme suit:

$$\epsilon_{fs} = \epsilon_{os} (1 - 2,45\mu V_f L/d) \quad (1.1)$$

Dans cette équation, ϵ_{fs} est le retrait libre du béton renforcé de fibres, ϵ_{os} est le retrait libre du béton ordinaire témoin, V_f est la fraction volumique de fibres, L/d est le rapport d'élançement des fibres et μ est le coefficient de friction entre la fibre et la matrice obtenue de l'équation 1.1. La valeur du coefficient de friction variait selon les constituants du mélange ainsi que la surface et la géométrie des fibres, mais demeure constante au cours des essais malgré que l'interface se détériore au cours de ceux-ci. Les valeurs obtenues variaient entre 0,04 et 0,12. Dans la même optique, Young et Chern (1991) ont également développé un modèle théorique, plus complexe, basé sur le modèle B.P. pour le béton ordinaire. En comparant les prédictions obtenues avec les données expérimentales disponibles, ils obtiennent un coefficient de variation global de 14,40 %.

Pour valider leur modèle théorique, ces chercheurs ont dû faire plusieurs essais et étudier de nombreux paramètres pour bien comprendre l'influence des fibres sur le retrait libre. En général, les fibres réduisent le retrait libre d'environ 10 à 20 % à chaque 1 % de fibres en volume [Mangat et Azari 1988, Grzybowski et Shah 1990, Swamy et Stavrides 1979] (voir la figure 1.3).

Chern et Young (1990) ont remarqué que l'allure des courbes de retrait en fonction du temps était similaire pour les bétons renforcés de fibres et les bétons ordinaires. Ils en ont conclu que le séchage des bétons renforcés de fibres était associé aux mêmes mécanismes que le retrait du béton ordinaire. Ils ont également remarqué qu'une diminution du rapport volume/surface du corps d'épreuve entraîne des déformations de retrait plus rapides et que la déformation ultime est atteinte plus tôt. De plus, lorsque le retrait débute tôt, la déformation ultime du béton est plus grande. Pour ce qui est des fibres elles-mêmes, il a été établi qu'un rapport d'élançement plus élevé diminuait le retrait libre (voir la figure 1.4).

Quoi qu'il en soit, l'influence des fibres sur l'intensité du retrait de séchage demeure limitée. Ce qui nous intéresse avec les fibres, c'est le contrôle de la fissuration. C'est

pourquoi, dans les prochains paragraphes, des explications seront fournies sur les essais de retrait restreints existants ainsi que les résultats obtenus par le passé.

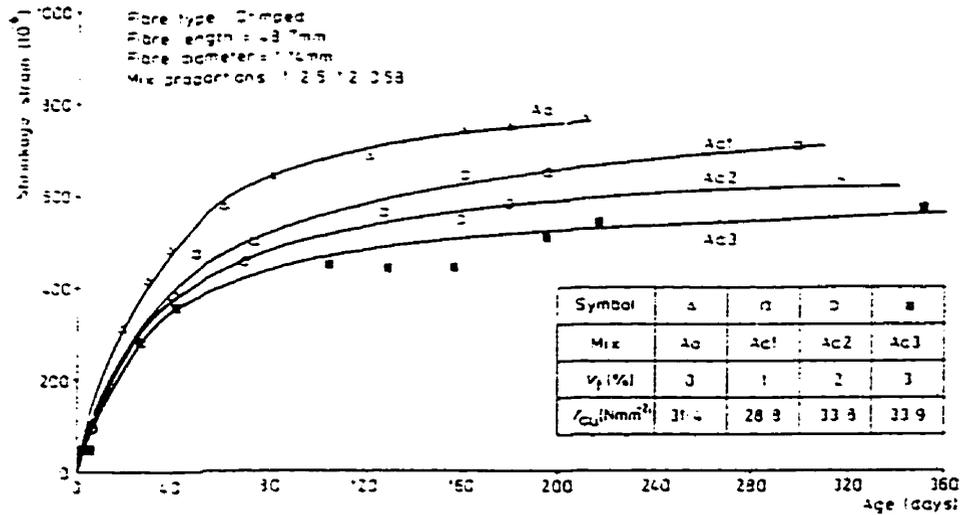


Figure 1.3: Influence des fibres d'acier ondulées sur le retrait libre du béton (Mangat et Azari 1984)

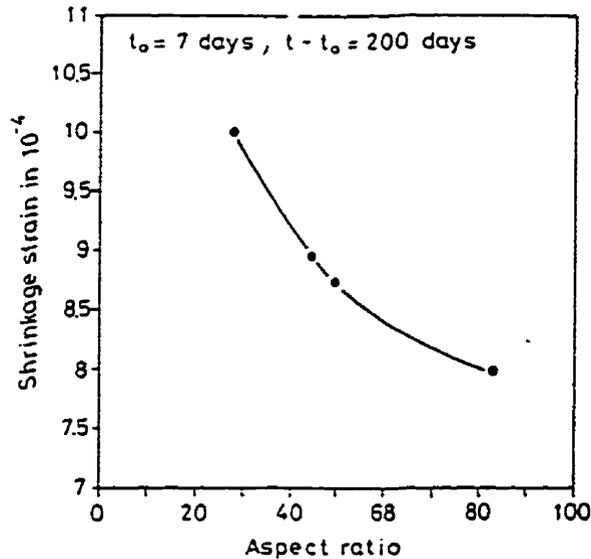


Figure 1.4: Influence du rapport d'élanement des fibres sur le retrait libre du béton (Chern et Young 1990)

Pour beaucoup de structures construites en béton non armé, i.e. sans acier d'armature continue, les efforts de traction sont générés de façon interne, c'est-à-dire par son retrait de séchage et sa contraction thermique lorsqu'on l'empêche de se déformer. Si les contraintes

exercées par ces phénomènes dépassent la résistance en traction de la matrice, il y a apparition de fissures. Quelques chercheurs ont donc eu l'idée de mettre au point des essais de retrait restreint pour étudier la fissuration du béton renforcé de fibres.

Parmi les types d'essais utilisés (voir la figure 1.5), une première méthode (a) consiste en un essai de traction très lent où la charge est maintenue dans l'unique but de conserver la longueur de l'éprouvette constante. Une autre méthode (b) consiste à sécher rapidement une plaque de béton d'assez grandes dimensions. Il y a retrait restreint dans deux directions, ce qui résulte en une fissuration diffuse puisque cette méthode est surtout utilisée pour étudier le retrait plastique (au jeune âge). Une troisième méthode (c), qui est probablement la plus utilisée, est communément appelée "essai annulaire". Il en existe plusieurs variations dont celle de Malmberg et Skarendahl (1978) (via Grzybowski et Shah 1990), celle de Swamy et Stavrides (1979) où l'anneau avait 508 mm de diamètre et celle de Grzybowski et Shah (1990) où l'anneau avait 305 mm de diamètre. Par contre, le montage de ces trois groupes de chercheurs est légèrement différent de ce qui apparaît à la figure 1.5 (c), car leur échantillon de béton n'est pas une plaque évidée, mais plutôt un anneau dont l'épaisseur varie de 35 mm à 76 mm et la hauteur se situe entre 40 mm et 140 mm.

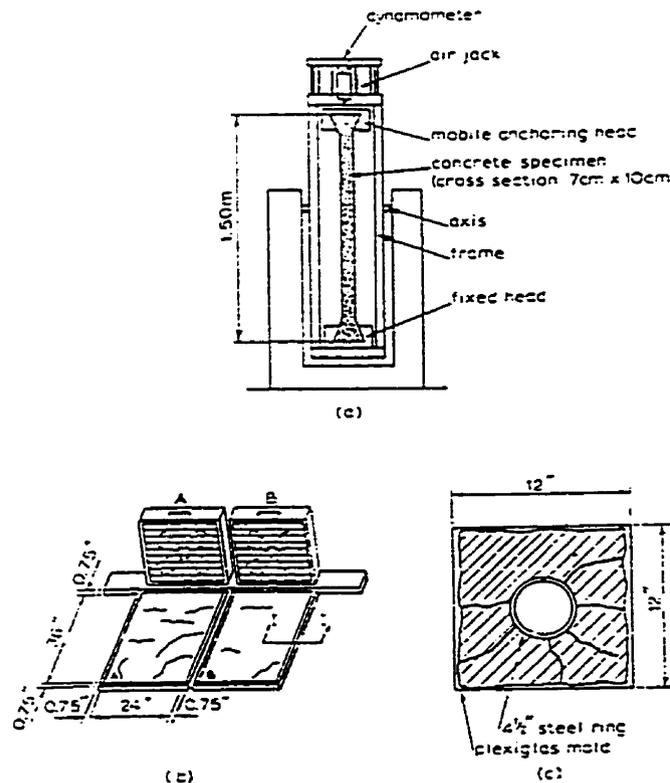


Figure 1.5: Types d'essais de retrait restreint (Grzybowski et Shah 1990)

Les résultats obtenus avec des essais de ce genre (essais annulaires) sont concluants sur la capacité des fibres à contrôler la fissuration. Malgré une faible diminution du retrait libre de 10 %, Malmberg et Skarendahl (1978) (via Bentur et Mindess 1990), ont évalué qu'une fraction volumique de fibres de 1 % peut réduire l'ouverture totale des fissures de 80 %. Grzybowski et Shah (1990), de leur côté, affirment qu'avec 0,25 % de fibres, la largeur moyenne des fissures est réduite de 66 %, mais qu'au-delà de 0,5 % de fibres, la réduction de l'ouverture de la fissuration est faible (voir la figure 1.6).

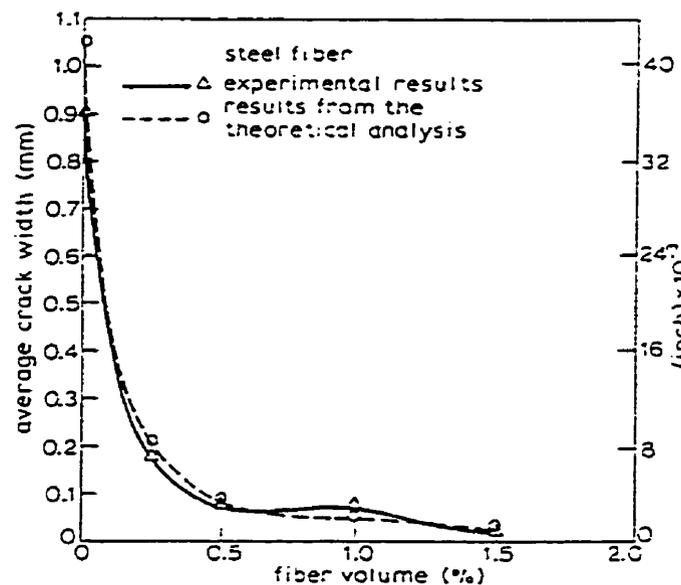


Figure 1.6: Largeur moyenne des fissures en fonction de la fraction volumique de fibres (Grzybowski et Shah 1990)

Les conclusions de Swamy et Stavrides (1979) sont toutefois plus exhaustives. Ils retiennent de leurs essais que les fibres retardent l'apparition de la première fissure, voire l'empêchent, car à 1 % de fibres droites ou ondulées, ils n'observaient aucune fissure après 250 jours de séchage. Pour eux, les fibres préviennent la rupture fragile puisqu'elles forcent le composite à multifissurer tout en préservant l'intégrité structurale de l'élément et en réduisant la largeur totale des fissures. Les éprouvettes avec fibres, seraient de plus capables de résister à une contrainte de traction de 50 à 100 % supérieure à celle des témoins en béton ordinaire.

Dans tous ces essais les résultats varient quelque peu, car les mélanges et les conditions d'essais diffèrent. Il ne faut toutefois pas oublier que la possibilité de fissuration de retrait pour un béton donné dans un environnement quelconque, dépend non seulement de son retrait libre, mais également de sa capacité de fluage, de sa résistance en traction et du degré de restriction.

1.2.4 Resurfaçages en BRFA

1.2.4.1 *Généralités*

Lorsqu'on choisit de resurfer une dalle de béton, le béton armé de fibres peut se révéler un choix judicieux si on pense à sa capacité à contrôler la fissuration. Effectivement, son comportement post-fissuration en fait un matériau bien différent du béton ordinaire. Une autre raison qui favorise l'utilisation du béton renforcé de fibres est que sa mise en place s'effectue avec la même machinerie que le béton ordinaire [Ramakrishnan et coll. 1990, Chanvillard et coll. 1989], comme par exemple une paveuse à coffrage coulissant.

Le béton renforcé de fibres comporte toutefois un inconvénient majeur, son coût. Ce handicap peut toutefois être contrebalancé, car l'utilisation du béton renforcé de fibres permet de réduire l'épaisseur du resurfaçage et d'augmenter la distance entre les joints [Potter 1985, Rollings 1993, Van Dam 1995]. La réduction de l'épaisseur, selon ces auteurs, varie entre 25% et 50%, par rapport à la solution en béton ordinaire. Pour eux, cette réduction d'épaisseur serait attribuable à l'augmentation de la ténacité en flexion du béton renforcé de fibres et peut être très utile lorsqu'on doit respecter une hauteur libre sous un viaduc par exemple. Quant à l'augmentation de la distance entre les joints de contrôle, les opinions varient énormément comme le souligne Van Dam (1995), citant deux auteurs où l'un affirme qu'un espacement de 30 m est acceptable et l'autre, qu'un espacement maximum de 12,2 m doit être respecté. Cet avantage est toutefois diminué si la base possède des joints à intervalle plus faible, car ceux-ci se réfléchissent presque inévitablement dans le resurfaçage.

D'un autre côté, ces deux avantages du béton renforcé de fibres entraînent souvent des problèmes de cambrure des dalles. Rollings (1993) cite plusieurs exemples de constructions et de resurfaçages en béton renforcé de fibres sur des pistes d'aéroports où la cambrure a causé la fissuration dans le coin des dalles. Les dalles en BRFA étant plus longues, un faible retrait différentiel entre la partie inférieure et supérieure de la dalle

provoque une élévation suffisante des coins de la dalle pour entraîner la fissuration sous la seule action du propre poids.

Parmi les avantages des resurfaçages en BRFA, il faut aussi noter une meilleure résistance des joints aux épaufrures et une plus grande résistance à l'abrasion [Potter 1985]. De plus, lorsqu'on pense au fait que les fibres intactes ont la capacité de réduire la propagation des fissures et de transférer une certaine charge d'un côté à l'autre d'une fissure, on ne peut s'empêcher de penser qu'après quelques années, les cycles de mouillage-séchage jumelés à l'action des sels fondants provoqueront la corrosion des fibres. À un certain degré de corrosion, les fibres ne peuvent plus remplir leur rôle et le béton renforcé de fibres agit alors comme un béton ordinaire. Cette possibilité existe si l'ouverture des fissures devient grande, car Morse et Williamson (1977) [via Potter 1985] ainsi que Chanvillard et coll. (1994) ont conclu qu'une ouverture de fissure inférieure à environ 0,25 mm à 0,30 mm n'entraînait pas la corrosion des fibres. Notons, par ailleurs, que la corrosion des fibres n'entraînent pas les mêmes dommages au béton que les barres d'armatures conventionnelles (éclatement, délamination, etc.) en raison de leur petite dimension.

1.2.4.2 *Expériences antérieures*

La plupart des expériences de resurfaçage en BRFA rapportées dans la littérature ont été réalisées sur des stationnements ou des pistes d'aéroports. Rollings (1985) retrace de nombreux cas de resurfaçage de pistes d'aéroport où les résultats n'ont pas toujours été à la hauteur des attentes en raison des problèmes de cambrure des dalles expliqués précédemment. Il y a également Chanvillard et coll. (1989) et Van Dam (1995) qui font une brève description de quelques projets importants qui ont eu lieu à travers le monde.

La première expérience de resurfaçage en BRFA qui soit documentée a été réalisée en 1971 dans l'état du Mississippi [Van Dam 1995]. Le resurfaçage de 100 mm d'épaisseur était partiellement adhérent et ne possédait aucun joint transversal. Les joints de l'ancienne dalle se sont réfléchis rapidement, mais la grande quantité de fibres dans le mélange (150 kg/m^3) a permis de conserver la fissuration fermée. Après dix ans de service, ce resurfaçage d'une piste d'aéroport se comportait très bien.

Le premier resurfaçage d'une autoroute a eu lieu en 1972 à Détroit [Van Dam 1995]. La chape mince partiellement adhérente, de 75 mm d'épaisseur, avait des dosages en fibres variant de 70 à 120 kg/m^3 . Cette expérience a été un échec total puisqu'après neuf mois de

service, une portion de la route a dû être reconstruite et la section restante n'a duré que neuf ans, se détériorant à chaque hiver. L'explication des initiateurs de ce projet pour cet échec est que le resurfaçage a été réalisé dans des conditions météorologiques défavorables.

En 1973, l'état de l'Iowa était le site d'un imposant projet de resurfaçage [Betterton et coll. 1985]. En tout, 33 sections différentes ont été resurfacées en BRFA et 8 autres ont été construites avec un treillis métallique ou des barres d'armatures. Pour les sections en BRFA, sept paramètres étaient étudiés, soit le dosage en ciment, l'utilisation de cendres volantes, la géométrie des fibres, la quantité de fibres, l'épaisseur du resurfaçage, l'espacement des joints et le type d'adhérence. Après dix ans de service, les resurfaçages en BRFA se sont en général bien comportés et les meilleurs résultats ont été obtenus avec les dosages en fibres les plus élevés. Cette performance ne surpasse toutefois pas celle du resurfaçage de 100 mm d'épaisseur renforcé continûment et celle du resurfaçage en béton ordinaire de 125 mm d'épaisseur. Les autres points à retenir de l'étude sont les suivants:

- Les bétons contenant 356 kg/m^3 de ciment ont affiché un comportement légèrement supérieur aux bétons contenant 445 kg/m^3 de ciment.
- Le comportement des resurfaçages était directement relié à la quantité de fibres dans le béton; en effet, les meilleurs résultats ont été obtenus avec les bétons à 95 kg/m^3 de fibres et par la suite ceux à 59 kg/m^3 et pour terminer, ceux à 36 kg/m^3 qui ont affiché un mauvais comportement.
- Les chapes fabriquées avec des fibres de section circulaire de $63,5 \text{ mm} \times 0,635 \text{ mm}$ ($L/d=100$) se sont mieux comportées que celles fabriquées avec des fibres de section rectangulaire de $25,4 \text{ mm} \times 0,254 \text{ mm} \times 0,559 \text{ mm}$ ($L/d \approx 63$).
- Les resurfaçages de 75 mm d'épaisseur se sont mieux comportés que ceux de 50 mm.
- L'adhérence voulue entre les deux dalles n'a pas vraiment été obtenue et aucune conclusion ne peut être avancée sur l'importance d'obtenir une bonne adhérence entre le resurfaçage et la base de béton.

Les auteurs en arrivent à la conclusion que le coût additionnel du BRFA n'est pas justifié si on se base sur les comportements des divers types de resurfaçages étudiés.

À la fin des années 70, le Japon a expérimenté pour la première fois la technique de resurfaçage avec du BRFA. L'épaisseur du recouvrement était de 50 mm et le béton était fabriqué avec un ciment expansif de manière à éliminer l'effet du retrait. Malgré tout, des

fissures sont apparues, mais le comportement du resurfaçage est demeuré acceptable [Van Dam 1995].

En 1983, une autoroute en périphérie de Houston était resurfacée avec une dalle adhérente en BRFA de 50 mm d'épaisseur. Le BRFA fabriqué avec des fibres de 50 mm de longueur dosées à 50 kg/m^3 a eu un meilleur comportement que le béton ordinaire et le béton renforcé d'un treillis soudé (welded wire). La base était une dalle de béton renforcé continûment [Van Dam 1995].

Un projet majeur a également eu lieu à Montréal en 1986 [Chanvillard et coll. 1994]. Lors de cette étude, le resurfaçage en BRFA avait une épaisseur constante de 75 mm et parmi les paramètres à l'étude, il y avait la quantité de fibres (22 kg/m^3 et 34 kg/m^3), le type de fibres (Dramix, Eurosteel et Ribtec) et le type d'adhérence (resurfaçage lié à la base avec des quantités de clous différentes). Les resurfaçages en BRFA étaient comparés à un béton ordinaire de 100 mm d'épaisseur. La différence de comportement a été nette puisqu'après seulement dix-huit mois de service, le béton ordinaire a nécessité des réparations tandis qu'après huit années de service, le BRFA affichait encore un bon comportement. Globalement, les résultats démontrent que l'importance de la fissuration est inversement proportionnelle à la quantité de fibres. Sur ce point, deux types de fissures sont apparus. Le premier type correspond aux fissures de l'ancienne dalle qui se sont réfléchies dans le resurfaçage. Ces fissures apparaissent dès les premiers mois. Le deuxième type de fissures est plus secondaire puisqu'on ne peut l'observer que par temps froid et humide. Pour ce qui est de l'influence de l'adhérence, il a été prouvé qu'après un an, la présence des clous atténue la fissuration des dalles, en particulier pour les bétons dosés à 34 kg/m^3 de fibres.

Une autre réalisation a eu lieu plus récemment en Louisiane. Sur une chaussée en béton renforcé continûment, un resurfaçage adhérent de 100 mm d'épaisseur a été construit en 1990. Quoique récente, la réparation se comporte bien, les fibres jouant bien leur rôle en maintenant fermées les fissures réfléchies [Van Dam 1995].

1.2.5 Conclusion

Les resurfaçages en BRFA peuvent être viables tant du point de vue économique que technique, mais il faut faire très attention aux différents paramètres qui influencent le comportement de la chape mince.

Nous savons que les résultats obtenus en laboratoire peuvent être reproduits en chantier, mais pour cela, il faut un bon contrôle lors de la fabrication du béton, spécialement lors de l'introduction des fibres dans la gâchée, de manière à ne pas créer d'oursins, et lors de la mise en place, bien qu'elle puisse se faire à l'aide de la machinerie utilisée pour le béton ordinaire.

Les fibres ont la réputation de contrôler la fissuration, peu importe le type de fissures, et d'assurer un transfert de charge pour conserver l'intégrité structurale d'une dalle. Il ne faut toutefois pas surestimer ces capacités car de nombreux échecs ont résulté d'une mauvaise évaluation de la chaussée existante.

1.3 Fissuration du BRFA

1.3.1 Distribution des fibres

Le béton est un matériau hétérogène de par la nature et la géométrie de ses constituants. Lorsque des fibres sont ajoutées à la gâchée, l'hétérogénéité risque évidemment d'augmenter. En plus de l'hétérogénéité de la matrice, il y a également celle de la distribution des fibres, puisqu'elles ne sont pas réparties uniformément dans la matrice (densité de fibres variable à différents endroits à l'intérieur du volume de béton).

Lorsqu'on étudie la distribution des fibres, outre l'hétérogénéité, la seconde caractéristique importante à considérer est l'anisotropie. Dans le béton, les fibres sont distribuées aléatoirement et lorsqu'elles entrent en contact avec un granulat ou une paroi, les fibres s'orientent dans une direction préférentielle. Cette orientation préférentielle peut être désirable ou non, selon la direction des sollicitations principales. Il a en effet été démontré que l'anisotropie du BRFA peut sensiblement affecter les propriétés mécaniques du matériau [Bonzel et Schmidt 1986, Bernier et Lecuir 1994]. Comme le mode de vibration et la direction de la mise en place des échantillons ont un effet non négligeable sur l'orientation des fibres, on utilise généralement la technique de mise en place par couche mince (épaisseur de la taille des gros granulats) sur une table vibrante pour obtenir une orientation en deux dimensions des fibres (2-D). Le même procédé est utilisé, mais cette fois à travers une grille, pour obtenir une orientation en une dimension (1-D) [Bernier et Lecuir 1994].

Lorsque la distribution des fibres à l'intérieur du béton est inadéquate, des zones de faiblesse sont créées. Puisque la fissuration du matériau ne peut être contrôlée dans ces

zones, elles agissent alors comme des régions de relâchement où les déformations (ouverture des fissures) sont beaucoup plus grandes.

1.3.1.1 *Mesure de l'anisotropie*

L'orientation des fibres à l'intérieur de la matrice cimentaire est affectée par de nombreux paramètres, soit la géométrie de la fibre, le mode de mise en place du béton, les parois du moule et la surface libre, la vibration du béton, les interactions fibre-fibre et fibre-granulat [Attar 1996] et la quantité de ciment [Bonzel et Schmidt 1986].

Les méthodes expérimentales qui permettent de quantifier la distribution des fibres sont variées. On peut citer les techniques de mesure par rayons X [Potrebowski 1983 et Knoblauch 1979 via Bentur et Mindess 1990, Debicki 1988 et Stroeven 1977 via Attar 1996, Kasperkiewicz 1977, Bonzel et Schmidt 1986], les techniques électromagnétiques [Uomoto et Kabayashi 1984 via Bentur et Mindess 1990] et les techniques de comptage de fibres [Soroushian et Lee 1990, Bernier et Lecuir 1994, Breysse et coll. 1995].

Beaudoin (1990) cite des auteurs qui, entre 1964 et 1977, ont tenté d'expliquer le comportement du béton renforcé de fibres par un facteur d'espacement et par l'espacement apparent des fibres [Kasperkiewicz 1977]. D'autres ont utilisé un facteur d'efficacité qui variait avec la longueur des fibres, l'orientation des fibres et parfois selon la résistance du lien fibre-matrice (voir la figure 1.7). Les valeurs variaient entre 0,33 et 0,64 pour une orientation 2-D et entre 0,17 et 0,50 pour une orientation en trois dimensions (3-D).

Aujourd'hui, on ne retrouve plus tellement ces terminologies et les auteurs s'entendent pour dire qu'il existe un facteur d'orientation (α) qui permet de prédire le nombre de fibres par unité de section transversale. Ce facteur est en fait le rapport d'une longueur de fibre projetée dans un plan de référence sur la longueur réelle de la fibre. Soroushian et Lee (1990) se sont aperçus, que selon la littérature, le paramètre α variait entre 0,41 et 0,82. Ils ont alors formulé des expressions mathématiques afin d'évaluer le nombre de fibres par unité de surface d'un BRFA. Le facteur d'orientation variait alors avec la distance séparant les parois de l'échantillon de béton ainsi que le nombre de parois (0, 2 ou 4) ayant une influence sur la distribution des fibres.

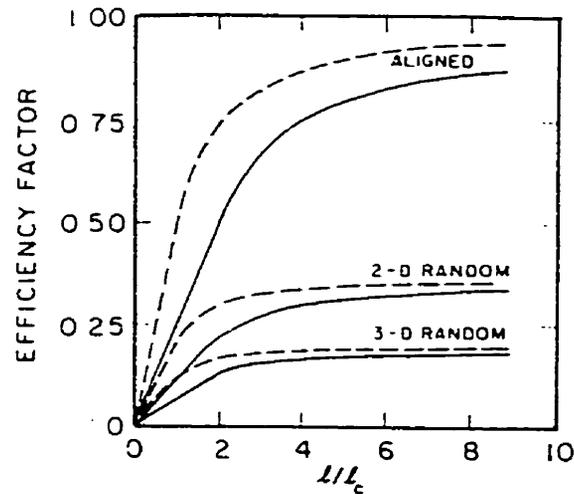


Figure 1.7: Facteur d'efficacité global (lignes pointillées: avec friction, lignes continues: sans friction) (Laws 1972 via Bentur et Mindess 1990)

$$N = \alpha V_f / A_f \quad (1.2)$$

où N = nombre de fibre par unité de surface pour une orientation donnée

α = facteur d'orientation global

V_f = fraction volumique de fibres dans le béton

A_f = section d'une fibre

Pour le cas où il n'y a pas de paroi (grande masse de béton), les auteurs considéraient une distribution isotrope (uniformité dans toutes les directions) des fibres et la valeur de α se situait à 0,405. Pour les cas de deux et quatre parois, les équations mathématiques sont plus complexes, mais ils ont tout de même pu conclure, pour le cas à deux parois (dalle mince), qu'une épaisseur de béton inférieure à la longueur de la fibre résultait en un facteur d'orientation équivalent à la condition 2-D (orientation des fibres selon 2 directions) et qu'une épaisseur supérieure à deux fois la longueur de la fibre résultait en un facteur d'orientation équivalent à la condition 3-D (orientation des fibres de façon aléatoire). Pour le cas où quatre parois influencent la disposition des fibres (élément de type poutre), le même phénomène survient, c'est-à-dire que plus les dimensions de l'éprouvette de béton sont faibles, plus les fibres s'orientent dans une seule direction (1-D) (voir la figure 1.8).

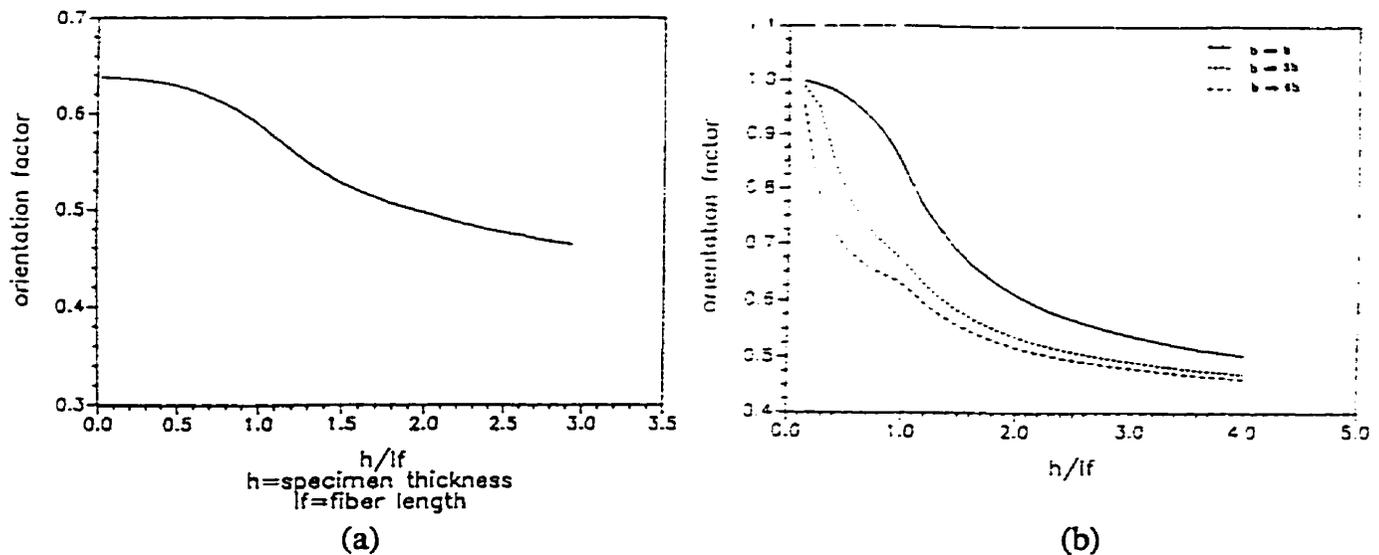


Figure 1.8: Effet de la dimension de l'éprouvette sur le facteur d'orientation (a) cas à 2 parois, (b) cas à 4 parois (Soroushian et Lee 1990)

Les auteurs ont finalement effectué des comptages de fibres sur des plans de rupture de différentes éprouvettes pour comparer leur valeurs théoriques à des valeurs réelles. Ils ont conclu que l'état d'orientation des fibres se situait entre les conditions 2-D et 3-D et que le type de fibres (droites ou déformées) et l'endroit de la section étudiée (bas, milieu ou haut de l'éprouvette) n'avaient aucun effet sur le nombre de fibres par unité de surface

Par la suite, Attar (1996) a subdivisé le facteur d'orientation en deux nouveaux paramètres, soit α_a et α_t , qui représentent respectivement la quantité de fibres orienté suivant un axe vertical et un axe horizontal. C'est le rapport des deux valeurs qui permet d'établir le nouveau facteur d'orientation global α (voir la figure 1.9). Lorsque la totalité des fibres est orientée à l'horizontale, $\alpha_a = 0$, $\alpha_t = 2/\pi$ et $\alpha = 0$ tandis que si les fibres sont à la verticale, $\alpha_a = 1$, $\alpha_t = 0$ et $\alpha = \infty$. Dans le cas isotrope (distribution parfaitement aléatoire), $\alpha_a = 0,5$, $\alpha_t = 0,5$ et $\alpha = 1$.

$$\alpha = \alpha_a / \alpha_t \quad (1.3)$$

Pour valider sa théorie, l'auteur a procédé à de nombreux comptages de fibres sur des échantillons cubiques et cylindriques sciés dans plusieurs directions. La mise en place des échantillons s'effectuait en fonction de deux modes de structuration. Il y avait le mode isotrope où aucune orientation privilégiée n'était recherchée (mise en place du béton en une seule couche) et le mode orienté où le BRFA a été déposé par couche de façon à privilégier

l'orientation des fibres dans le plan horizontal. Les résultats tendent à démontrer que le facteur d'orientation pour le cas isotrope est très voisin de l'unité, tout comme la valeur théorique, mais que le facteur d'orientation pour le cas structuré varie de 0,33 à 0,70 plutôt que de tendre vers zéro. L'auteur a également conclu que la dimension des granulats jouait un rôle important sur la valeur finale du facteur d'orientation global.

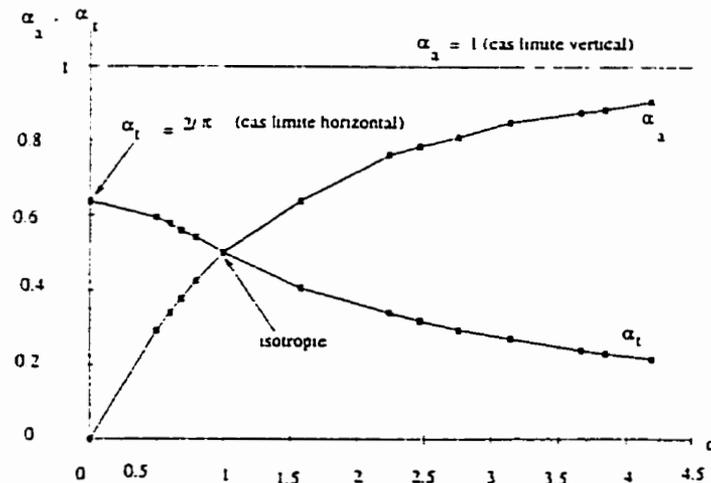


Figure 1.9: Évolution du facteur d'orientation axial, α_a , et transversal, α_t (Attar 1996)

1.3.1.2 Mesure de l'hétérogénéité

Pour obtenir une distribution homogène des fibres dans le béton, il est évidemment essentiel que la dispersion des fibres soit optimale dans le matériau à l'état frais. Pour obtenir cette dispersion, différentes techniques d'introduction des fibres (soufflerie, convoyeur, manuelle) et différentes séquences de malaxage sont utilisées. La vérification de l'homogénéité du béton, peut s'effectuer en lavant un certain volume de béton et en calculant la quantité de fibres restantes ou simplement en effectuant une inspection visuelle soignée [Bonzel et Schmidt 1986].

Malgré toutes les précautions que l'on puisse prendre, les fibres ne se dispersent jamais de manière totalement homogène à l'intérieur du volume de béton et, malheureusement, il a été observé dans différentes études que la rupture des corps d'épreuve se produisait généralement dans une zone sous dosée en fibres [Attar 1996, Uomoto et Kabayashi 1984 via Bentur et Mindess 1990] (voir la figure 1.10).

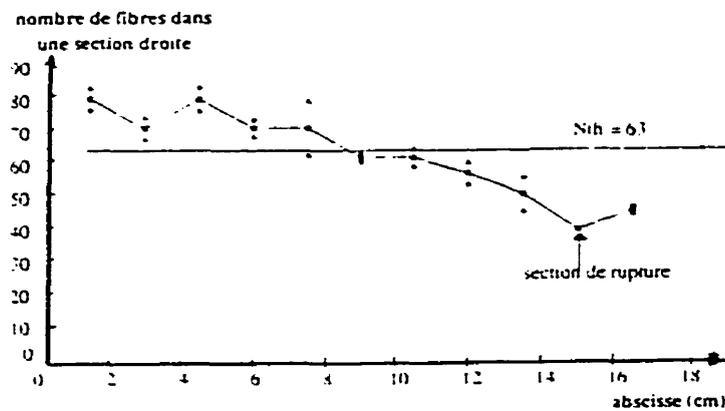


Figure 1.10: Distribution du nombre de fibres dans une éprouvette rompue (Breysse 1996)

L'hétérogénéité des fibres est représentée par la variabilité du nombre de fibres à différents endroits à l'intérieur du volume de béton et la mesure de l'hétérogénéité peut être obtenue en comptant le nombre de fibres sur différents plans parallèles et perpendiculaires ou en différentes régions d'un même plan.

Pour Attar (1996), il faut dissocier l'isotropie et l'hétérogénéité en supposant un facteur d'orientation α constant dans tout le volume de béton. Cela permet, à partir de la fraction volumique des fibres introduites dans le béton (V_f), d'estimer les nombres moyens de fibres par unité de surface sur des plans orthogonaux. Pour cela, il suffit de reprendre l'équation (1.2) et d'y insérer la valeur de α obtenue lors de la mesure de l'anisotropie.

Les résultats de Attar (1996) montrent qu'il y a une différence entre les valeurs moyennes réelles et les valeurs théoriques. Cette différence est de l'ordre de 5 % lorsque la distribution des fibres est considérée comme isotrope et 8 % lorsqu'elle est plutôt structurée (orientation selon 2 directions). Pour lui, cet écart serait explicable par la difficulté à bien compter les fibres lorsqu'elles forment un amas et la perte de fibres lors des opérations de sciage. L'auteur note également un coefficient de variation très élevé dans les mesures d'hétérogénéité entre des plans parallèles, soit près de 25 %. Une augmentation de la surface des sections étudiées aurait probablement comme conséquence de diminuer ce coefficient de variation.

1.3.2 Multifissuration

L'introduction de fibres dans un matériau composite cimentaire permet un meilleur contrôle de la fissuration de la matrice. Un avantage des matériaux cimentaires renforcés de fibres est l'augmentation de la déformation ultime (grâce à l'arrachement des fibres à l'endroit de la première fissuration). Par contre, si après la première fissuration, la fibre et l'interface fibre-matrice possèdent la capacité de supporter la charge relâchée par la matrice, il est théoriquement possible d'obtenir la multifissuration de la matrice cimentaire.

La multifissuration se produit lorsque les fibres qui croisent la première fissure apparue transfèrent les efforts à la matrice de chaque côté de celle-ci et que pour en accroître l'ouverture, il faut augmenter la charge de façon significative. Ce phénomène de transfert des efforts cause alors la propagation d'autres micro fissures et la formation de plusieurs plans de rupture parallèles sur l'échantillon puisque la contrainte dans la matrice atteint une valeur avoisinant la contrainte de rupture lors de l'apparition de la première fissure. La multifissuration pourrait être comparée d'une certaine façon à la plasticité et l'écroutissement de l'acier, le processus requérant un accroissement de la résistance après l'apparition de la première fissure. Après la multifissuration de la matrice, la charge est complètement reprise par les fibres et la rupture de l'échantillon est provoquée par la rupture ou l'arrachement des fibres [Li 1992].

Dans les sous-sections suivantes, nous expliquons plus en détails les mécanismes internes qui contrôlent la multifissuration du béton renforcé de fibres. Nous nous attarderons tout d'abord sur le cas des fibres continues et alignées qui ont été étudiées par plusieurs chercheurs dont Aveston et Kelly (1973), Marshall et coll. (1985) et Li et coll. (1993). Pour faire suite à cette explication, nous traiterons des bétons renforcés de fibres courtes et aléatoirement distribuées dans le béton. Cette partie de la théorie a été étudiée soigneusement par Li et coll. (1992) ainsi que Tjiptobroto et Hansen (1993).

À la suite de toutes ces recherches, il apparaît évident que le type de fibres utilisé dans le matériau composite ainsi que le dosage en fibres jouent des rôles très importants dans le phénomène de multifissuration du béton et ils seront abordés de façon particulière dans ce texte. Pour terminer, nous ferons une brève description de quelques essais existants avec lesquels la multifissuration a pu être observée.

1.3.2.1 Cas des fibres continues et alignées

Les fibres continues et alignées peuvent être assimilées à des barres d'armature ordinaires de petite dimension. Elles peuvent être fabriquées en acier, en verre ou avec divers matériaux synthétiques. Les premiers chercheurs à avoir étudié la multifissuration des bétons renforcés avec ce type de fibres furent Aveston et coll. au début des années 70. Malgré leur modèle théorique très utilisé (ACK model) (voir la figure 1.11), quelques unes de leurs hypothèses de travail étaient plus ou moins valides. Parmi celles-ci, on note la constance de la contrainte durant le stade de multifissuration, la non prise en compte des coefficients de Poisson de la fibre et de la matrice dans le modèle théorique, un décollement complet de l'interface fibre-matrice à la fin de la multifissuration et des contraintes de cisaillement par friction constantes à l'interface. Suite à une comparaison théorique des pas de fissuration pour une interface complètement décollée et une autre partiellement décollée, les auteurs ont conclu que les écarts n'étaient pas très importants et c'est pour cela que les hypothèses simplificatrices ont été conservées pour décrire le comportement du béton renforcé de fibres continues. Ce comportement qui se traduit simplement par l'apparition successive de fissures à intervalle régulier.

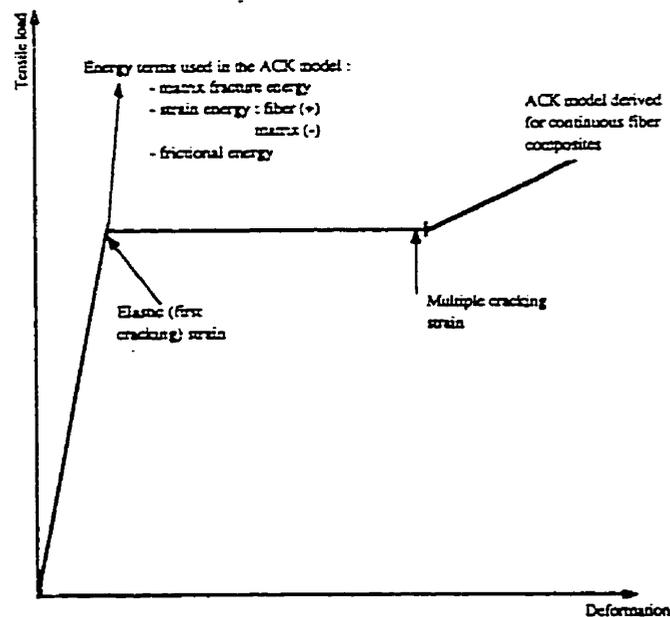


Figure 1.11: Illustration du modèle ACK (Tjiptobroto et Hansen 1993)

Au début des années 90, Li et coll. (1993) ont abordé le problème en adoptant des hypothèses de travail plus réalistes. Pour eux, la multifissuration était accompagnée d'un

décollement partiel suivi d'un frottement le long de l'interface fibre-matrice et cela, de part et d'autre des fissures. Les contraintes de cisaillement diminuent avec l'augmentation de la longueur de glissement et la contrainte de cisaillement maximale se produit à la jonction des zones collées et décollées, c'est-à-dire où le glissement est nul. Les auteurs prétendent également que l'interface fibre-matrice n'est jamais complètement décollée, même à des contraintes très élevées. Si l'on regarde la figure 1.12, entre les points A et B, les fibres agissent principalement pour arrêter les micro fissures qui s'initient dans la matrice. Au point B (BOP ou bend over point), les fibres reprennent l'effort de la matrice, stabilisent et distribuent les déformations locales. C'est le début de la multifissuration, où les fibres transmettent les efforts à la matrice à l'aide du mécanisme de cisaillement mentionné précédemment. Pour terminer, le point C indique la fin de la multifissuration et après celui-ci, il n'y a plus d'apparition de nouvelles fissures, la charge additionnelle étant entièrement reprise par les fibres.

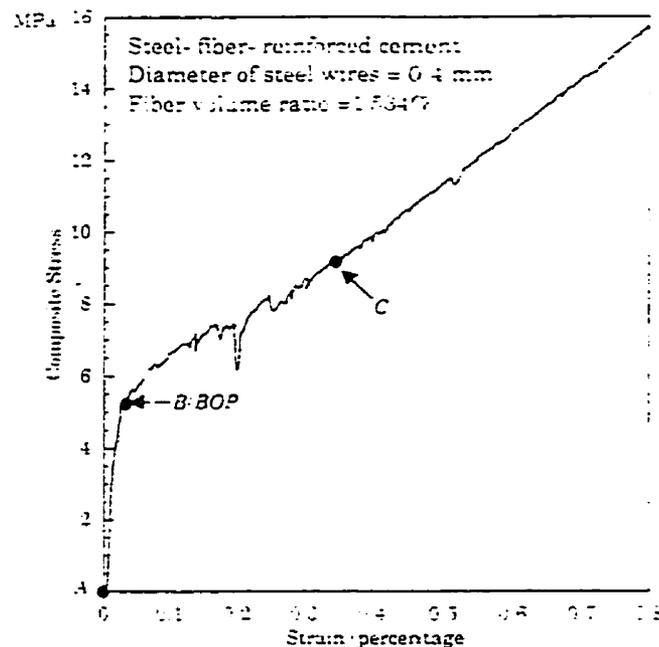


Figure 1.12: Courbe contrainte-déformation typique en traction (Li et coll. 1993)

1.3.2.2 Cas des fibres courtes et aléatoirement distribuées

Le terme "fibre courte" est généralement associé aux més fibres et aux macro fibres qui varient entre 5 mm et 60 mm de longueur. Contrairement aux microfibrés (longueur inférieure à 5 mm), qui améliorent la résistance en traction du béton, les macro fibres

améliorent la ténacité du béton grâce au travail associé à l'arrachement des fibres. Pour Tjiptobroto et Hansen (1993), plus on augmente la quantité de fibres dans le béton, plus la ténacité augmente, c'est-à-dire que l'énergie de rupture augmente. Cette situation porte à croire qu'avec un certain volume de fibres, l'énergie nécessaire à la propagation d'une fissure existante sera plus élevée que l'énergie requise pour créer une nouvelle fissure. C'est dans ces conditions que la multifissuration du BRFA aura lieu.

Sous cet angle, l'influence des fibres courtes s'apparente à celle des fibres continues, mais le fait que les fibres courtes puissent être arrachées de la matrice avant de se rompre modifie sensiblement le problème. La longueur et le diamètre de la fibre ainsi que la résistance au cisaillement de l'interface fibre-matrice sont des paramètres extrêmement importants dans le cas des fibres courtes. L'interface doit résister suffisamment et la fibre doit être assez longue pour redistribuer les efforts à la matrice lors de l'apparition de la première fissure. Si ces conditions ne sont pas rencontrées, les fibres sont arrachées brutalement. Lors d'un essai de traction directe, cette situation provoque une rupture de l'échantillon ressemblant à celle d'un béton ordinaire, c'est-à-dire que la présence des fibres ne permet pas d'augmenter la charge maximale après l'apparition de la première fissure.

La disposition des fibres dans le béton est une autre différence majeure entre les deux types de fibres. Si l'orientation des fibres continues est telle que l'efficacité de celles-ci est maximale, il en est tout autrement pour les fibres courtes. Lorsqu'elles sont alignées, le nombre de fibres continues par unité de surface est égal à $V_f / \pi r^2$ (V_f : volume de fibres et r : rayon de la fibre) tandis que dans le cas des fibres aléatoirement distribuées, (distribution optimale en trois dimensions) le nombre de fibres est de $0,5 * (V_f / \pi r^2)$ [Bentur et Mindess 1990]. Il est donc évident, lorsqu'on recherche un béton multifissurant, que l'on doit mélanger au béton (beaucoup ?) plus de fibres courtes que de fibres continues. Il est intéressant toutefois de souligner que les fibres inclinées peuvent à certains égards être plus efficaces qu'une fibre alignée. Effectivement, l'inclinaison d'une fibre par rapport au plan de fissuration provoque la flexion de cette dernière et un effort de compression local dans la matrice. Globalement, l'efficacité d'une fibre courte inclinée diminue à cause de l'augmentation de la contrainte axiale (maximum à 45°) et augmente grâce à la plastification locale en flexion (effet de coincement maximum à 35°). Ces deux phénomènes agissent à contre sens et il est difficile d'évaluer l'influence relative de chacun sur le processus de rupture du béton renforcé de fibres [Bentur et Mindess 1990].

Pour expliquer plus en profondeur les mécanismes qui conduisent à la multifissuration du béton renforcé de fibres discontinues, il faut tout d'abord se reporter à la figure 1.13 qui est la base du modèle de Tjiptobroto et Hansen (1993). Sur le graphique de cette figure, le point 1 correspond à l'apparition de la première mésofissure. Entre les points 1 et 2, cette mésofissure s'ouvre lentement, en même temps que d'autres microfissures se forment. L'énergie requise pour propager la première fissure du point 1 au point 2 (E_{1-2}) est la somme de trois termes. Il s'agit de l'énergie de déformation des fibres due à l'action de retenue des fibres durant le stade de multifissuration (ΔU_{f-mc}), de l'énergie de friction qui est l'énergie absorbée due à la différence de déformation entre les fibres et la matrice (ΔU_{fr}) et l'énergie de décollement qui est l'énergie requise pour détruire l'interface fibre-matrice (U_{db}).

$$E_{1-2} = \Delta U_{f-mc} + \Delta U_{fr} + U_{db} \quad (1.4)$$

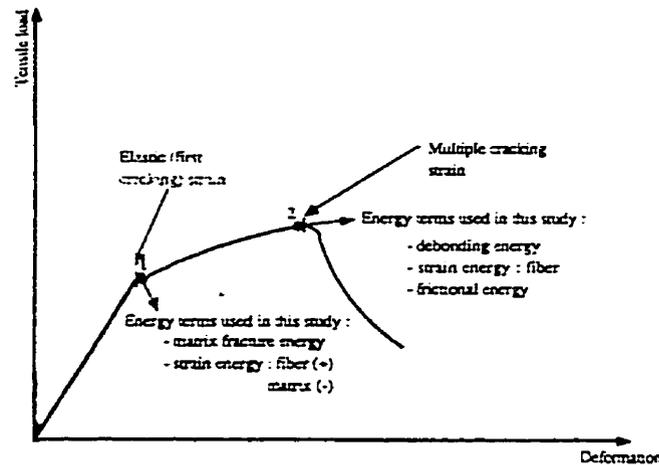


Figure 1.13: Différents termes énergétiques considérés dans le modèle (Tjiptobroto et Hansen 1993)

Par ailleurs, l'énergie requise pour former de nouvelles microfissures (E_2, E_3, \dots, E_n) est la somme de l'énergie de rupture de la matrice, qui est l'énergie requise pour créer une nouvelle surface ($G_m V_m$ où G_m est l'énergie de rupture de la matrice et V_m est la fraction volumique de la matrice), de l'énergie de déformation des fibres due à l'action de retenue des fibres au point 1 (ΔU_{f-mu}) et de l'énergie de déformation restituée par la matrice dans la zone fissurée (ΔU_m).

$$E_2 = E_3 = E_n = G_m V_m + \Delta U_{f-mu} - \Delta U_m \quad (1.5)$$

Le concept de base dans la compréhension de la multifissuration est que l'énergie requise pour ouvrir une microfissure, E_{1-2} , doit être supérieure à l'énergie requise pour former de nouvelles microfissures, E_2, E_3, \dots, E_n .

Sur le graphique de la figure 1.14, suite à la formation de la première fissure, l'énergie requise pour provoquer sa propagation est supérieure à celle requise pour initier l'ouverture des fissures 2 et 3. Ces deux fissures sont donc apparues dans le système suite à une augmentation graduelle de l'énergie emmagasinée dans le composite. Le processus de multifissuration se répète jusqu'à ce que la somme de E_2, E_3, \dots, E_{n+1} soit plus grande que E_{1-2} . C'est alors que la localisation de la première fissure survient. À l'intérieur de leur modèle, les auteurs assument que E_2 est égal à E_3 jusqu'à E_n puisque les mêmes mécanismes de dissipation d'énergie sont mis en jeu. En réalité, il est probable que E_2 soit inférieur à E_3 et que E_n soit inférieur à E_{n+1} en raison de la variation aléatoire de la résistance de la matrice. Il faut également noter que ce concept implique que la première fissure devient toujours la fissure de la rupture puisqu'elle est plus avancée dans le processus d'ouverture des fissures que les autres. Tout au cours de la multifissuration, la première fissure est toujours <<active>>, transférant la charge à la matrice et s'élargissant au même rythme que le taux de chargement.

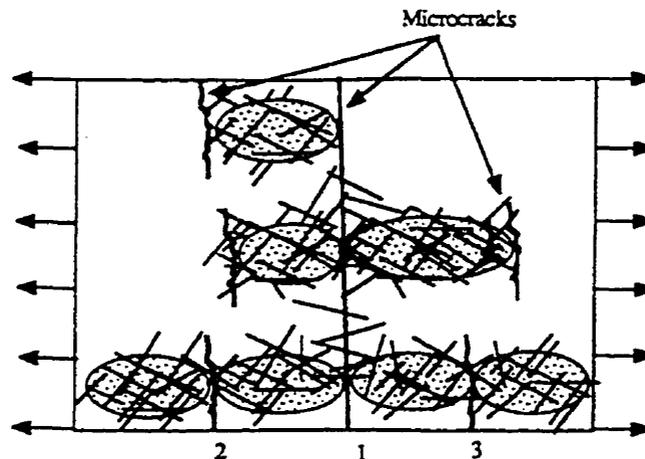


Figure 1.14: Multifissuration d'un composite renforcé de fibres courtes
(Tjiptobroto et Hansen 1993)

Le volume critique de fibres, défini comme étant le volume de fibres minimum dont on a besoin pour obtenir la multifissuration, peut être estimé en posant E_{1-2} égal à E_2 . Pour

des volumes de fibres faibles, E_{1-2} est plus petit que E_2 , donc il y a formation d'une seule fissure. Cependant, E_{1-2} augmente avec le volume de fibres tandis que E_2 est pratiquement constant puisqu'affecté surtout par l'énergie de rupture de la matrice. Sur le graphique de la figure 1.15, au-delà du volume où les deux droites se croisent, la multifissuration serait assurée.

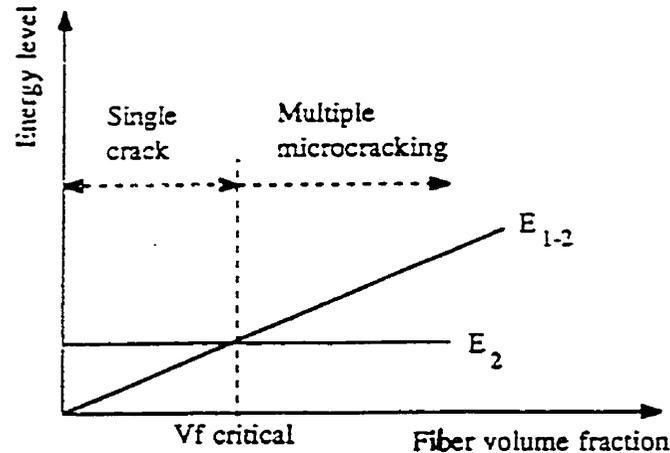


Figure 1.15: Détermination du volume critique de fibres (Tjiptobroto et Hansen 1993)

Sous une forme plus élaborée, le modèle de Tjiptobroto et Hansen (1993) nous indique que le volume critique de fibres est fonction de trois paramètres principaux, soit l'énergie de rupture de la matrice (G_m), le rapport d'élancement des fibres (L/d) et la résistance en cisaillement (τ).

$$V_{f-cr} = 2[\gamma_m + (\gamma_m^2 + A)^{0,5}] / A \quad (1.6)$$

$$\text{où } A = 2\gamma_m + L_f/r [(11\tau_f^2 L_f^2) / (48E_{fr})] \quad \text{et} \quad \gamma_m = 0,5G_m$$

Dans les mêmes années, Wu et Li (1994) ont dérivé une relation similaire dans laquelle les paramètres d'influence sont les mêmes:

$$V_{f-cr} = 48 G_{tip} / [g \tau d (L/d)^2 \delta^*] \quad (1.7)$$

Un modèle plus simple, mais cohérent avec les précédents, est proposé par d'autres auteurs (Bentur et Mindess 1990, Hannant 1978). Pour des fibres de section circulaire, l'équation prend la forme suivante:

$$V_{f-cr} = 2 (\sigma_{mu} / \tau_{fu}) (L / d) \quad (1.8)$$

où σ_{mu} est la résistance en traction de la matrice et τ_{fu} est la résistance ultime moyenne de l'interface fibre-matrice. Pour des macrofibres usuelles dont le rapport d'éclatement se situe typiquement entre 25 et 100, et en assumant une résistance de l'interface fibre-matrice égale à la résistance en traction de la matrice de béton, cela signifierait que la multifissuration est possible à des dosages variant entre 2,0% et 8,0% en volume. Autant du point de vue technique qu'économique, des dosages aussi importants ne sont à toutes fins utiles pas envisageables.

Les résultats expérimentaux obtenus dans quelques études tendent toutefois à démontrer qu'un comportement multifissurant peut être obtenu avec des teneurs en fibres plus faibles. Banthia et coll. (1993), qui ont effectué des essais de retrait restreint uniaxiaux avec séchage hâtif (3h) sur des pâtes ($E/C=0,6$) et des mortiers ($E/C=0,5$) renforcés avec des fibres d'acier déformées, ont observé une multifissuration significative à des teneurs en fibres de 0,5%. À une teneur de 1,0% en fibres, entre 5 et 13 fissures ont été observées sur une distance de mesure de 500 mm et, comparativement aux témoins non-renforcés, les ouvertures maximales de fissures étaient réduites d'un facteur allant de 3 à 15 selon le dosage et le type de matrice. Utilisant une expression dérivée de l'équation (1.8), les auteurs ont obtenus une prédiction relativement juste de l'espacement des fissures en utilisant pour le paramètre σ_{mu}/τ_{fu} des valeurs se situant entre 0,5 et 1,0. Grzybowski et Shah (1990), qui ont préconisé quant à eux l'essai de retrait restreint annulaire, ont obtenu des résultats similaires sur des bétons ($E/C=0,5$) mûris pendant quatre jours avant d'être exposés au séchage. Le nombre de fissures observées n'étaient pas aussi élevé que ce qu'ont observé Banthia et coll. sur des pâtes et des mortiers, mais l'effet résultant sur l'ouverture maximale des fissures était du même ordre.

À l'opposé, Paillère et coll. (1989), n'ont pas observé de multifissuration significative lors d'essais de retrait restreint uniaxiaux avec séchage hâtif sur des BRFA ($E/C=0,26$) contenant de la fumée de silice et renforcés à des dosages de 0,8%. De même, dans une étude récente (Bissonnette 1996), une série d'essais de traction directe conduite sur des bétons ($E/C=0,4$) dosés à 0,5 et 1,0% en fibres d'acier, après un mûrissement à l'eau de 7 ou 28 jours suivi d'une période de séchage à 50% d'humidité relative, n'a pas permis de mettre en évidence une diffusion observable de la fissuration.

1.3.2.3 Paramètres qui influencent la multifissuration

Que ce soit des fibres courtes ou continues, l'apparence de la multifissuration demeure la même, étant toujours représentée par une série de fissures étroites, généralement parallèles et équidistantes. (voir figure 1.16).

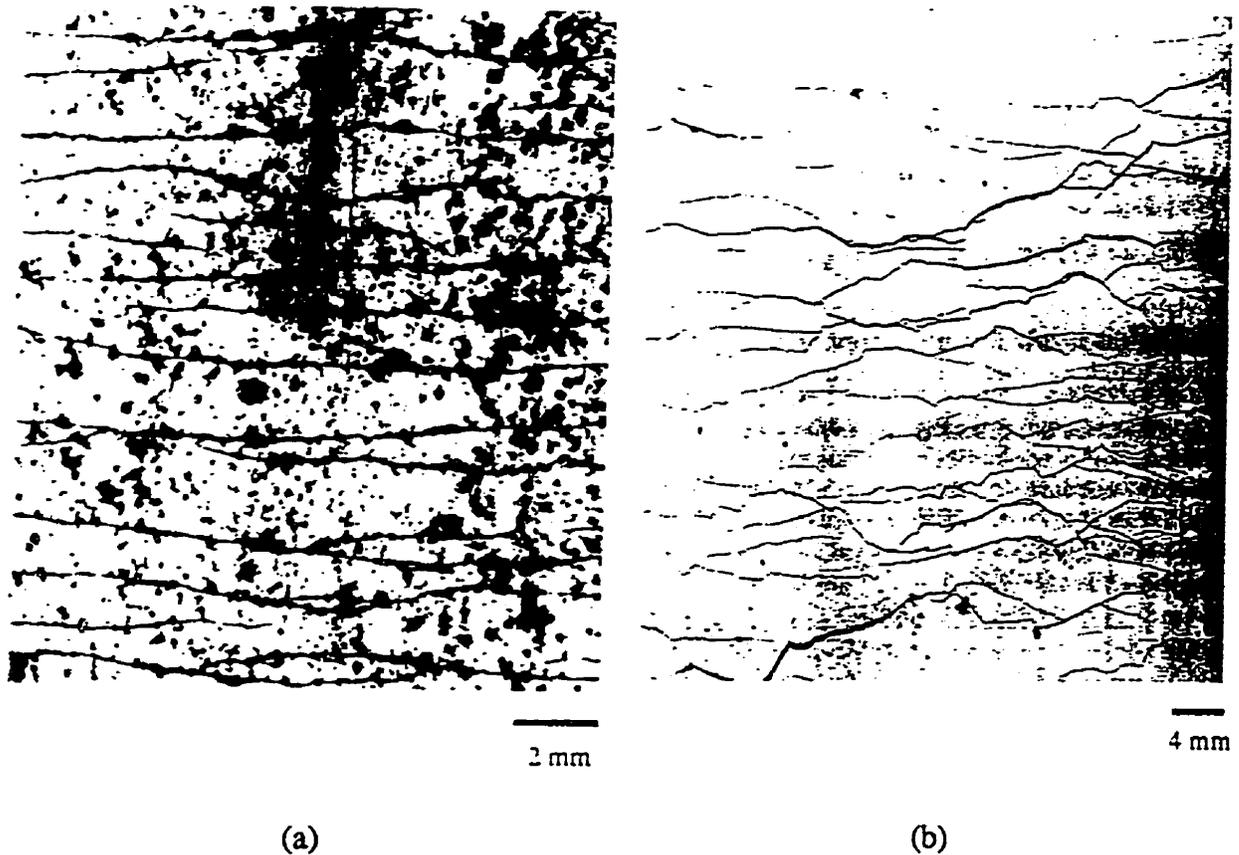


Figure 1.16: Multifissuration d'une pâte de ciment renforcée de (a) fibres de carbone continues et (b) fibres de polyéthylène courtes (Li et Wu 1992)

Pour prévoir la multifissuration de la matrice, quelques auteurs ont tenté de développer des équations mathématiques plus ou moins complexes (voir section précédente). Le problème de ces modèles est que les paramètres à considérer sont nombreux, varient énormément et certains de ces paramètres sont difficiles à mesurer expérimentalement. Chacun de ces modèles poursuit le même but, c'est-à-dire évaluer le volume de fibres minimum avec lequel la matrice de béton fissurera en plusieurs endroits avant la localisation ultime de la zone de rupture.

Les fibres sont les éléments dominants qui contrôlent le comportement du matériau composite et un choix judicieux de la géométrie (rapport d'élanement) et du matériau constitutif (module élastique) est essentiel en vue d'une utilisation précise.

Dans le cas des fibres continues, l'acier semble un choix logique pour les chercheurs. Son module élastique et sa résistance élevés ainsi que la facilité qu'on a à le mettre en fil sont les principaux avantages de ce matériau, tandis que son coût de fabrication élevé constitue un inconvénient.

Dans le cas des fibres courtes, les chercheurs ayant étudié la multifissuration du béton affirment que le module d'élasticité des fibres joue un rôle plus ou moins important sur le volume critique de fibres. Selon eux, une diminution du module élastique de la fibre entraîne une diminution du volume critique de fibres. Malheureusement, aucune explication n'est donnée sur les mécanismes internes qui provoqueraient cet effet positif.

La géométrie de la fibre est un paramètre important, car c'est elle qui contrôle la qualité de l'ancrage de la fibre dans le béton. La géométrie d'une fibre est la plupart du temps exprimée sous la forme d'un rapport d'élanement (L/d). Dans le cas des fibres continues, ce rapport n'a aucune signification puisque la longueur des fibres est supposée infinie. Le nombre de fissures par unité de longueur devient un paramètre essentiel pour comparer deux matériaux multifissurés. Il est donc recommandé d'utiliser un type de fibres avec un petit diamètre pour obtenir une fissuration plus rapprochée puisqu'une plus grande surface de cisaillement (surface spécifique du volume total de fibres) réduit la distance de transfert de la charge des fibres vers la matrice.

Pour ce qui est de l'utilisation des fibres discontinues, la majorité des auteurs s'accordent pour dire que les fibres ayant un rapport d'élanement élevé sont plus susceptibles de provoquer la multifissuration du matériau composite. On peut facilement comprendre qu'en augmentant la longueur ou en diminuant le diamètre tout en conservant le même volume de fibres, c'est la surface spécifique du volume de fibres qu'on augmente. Sur ce point, les fibres métalliques sont nettement désavantagées par rapport à d'autres types de fibres, comme par exemple le verre, le polypropylène et le polyéthylène (L/d beaucoup plus faible). Cependant, lorsqu'on utilise des fibres déformées, la plupart du temps des fibres métalliques munies d'ancrages à leurs extrémités, le rapport d'élanement n'est pas représentatif du véritable comportement de ces fibres. Elles offrent au béton une plus grande ténacité et une plus grande résistance à l'arrachement que les fibres droites pour un même

volume de fibres. Donc, selon leur géométrie et l'efficacité de leur système de retenue, il faudrait leur attribuer une valeur de L/d équivalente, aspect qui n'a pas fait l'objet de travaux publiés à ce jour.

Le deuxième paramètre important pouvant influencer la multifissuration est la résistance de l'interface fibre-matrice. Ce paramètre est probablement le plus simple à comprendre, car il s'applique au deux types de fibres. Plus l'interface est résistante, moins il y a de décollement et l'effort de traction est redistribué plus rapidement à la matrice. Théoriquement, le principe apparaît simple, mais il demeure toutefois complexe puisqu'il est très difficile de fixer la valeur de cette résistance lors de l'utilisation d'un modèle mathématique. On sait que la valeur de τ (résistance au cisaillement de l'interface) augmente avec la résistance en traction de la matrice, mais de quelle façon? Une fois l'interface décollée, quelle valeur doit-on utiliser et est-elle constante? La valeur de τ varierait entre 0,5 MPa et 6 MPa selon le type de fibres et de matrice. La précision de cette valeur devient donc capitale pour l'estimation d'un volume critique. Citons en exemple le modèle de Tjiptobroto et Hansen (1993) où une augmentation de 1 MPa à 4 MPa de la résistance au cisaillement procure une diminution du volume critique de fibres de 11.66 % à 2.74 % et cela en conservant la valeur de tous les autres paramètres.

Le dernier facteur important pouvant influencer la multifissuration du béton renforcé de fibres est évidemment la matrice du matériau composite et en ce sens, différents paramètres doivent être pris en compte selon l'approche considérée. Ces paramètres sont généralement, la contrainte ultime de la matrice (σ_{mu}), sa déformation ultime (ϵ_{mu}), son module d'élasticité (E_m) et son énergie de rupture (G_m). Si pour les matériaux renforcés de fibres continues, la multifissuration semble liée à la courbe contrainte-déformation (Li et coll. 1993), le problème semble beaucoup plus complexe dans le cas des fibres courtes puisque les opinions divergent sur le sujet. Tjiptobroto et Hansen (1993) affirment que la multifissuration est obtenue plus facilement avec un béton à très haute performance qu'avec un béton ordinaire, tandis que Wu et Li (1994) prétendent le contraire, c'est-à-dire que la multifissuration du béton est obtenue plus facilement avec l'utilisation d'une matrice de faible résistance. Lorsqu'on compare leur modèle mathématique respectif (équation 1.6 et 1.7), on constate que certains aspects sont communs, mais que d'autres diffèrent considérablement. Selon les deux modèles, une diminution de l'énergie de rupture entraîne une diminution du volume critique de fibres si les autres paramètres demeurent constants. Par contre, la variation du module élastique de la matrice n'entraîne pas les mêmes conséquences pour les deux modèles et cela est difficilement explicable. S'ils n'obtiennent pas les mêmes résultats et

n'arrivent pas aux mêmes conclusions, c'est parce qu'ils n'utilisent pas vraiment les mêmes matériaux et surtout parce que leur estimation des valeurs théoriques de τ , E_m et G_m diffèrent de façon importante. Nous n'avons qu'à penser à la variabilité de la valeur G_m obtenue par différents chercheurs avec différentes méthodes d'essais pour réaliser l'absence de consensus au sein de la communauté scientifique (Swamy).

Ce qui importe de retenir, c'est la grande variabilité et l'interdépendance des paramètres d'influence, ainsi, sinon surtout, la grande difficulté à mesurer ces paramètres avec précision. Pour atteindre la multifissuration, il faut une fibre avec un rapport d'élanement élevé, une résistance au cisaillement de l'interface élevée et une matrice faible. Un composite ayant ces caractéristiques peut sembler assez simple à mettre en oeuvre, mais lorsqu'on y regarde de plus près, la combinaison optimale est difficile à obtenir. Les fibres d'acier favorisent un excellent lien fibre-matrice, mais leur rapport d'élanement est relativement faible. Les fibres de polypropylène ont un rapport d'élanement élevé, mais leur adhérence à la matrice est de mauvaise qualité. Pour ces raisons, il est difficile d'atteindre la multifissuration avec des volumes de fibres peu élevés, mais de nombreux essais sont tentés pour trouver la combinaison fibre-matrice idéale. Pour cette raison, la prochaine sous-section traite des types d'essais possibles avec lesquels on peut mettre en évidence le comportement multifissurant d'un matériau composite cimentaire.

1.3.2.4 *Essais*

Il n'existe pas de technique normalisée pour les essais de traction directe sur béton, une technique sur des éprouvettes entaillées est toutefois sur le point d'être normalisée. Il n'est donc pas surprenant d'apprendre qu'aucune norme n'existe pour l'étude de la multifissuration du béton renforcé de fibres. La plupart du temps, pour étudier la multifissuration, on utilise des techniques employées couramment pour effectuer des essais de traction, soit la traction directe et la flexion 4-points. À ces essais de base, un système de détection et d'observation des fissures et de mesure de leurs dimensions est la plupart du temps ajouté au montage. Il existe également une série d'essais de retrait empêché avec lesquels on observe l'évolution de la fissuration de retrait dans le béton en cours de séchage.

Le premier essai est celui de traction directe. Cet essai est beaucoup utilisé pour la multifissuration quoique très complexe. Évidemment, pour le cas des fibres continues et alignées, cet essai est avantageux car le cheminement des efforts est bien contrôlé si le montage est précis. Un bel exemple de l'utilisation de ce montage est celui de Li et coll.

(1993). Leurs essais étaient effectués sur de petites éprouvettes renforcées de fibres continues. À un certain niveau de chargement, ils collaient des blocs d'acier sur l'éprouvette pour conserver l'ouverture des fissures et les observer au microscope.

Des essais similaires, sans observation des fissures, ont été réalisés par Wu et Li (1994) pour des éprouvettes renforcées de fibres courtes. Les éprouvettes mesuraient 12.7 mm x 76.2 mm x 304.8 mm. Si ce genre d'essais mène à de bons résultats, il faut tout de même porter une attention particulière à leur variabilité, car la dispersion des fibres à l'intérieur d'une petite éprouvette n'est pas toujours représentatif de la réalité, due à l'effet de paroi.

La flexion 4-points est le deuxième type d'essai auquel on peut avoir recours pour évaluer le potentiel de multifissuration des composites cimentaires renforcés de fibres. Tjiptobroto et Hansen (1993) ont utilisé des poutres de 50 mm x 50 mm x 500 mm avec des jauges de déformation fixées sous les poutres dans la zone où le moment est maximal pour observer la multifissuration. Leurs résultats sont intéressants, mais ils ne faut pas oublier que ce type d'essai ne fournit pas les mêmes résultats que l'essai de traction directe. Sur les graphiques de la figure 1.17, on peut remarquer qu'avec l'essai de flexion, l'écroutissage (gain de résistance après le première fissuration) du béton renforcé de fibres est possible, mais qu'avec l'essai de traction directe, la reprise d'efforts par les fibres après la rupture de la matrice est moins importante et cela pour la même gâchée de béton.

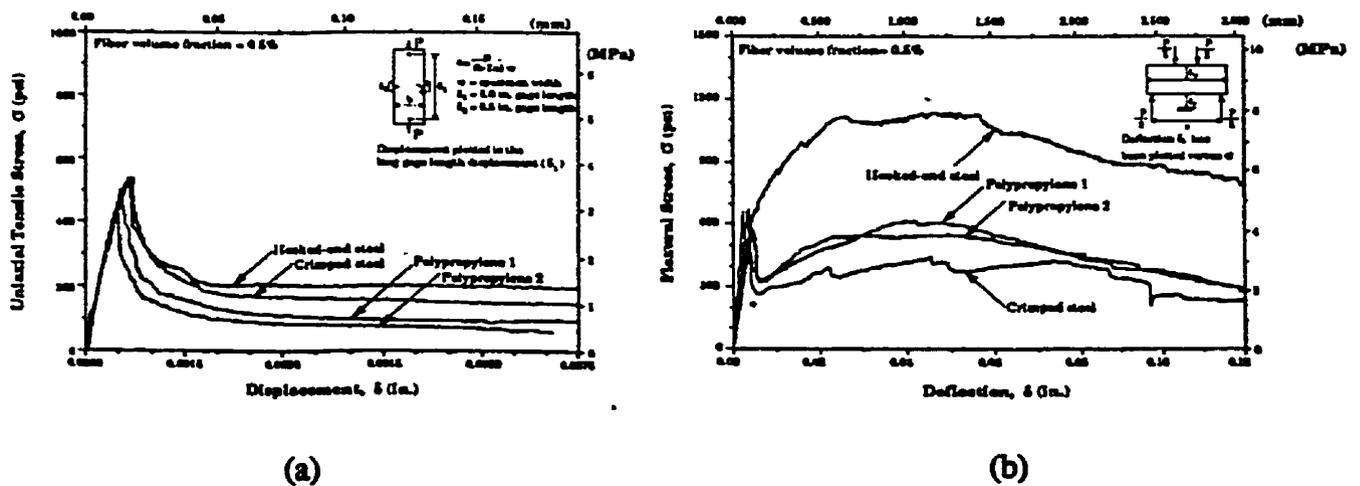


Figure 1.17: (a) essais de traction directe et (b) essais de flexion 4-points
(Cho et coll. 1991)

Les essais de retrait restreint constituent un autre type d'essai permettant de mettre en évidence la multifissuration. Une description générale de ces essais se retrouve à la section 1.2.3. La portée de tels essais est toutefois limitée en ce qui a trait à l'évaluation du potentiel de multifissuration, car la déformation de l'échantillon n'est généralement pas assez importante pour lui permettre de fissurer à plusieurs endroits. Généralement, le nombre de fissures se limite à trois dans le meilleur des cas, mais l'utilisation des fibres réduit l'ouverture totale des fissures même à des volumes de fibres situés entre 0.5 % et 1.0 % (40 kg à 80 kg)[Swamy et Stavrides 1979].

Par rapport aux autres types d'essai, les essais de retrait restreint se veulent plus représentatifs de la réalité, car ils impliquent une montée en charge graduelle et une prise en compte implicite du fluage. Toutefois, ici aussi, les dimensions des éprouvettes de béton sont généralement trop petites et des problèmes d'effet d'échelle peuvent survenir (distribution des fibres). La solution idéale serait d'effectuer des essais de retrait restreint sur de très grands échantillons et être en mesure de leur imposer, en plus de la déformation due au retrait, une déformation supplémentaire via un chargement mécanique extérieur appliqué très lentement.

1.4 Conclusion

La fissuration du béton est un problème de première importance et c'est pourquoi de nombreux chercheurs tentent par tous les moyens d'y remédier. L'introduction d'un faible pourcentage de fibres d'acier (< 0.5 % ou 40 kg) dans le béton ne semble pas améliorer considérablement les propriétés du béton quoi qu'en pensent certains fabricants de fibres. Par contre, en augmentant le dosage en fibres dans la gâchée (> 1.0 % ou 80 kg), on assiste parfois (selon la matrice et le type de fibres) à un comportement écrouissant de la part du béton [Cho et coll. 1991]. L'idéal serait d'utiliser une faible quantité de fibres avec une orientation préférentielle dans une direction parallèle aux contraintes externes. De la sorte, cette faible quantité de fibres agirait aussi efficacement qu'une grande quantité de fibres disposées aléatoirement dans le volume de béton et cela, à un coût beaucoup moins élevé.

La multifissuration du béton ne semble possible que dans la mesure où le béton montre un comportement pseudo-écrouissant, mais les fissures étroites et parallèles qui résulte de ce type de comportement (voir la figure 1.16) sont-elles vraiment nécessaires pour obtenir un bon comportement d'une structure? Les deux ou trois fissures que l'on obtient avec les essais de retrait restreint annulaire sont-elles le résultat de la multifissuration ou bien simplement d'un bon contrôle de la fissuration dû à un effet de structure? Si c'est un bon

contrôle de la fissuration, est-il suffisant pour empêcher une structure de se dégrader rapidement?

Il semble admis que les fissures très étroites ne provoqueraient pas la corrosion des fibres d'acier. Il est donc possible qu'un resurfaçage sans joint, construit en BRFA multifissant, puisse contrer les effets néfastes du retrait libre du béton et des problèmes de compatibilité entre l'ancienne dalle et le resurfaçage.

Dans ce mémoire, nous étudierons donc la distribution des fibres à l'intérieur d'une dalle équivalente à un resurfaçage ainsi que le potentiel de multifissuration de dalles lorsqu'elles sont soumises à un essai de traction lent, soit le retrait restreint.

CHAPITRE 2

PROGRAMME DE RECHERCHE

2.1 Contexte et objectif du projet

Au Québec, de nombreuses structures de béton sont détériorées en raison des différents chargements mécaniques appliqués à celles-ci ainsi qu'aux conditions climatiques souvent défavorables. C'est pourquoi les réparations superficielles en béton, parfois appelées "white topping", sont utilisées pour redonner aux structures une capacité structurale équivalente ou supérieure à celle d'origine ainsi qu'une apparence nouvelle. Plus particulièrement, la réparation de routes en béton avec une chape mince adhérente semble une voie particulièrement intéressante.

Les routes en béton construites à différentes époques ont donc subi de nombreux chocs et aujourd'hui leur apparence le démontre bien. Certaines dalles de béton sont maintenant sous dimensionnées et en mauvais état à cause de l'augmentation des charges routières et de l'action du climat.

Plusieurs techniques de réparations ont déjà été utilisées, mais les problèmes de joints et de fissuration des routes en béton n'ont jamais été éliminés complètement. La finalité du projet est donc de mettre en oeuvre un matériau permettant d'envisager la possibilité de réparer une route en béton sans joint en empêchant la localisation de la fissuration

Pour en arriver là, il apparaît nécessaire que le béton ait un comportement pseudo-écrouissant en traction. La courbe contrainte-déformation doit continuer de croître après l'apparition de la première fissure dans la matrice de sorte que celle-ci puisse, par la suite, fissurer en plusieurs endroits et que l'ouverture de la fissure principale demeure faible.

L'utilisation du béton renforcé de fibres est évidemment nécessaire pour en arriver à un tel comportement.

2.2 Programme d'essais

Pour atteindre notre objectif principal, un programme d'essais subdivisé en deux parties a été élaboré. La première partie est vouée à l'étude de la distribution des fibres à l'intérieur d'une couche mince de béton renforcé de fibres. La seconde partie a trait au contrôle et à la répartition de la fissuration dans le béton renforcé de fibres. Nous avons cherché à mettre en évidence les conditions nécessaires à la multifissuration du béton.

2.2.1 Étude de la distribution des fibres

Cette première partie a une grande importance, car elle vise à caractériser l'arrangement des fibres à l'intérieur du béton. Comme on sait qu'une orientation préférentielle des fibres influence les propriétés mécaniques du matériau, il est important de connaître leur disposition à l'intérieur d'une couche mince. En effet, la mise en place d'un BRFA en couches minces pourrait favoriser une orientation bidimensionnelle des fibres et, de façon implicite optimiser les propriétés du matériau.

Pour réaliser les essais de caractérisation, nous avons utilisé six dalles de béton renforcé de fibres. Afin de bien reproduire les conditions réelles, les essais ont été effectués sur des dalles de dimension représentative (2000 mm x 600 mm x 125 mm). Il est à noter que ces dalles de béton ont été reprises d'un projet connexe à l'intérieur duquel des essais de flexion avaient été effectués sur celles-ci. Les variables étudiées ont été le rapport eau-ciment (E/C) et la fraction volumique des fibres. Le rapport eau-ciment était de 0,35 pour trois dalles et 0,45 pour les trois autres. Pour ce qui est des teneurs en fibres retenues, elle étaient de 0,26 %, 0,51 % et 0,76 % en volume. Cela représente respectivement 20 kg, 40 kg et 60 kg de fibres d'acier par mètre cube de béton. Nous avons donc trois quantités de fibres pour chacun des deux rapports eau-ciment choisis.

Sur ces dalles, le programme d'essais consistait à compter les fibres traversantes sur les plans horizontaux et verticaux d'éprouvettes prélevées dans les dalles afin d'évaluer l'anisotropie et l'hétérogénéité de la distribution des fibres. La procédure de comptage et l'analyse statistique qui a suivi sont expliquées en détails à la section 2.4.1.4.

2.2.2 Étude de la multifissuration

Cette seconde partie est plus complexe, car la multifissuration est un phénomène mal connu et très peu documenté. Pour conduire cette étude, nous avons réalisé deux séries d'essais de retrait restreint à grande échelle. L'utilisation de grandes dalles, mesurant 1925 mm x 400 mm x 80 mm, restreintes par un cadre d'acier très rigide, était importante afin de reproduire des conditions représentatives (deux dimensions bien supérieures à la troisième) et d'éliminer l'effet d'échelle. De cette façon, la présence de défauts locaux n'entraînent pas systématiquement la rupture, car ils sont en quelque sorte " noyés " dans l'élément. Craignant que la déformation de retrait restreint ne soit pas toujours suffisante pour mettre en évidence la multifissuration, deux techniques d'essais palliatives ont également été mises au point pour soumettre les dalles à de plus grandes déformations.

La variable étudiée lors de la première série d'essais a été la fraction volumique de fibres, car le rapport eau-ciment des mélanges ainsi que le type de fibres utilisé n'ont pas été modifiés. Le type de fibres utilisé a été la Twincone 54/100 et le rapport eau-ciment a été fixé à 0,40. En plus d'un béton de référence sans fibre, trois fractions volumiques différentes ont été étudiées, soit 0,51%, 0,76%, et 1,27%. Cela correspond respectivement à 40kg, 60kg, et 100kg de fibres d'acier par mètre cube de béton.

Suite aux résultats de la première série d'essais, deux nouvelles variables ont été introduites au programme de recherche. Il s'agit du type de fibre et du rapport eau-ciment. Au cours de la deuxième série d'essais, trois types de fibres ont été utilisés, soit la Twincone 54/100, la Dramix ZL 60/105 et la Dramix ZL 60/80. Pour ce qui est du rapport eau-ciment, des mélanges à 0,40, 0,60 et 0,80 ont été utilisés. Les mélanges à 0,60 et 0,80 nous permettaient d'évaluer l'effet d'une matrice faible sur le comportement multifissurant du béton. Pour tous les mélanges, le dosage en fibres a été de 1,27%, soit 100kg.

Parallèlement à l'essai de retrait restreint, un essai de retrait libre était conduit sur une dalle témoin ayant un rapport surface-volume identique à la dalle de retrait restreint. Les dimensions des dalles témoins étaient de 500 mm x 400 mm x 80 mm.

Pour caractériser les mélanges de béton étudiés, nous avons effectué des essais de compression sur des cylindres de 150 mm x 300 mm suivant la norme CSA A23.2-9C à 3 jours, soit l'échéance à laquelle les essais de retrait restreint et les essais de retrait libre débutaient, et à 28 jours. À vingt-huit jours de mûrissement, nous avons également procédé à

la caractérisation du module élastique du béton en compression suivant la norme ASTM C469. La détermination du module de rupture et de la ténacité en flexion a été effectuée à 28 jours sur des prismes de 425 mm x 125 mm x 125 mm suivant la norme ASTM C1018. Plus de détails sur ces différents essais sont fournis à la section 2.4.2.4.

2.3 Matériaux utilisés et mélanges de béton

Dans cette section, on décrit les matériaux utilisés lors de la fabrication des mélanges ainsi que la composition de ceux-ci. Une nomenclature détaillée de chacun des mélanges est proposée et les propriétés du béton à l'état frais sont fournies.

2.3.1 Étude de la distribution des fibres

2.3.1.1 *Ciment*

Le ciment utilisé pour la fabrication des mélanges de béton dans cette partie était un ciment de type 30 à haute résistance initiale fabriqué par Ciment St-Laurent. Les résultats de l'analyse chimique, la composition minéralogique ainsi qu'une propriété physique de ce ciment sont présentées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1: Caractéristiques du ciment

Analyse chimique	SiO ₂	20,61 %
	Al ₂ O ₃	4,31 %
	Fe ₂ O ₃	1,76 %
	CaO	63,37 %
	MgO	2,80 %
	SO ₃	3,52 %
	K ₂ O	0,56 %
	Na ₂ O	0,29 %
	perte au feu	1,90 %
Composition minéralogique	C ₃ S	59,79 %
	C ₂ S	13,98 %
	C ₃ A	8,44 %
	C ₄ AF	5,37 %
Propriété physique	finesse Blaine	508 m ² /kg

2.3.1.2 Granulats

Le sable utilisé était un sable granitique naturel qui provenait de la carrière Ladufo, située à Saint-Joachim, Québec. Sa densité moyenne, à l'état saturée surface sèche, était de 2,69 et son absorption à 24 heures était de 0,62 %. Le tableau 2.2 présente la granulométrie détaillée de ce sable.

La pierre utilisée était une pierre granitique de dimension nominale maximale égale à 14 mm. Elle provenait de la carrière Bédard située à Val-Bélair. Sa densité moyenne était de 2,78 tandis que son absorption à 24 heures était de 0,56 %. Malheureusement, on ne possède pas la granulométrie de cette pierre.

Tableau 2.2: Granulométrie du sable

Sable	
Tamis #	% passant
4	96
8	92
16	82
30	51
50	24
100	4
200	1
module de finesse	2,51

2.3.1.3 Fibres

Pour tous les mélanges, la fibre utilisée était la Dramix ZC 60/.80 fabriquée par Bekeart Corporation. C'est une fibre en acier à haute résistance d'une densité de 7,85 et munies de crochets à ses extrémités. Sa longueur totale est de 60 mm et sa section circulaire a un diamètre de 0,80 mm. Ces fibres ont la particularité d'être collées ensemble de façon parallèle en plaquettes d'environ 5 à 25 fibres, ce qui favorise une dispersion plus rapide et réduit les problèmes liés à la formation d'oursins. La colle qui les retient est soluble à l'eau et se dissout en cours de malaxage. Un schéma de cette fibre est présenté à la figure 2.1.

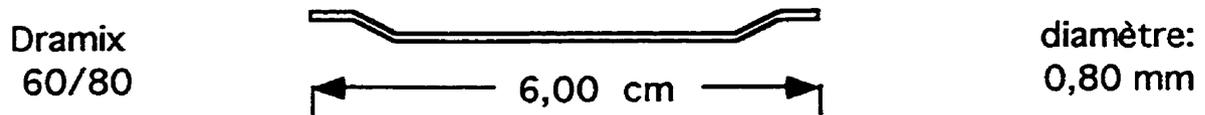


Figure 2.1: Géométrie des fibres

2.3.1.4 Adjuvants

Deux types d'adjuvants ont été utilisés au cours de cette partie, soit un agent entraîneur d'air et un superplastifiant. Le superplastifiant était un sulfonate de naphthalène à 42 % de matière solide et possédait une densité de 1.21. L'agent entraîneur d'air était un détergent synthétique ayant une densité de 1,00.

2.3.1.6 Nomenclature et composition des mélanges

Comme il y avait peu de mélanges pour cette première partie, la nomenclature utilisée est assez simple. Les seules variables étaient le dosage en fibres et le rapport eau-ciment, le type de fibres étant toujours le même soit la Dramix. La codification consiste donc en deux nombres séparés par la lettre D (pour Dramix). Le premier nombre indique les deux derniers chiffres du rapport eau-ciment (35 ou 45) et le second nombre indique la quantité de fibres dans le mélange (20, 40 ou 60) . Par exemple, le numéro de mélange 45-D-40 contient 40 kg/m^3 de fibres Dramix et le rapport eau-ciment de la matrice est de 0,45.

En raison de la présence des fibres dans les mélanges, la composition de ceux-ci est très variable. À chaque augmentation de la quantité de fibres, la quantité de ciment augmente elle aussi. De la même manière, le rapport sable-gravier (S/G) subit une hausse lorsque la fraction volumique de fibres augmente. Les modifications de la composition des matrices cimentaires sont dues à l'augmentation de la surface spécifique du volume de fibres. Comme chaque fibre doit être bien enrobée par le mortier pour que la maniabilité du béton soit de bonne qualité, la quantité de mortier doit augmenter d'un mélange de béton à un autre lorsque la quantité de fibres augmente. La composition exacte des mélanges est présentée dans le tableau 2.3. Il faut également noter que le volume d'air visé était de 6 % pour tous les mélanges.

Tableau 2.3: Composition des mélanges

Mélange #	Ciment kg/m ³	Eau kg/m ³	Sable kg/m ³	Pierre kg/m ³	Ent. air ml/kg C	Superpl. ml/kg C	Fibres kg/m ³
45-D-20	423	191	852	820	0,20	4,00	20
45-D-40	448	202	922	688	0,20	4,50	40
45-D-60	483	217	981	546	0,18	4,75	60
35-D-20	481	169	854	824	0,43	11,00	20
35-D-40	524	183	915	678	0,50	13,00	40
35-D-60	550	193	984	548	0,50	12,00	60

2.3.2 Étude de la multifissuration

2.3.2.1 Ciment

Le ciment utilisé lors de la fabrication des mélanges de béton était un ciment de type 10 fabriqué par Ciment Lafarge. Les résultats de l'analyse chimique, la composition minéralogique ainsi qu'une propriété physique de ce ciment sont présentés dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4: Caractéristiques du ciment

Analyse chimique	SiO ₂	20,35 %
	Al ₂ O ₃	4,22 %
	Fe ₂ O ₃	3,20 %
	CaO	62,80 %
	MgO	2,88 %
	SO ₃	3,36 %
	K ₂ O	0,91 %
	Na ₂ O	0,28 %
	perte au feu	2,31 %
Composition minéralogique	C ₃ S	58,0 %
	C ₂ S	14,0 %
	C ₃ A	6,0 %
	C ₄ AF	10,0 %
Propriété physique	finesse Blaine	248,4 m ² /kg

2.3.2.3 Granulats

Le sable utilisé était un sable granitique naturel qui provenait de la carrière Ladufo, située à St-Joachim, Québec. La densité moyenne, à l'état saturé surface sèche, était de 2,69 et l'absorption à 24 heures était de 0,88%. Le tableau 2.5 présente la granulométrie de ce sable.

La pierre utilisée était une pierre granitique de dimension nominale maximale égale à 14 mm. Elle provenait de la carrière Bédard située à Val-Bélair. Comme deux lots différents ont été utilisés, sa densité moyenne pouvait être de 2,75 ou 2,72 selon le mélange tandis que son absorption à 24 heures était de 0,88% ou 0,75%. On retrouve la granulométrie de ces deux lots de pierre dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5: Granulométrie du sable et de la pierre

	Sable		Pierre (lot #1)		Pierre (lot #2)	
Tamis #	% passant	Tamis #	% passant	% passant	% passant	
4	97	3/4 "	100,0	100,0		
8	93	1/2 "	96,5	88,0		
16	83	3/8 "	62,7	43,0		
30	50	4	2,5	3,0		
50	17	8	1,6	2,0		
100	4					
200	1					
mod. de finesse	2,56					

2.3.2.3 Fibres

Pour cette seconde partie, nous avons utilisé trois types de fibres, soit la Twincone 54/100 fabriquée par Eurosteel, la Dramix ZL 60/105 ainsi que la Dramix ZL 60/80 toutes deux fabriquées par Bekeart Corporation. Les trois sont fabriquées en acier à haute résistance de densité 7,85 et sont munies d'ancrages à leurs extrémités comme on peut l'observer à la figure 2.2. Le rapport d'éclatement des deux premières fibres est très près l'un de l'autre, soit 54 pour la fibre Twincone et 57 pour la fibre Dramix ZL 60/105 tandis que la fibre

Dramix ZL 60/80 possède un rapport d'élançement légèrement supérieur qui s'élève à 75. Contrairement à la fibre utilisée lors de la première partie, les fibres Dramix ZL 60/105 et ZL 60/80 ne sont pas collées en plaquettes et leur dispersion dans le mélange de béton s'effectue de la même manière que la Twincone 54/100. Ce choix a été fait afin de prévenir certains problèmes de teneur en air causés par la présence de la colle qui agit parfois comme un agent entraîneur d'air.

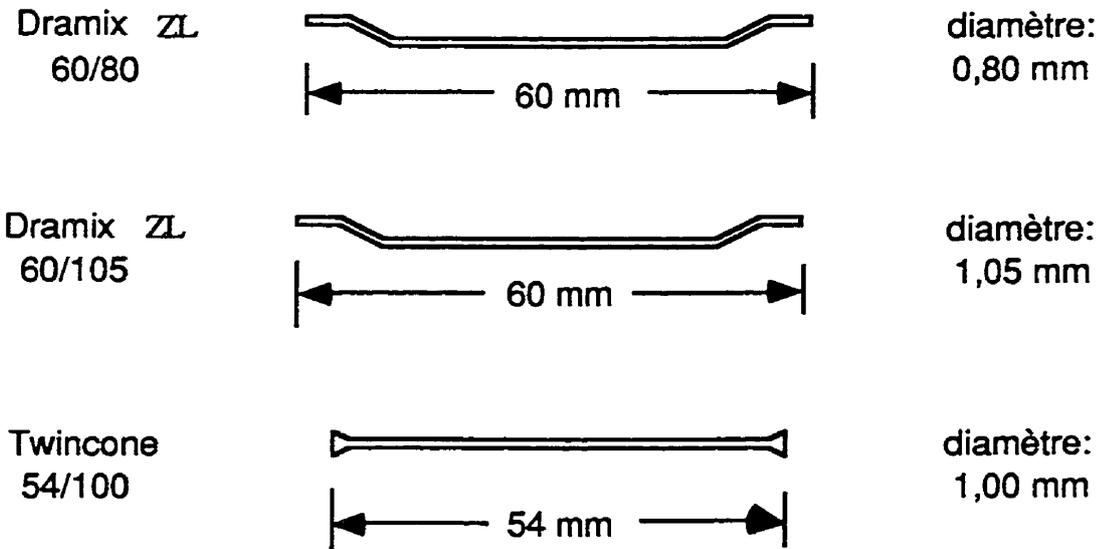


Figure 2.2: Géométrie des fibres

2.3.2.4 Adjuvant

Le seul adjuvant utilisé dans cette partie est un superplastifiant de type sulfonate de naphthalène contenant 42% de matières solides et caractérisé par une densité de 1,21.

2.3.2.5 Nomenclature et composition des mélanges

Les variables étant la quantité de fibres, le type de fibres et le rapport eau-ciment, la nomenclature est composée de trois termes. Tout comme pour la première partie, le premier terme représente le rapport eau-ciment du mélange, soit 40, 60, ou 80. Le second indique la première lettre du nom de la fibre utilisée, soit "T" pour Twincone et "D" pour Dramix et le dernier représente la quantité de fibres dans le mélange (40, 60, ou 100). Par exemple, le mélange 40-T-100 contient 100 kg/m^3 de fibres Twincone et possède un rapport eau-ciment de 0,40. Pour ce qui est du mélange de béton de référence (sans fibre), il a été identifié 40-X-X puisque son rapport eau-ciment était de 0,40.

Pour la même raison que les mélanges de béton de la partie précédente, les proportions des constituants des mélanges de la deuxième partie sont très variables. Comme on peut le remarquer dans le tableau 2.6, la quantité de ciment augmente de 15 kg et le rapport sable-gravier augmente de 0,10 à chaque fois que la quantité de fibres augmente de 20 kg/m³.

Nous avons choisi, pour la première série de mélanges, un rapport eau-ciment de 0,40. Ce choix a été fait en se basant sur l'exigence de la norme ACNOR A23.1-94 en ce qui a trait aux tabliers de ponts. Pour ce qui est de l'air entraîné, nous avons choisi de ne pas utiliser d'agent entraîneur d'air, car le renforcement avec les fibres, spécialement pour des fractions volumiques élevées, modifie beaucoup le réseau de bulles d'air et rend son contrôle très délicat. Ce choix a été fait en vue de simplifier l'analyse des résultats. Pour tous les mélanges, nous avons également tenté de conserver une maniabilité respectable du béton frais en visant un affaissement situé entre 50 et 150 mm. Là encore, la présence de fibres rend le contrôle de cette variable plus difficile.

Tableau 2.6: Composition des mélanges

Mélange #	Ciment kg/m ³	Eau kg/m ³	Sable kg/m ³	Pierre kg/m ³	Superpl. ml/kg C	Fibres kg/m ³
40-X-X	410	164	817	1021	9,50	0
40-T-40	440	176	881	881	9,25	40
40-T-60	455	182	904	822	7,25	60
40-T-100	485	194	933	718	6,50	100
40-D-100	485	194	930	714	7,00	100
60-T-100	320	192	1063	728	10,00	100
80-D-100	275	220	1059	725	2,50	100

2.4 Procédures de fabrication des mélanges et d'essais

2.4.1 Distribution des fibres

2.4.1.1 *Fabrication des mélanges*

La fabrication des mélanges de béton a été effectuée avec un malaxeur à mouvement planétaire. Le volume des gachées pour chacun des mélanges était de 0,220 m³.

2.4.1.2 Essais sur le béton frais

Quatre essais qui ont été effectués sur le béton frais. Il s'agit de la mesure de la température, de l'affaissement, de la teneur en air et de la masse volumique (voir tableau 2.7).

La température était mesurée dès la fin du malaxage à l'aide d'un thermomètre à béton. Les valeurs enregistrées se situaient entre 18 °C et 23 °C.

La mesure de la maniabilité a été effectuée avec le cône d'affaissement. Il s'agit de l'essai normalisé CSA A23.2-5C (Détermination de l'affaissement du béton). Les affaissements variaient entre 70 et 240 mm.

La mesure de la teneur en air du béton a été effectuée selon la norme CSA A23.2-4C (Détermination de la teneur en air du béton plastique par la méthode de pression d'air). Les teneurs en air variaient entre 3,0 et 8,4 %.

Tableau 2.7: Essais sur le béton frais

Mélange #	Température (°C)	Affaissement (mm)	Teneur en air (%)	Masse vol. (kg/m ³)
45-D-20	23	80	5,4	2333
45-D-40	22	100	8,4	2219
45-D-60	22	170	3,0	2397
35-D-20	20	70	4,0	2440
35-D-40	20	240	6,0	2404
35-D-60	18	240	7,0	2341

2.4.1.3 Fabrication des corps d'épreuve

Les dalles de béton ont été fabriquées quelques minutes après la fin du malaxage. La mise en place à l'intérieur des coffrages a été effectuée à l'aide d'une aiguille vibrante et la finition avec une truelle en bois.

2.4.1.4 Essai sur le béton durci

Comme nous voulions étudier la répartition des fibres à l'intérieur d'une couche mince de béton dans l'optique d'une réparation de surface, nous devons utiliser de grandes dalles pour bien reproduire la réalité d'une réparation. Le mûrissement des dalles de béton n'avait aucune importance pour nous, quel que soit les dispositions particulières prises lors de la fabrication de celles-ci. Rappelons-le, elles ont été fabriquées pour les besoins d'une autre étude.

Les dimensions des dalles fabriquées en laboratoire étaient de 2000 mm x 600 mm x 129 mm (125 mm plus 4 mm dû à la finition de la surface). De ces dalles, douze prismes de 125 mm x 125 mm x 129 mm ont été prélevés par sciage. Les prismes étaient disposés de la manière présentée à la figure 2.3(a). Ils étaient prélevés près du centre de la dalle de façon à obtenir des échantillons dans lesquels tout effet de paroi serait absent. Pour tous les prismes, nous procédions au comptage des fibres sur les quatre faces verticales. Chaque face était identifiée par une lettre et, lors du comptage, on distinguait le nombre de fibres au-dessus de l'axe central du nombre de fibres situées dans la moitié inférieure de chaque prisme (voir la figure 2.3(b) et (c)). Par la suite, les prismes étaient sciés sur deux plans perpendiculaires à la direction de la coulée, c'est-à-dire au quart et au trois quart de la hauteur des prismes (voir la figure 2.3(d)). En dernier lieu, le comptage des fibres s'effectuait sur ces deux plans horizontaux, inférieur et supérieur. Cette procédure a été répétée pour les six dalles fabriquées aux fins de l'étude.

Pour chaque prisme, nous avons donc recensé quatre quantités de fibres sur les plans verticaux dans la partie inférieure (N_{vai} , N_{vbi} , N_{vci} , N_{vdi}), quatre quantités de fibres sur les plans verticaux dans la partie supérieure (N_{vas} , N_{vbs} , N_{vcs} , N_{vds}), ainsi que deux quantités de fibres sur les plans horizontaux, inférieur et supérieur (N_{hi} et N_{hs}).

Globalement, nous avons étudié cinq plans longitudinaux à la dalle de 483.75 cm² (375 mm x 129 mm) et quatre plans transversaux à la dalle de 645 cm² (500 mm x 129 mm). Il y a également les deux plans horizontaux de 1875 cm² (375 mm x 500 mm) (voir figure 2.3).

Pour quantifier la dispersion des fibres à l'intérieur d'une faible épaisseur de béton, soit environ le double de la longueur d'une fibre, nous avons utilisé un facteur d'orientation validé par Breysse et coll. (1995). Il s'agit du facteur d'orientation alpha qui est égal au

rapport du nombre de fibres par unité de surface dans deux directions perpendiculaires. Les deux directions étudiées, dans notre cas, sont évidemment la verticale et l'horizontale. L'unité de surface choisie est le cm^2 .

Le traitement des données recueillies lors du comptage des fibres était le suivant. Premièrement, les quantités brutes de fibres ont été transformées en densités de fibres (nombre de fibres par cm^2 de surface). Les résultats sont présentés dans des tableaux à l'annexe E. Ils y sont représentés sous les symboles $n_v...$ et $n_h...$. Par la suite, pour chacun des douze prismes d'un mélange, trois coefficients alpha ont été calculés, soit un pour la partie supérieure (alpha s), un pour la partie inférieure (alpha i) et un coefficient moyen pour tout le prisme (alpha glob.). Les coefficients alpha sont obtenus de la façon suivante.

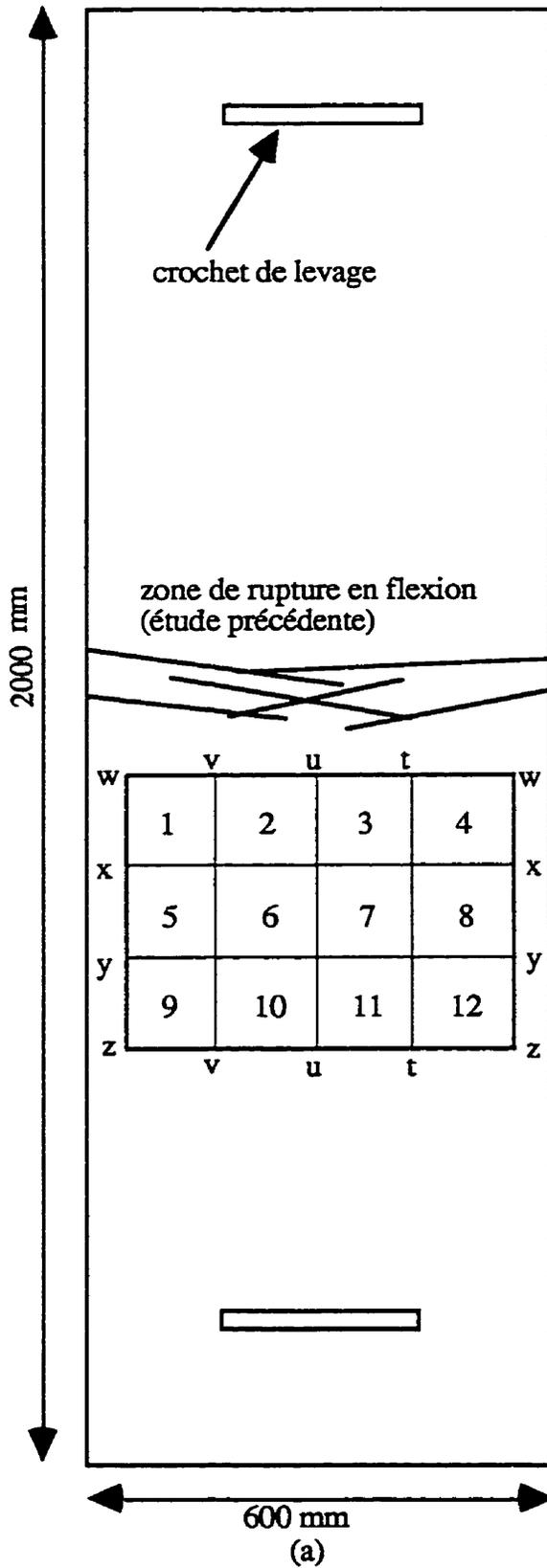
$$\alpha s = n_{hs} / [(n_{vas} + n_{vbs} + n_{vcs} + n_{vds}) / 4] \quad (2.1)$$

$$\alpha i = n_{hi} / [(n_{vai} + n_{vbi} + n_{vci} + n_{vdi}) / 4] \quad (2.2)$$

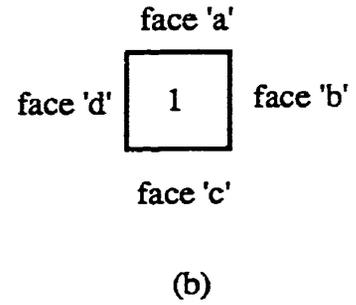
$$\alpha \text{ glob.} = [(n_{hs} + n_{hi}) / 2] / [(n_{vas} + n_{vbs} + n_{vcs} + n_{vds} + n_{vai} + n_{vbi} + n_{vci} + n_{vdi}) / 8] \quad (2.3)$$

Pour compléter cette étude de l'isotropie du matériau, la moyenne ainsi que le coefficient de variation des trois facteurs d'orientation des douze prismes de chacune des dalles ont été calculés.

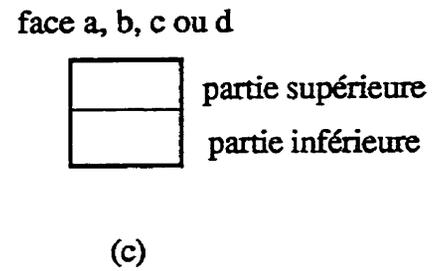
Pour ce qui est de l'hétérogénéité, nous la caractérisons en comparant les densités de fibres sur les différents plans d'observation. Pour vérifier différents cas où une hétérogénéité dans la distribution des fibres est possible, nous avons comparé plusieurs types de plans. Tout d'abord, nous avons comparé la densité de fibres sur les plans horizontaux. Cette comparaison nous permet de connaître la densité de fibres placées à la verticale, dans le haut des prismes versus la densité de fibres placées à la verticale dans le bas des prismes. Nous avons également comparé les fibres qui sont en position horizontale dans le prisme, soit dans le haut ou le bas. Dans un autre cas plus complexe, nous avons comparé la densité de fibres, sur toute l'épaisseur de béton, qui se retrouve dans les quatre plans transversaux à la dalle (w-w, x-x, y-y et z-z) à celui qui se retrouve dans les trois plans centraux longitudinaux à la dalle (t-t, u-u et v-v) (voir figure 2.3). Les deux plans longitudinaux à la dalle situés sur les



Vue en plan:



Vue en élévation :



Vue en élévation :

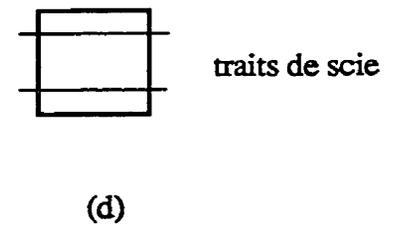


Figure 2.3: Description des dalles

côtés des coffrages ne font pas partie de ces résultats et des suivants puisqu'ils n'étaient pas assez représentatifs. Une explication plus élaborée est fournie dans l'analyse des résultats.

Nous avons également vérifié l'influence des dimensions des éprouvettes sur le coefficient de variation de la densité de fibres entre plusieurs plans parallèles, que ce soit pour les plans longitudinaux à la dalle ou les plans transversaux.

2.4.2 Multifissuration

2.4.2.1 *Fabrication des mélanges*

La fabrication des mélanges de béton a été effectuée à l'aide d'un malaxeur à mouvement planétaire. Le volume de chacune des gâchées de béton était de $0,170 \text{ m}^3$ sauf pour le mélange 80-D-100 dont le volume gâché était de $0,285 \text{ m}^3$. La séquence de malaxage a été établie de la façon suivante de façon à reproduire la séquence de malaxage d'une bétonnière mobile.

- 1) Introduction des matériaux secs (ciment, pierre et sable) et homogénéisation en malaxant pendant 1 minute.
- 2) Ajout de l'eau de gâchage et des adjuvants en malaxant pendant 4 minutes.
- 3) Arrêt du malaxage pendant 3 minutes en recouvrant le mélange.
- 4) Malaxage pendant 2 minutes.
- 5) Arrêt du malaxage et pendant les 20 minutes suivantes, malaxage de 30 secondes à toutes les 5 minutes.
- 6) Malaxage pendant 6 minutes en introduisant lentement les fibres.
- 7) Arrêt du malaxage pendant 2 minutes.
- 8) Malaxage pendant 3 minutes.
- 9) Arrêt du malaxage.

2.4.2.2 *Essais sur le béton frais*

Comme dans la première partie de l'étude, quatre mesures ont été effectués sur le béton frais. Il s'agit de la mesure de la température, de l'affaissement, de la teneur en air et de la masse volumique (voir tableau 2.8).

Pour chacun des mélanges, la température de l'eau était ajustée à 20°C tout juste avant de l'ajouter aux matériaux secs. C'est pourquoi la température du béton frais n'a varié que très peu d'un mélange à l'autre (entre 20°C et 23°C).

Pour ce qui est de la mesure de l'affaissement, la variation des résultats a été plus significative, malgré des mélanges d'essais effectués pour ajuster l'affaissement à une valeur avoisinant 110 mm. La mesure de l'affaissement (entre 30 et 90 mm) était toujours plus faible que la valeur visée sauf pour le mélange 80-D-100 (150 mm). La cause de ces problèmes a été attribuée au fait que les mélanges d'essais, d'un volume de 40 litres, étaient effectués dans un malaxeur de petite dimension (capacité maximale de 80 litres). L'énergie produite par les pales lors du malaxage était inférieure à celle produite par le malaxeur utilisé lors des gâchées officielles (capacité maximale de 250 litres). Pour le mélange de référence (40-X-X), une fuite imprévue dans la cuve du malaxeur a également contribué à diminuer l'affaissement du mélange. Quoiqu'il en soit, ces désagréments n'ont pas entraîné de problème de mise en place particulier.

La teneur en air d'un béton à air entraîné se situe généralement entre 5% et 8%. Comme nos mélanges ne contenaient pas d'agent entraîneur d'air, le volume d'air visé était de 3%. Les résultats montrent que l'estimation faite était assez juste et que la variation des résultats est faible.

Tableau 2.8: Essais sur le béton frais

Mélange #	Température (°C)	Affaissement (mm)	Teneur en air (%)	Masse vol. (kg/m ³)
40-X-X	22	30	2,7	2453
40-T-40	21	90	1,4	2474
40-T-60	22	60	2,2	2482
40-T-100	23	60	2,4	2475
40-D-100	20	90	2,5	2454
60-T-100	20	50	3,5	2411
80-D-100	20	150	1,4	2367

2.4.2.3 Fabrication des corps d'épreuve

Les éprouvettes de béton ont été fabriquées quelques minutes après la fin du malaxage.

Pour chacun des mélanges, les corps d'épreuves suivants ont été fabriqués: une dalle de 1925x400x80 mm destinée à l'essai de retrait restreint, une dalle témoin de 500x400x80 mm pour la mesure parallèle du retrait libre, six cylindres 150x300 mm pour la détermination de la résistance en compression et une plaque de 500x425x125 mm de laquelle étaient prélevés trois prismes de 425x125x125 mm pour les essais de flexion. La dalle de retrait restreint, fabriquée à l'horizontale à même le cadre d'acier, et la dalle de retrait libre étaient conservées dans leur moule sous du jute humide recouvert de polyéthylène jusqu'au moment du début de l'essai, à trois jours, où elles étaient exposées au séchage. Les cylindres et les prismes de flexion étaient démoulés à 20±4 heures et conservés dans l'eau saturée de chaux jusqu'au moment des tests (3d, 28d). Les opérations de sciage des éprouvettes de flexion étaient exécutées immédiatement après le démoulage.

2.4.2.4 Essais sur le béton durci

Pour débiter l'essai de retrait restreint, il fallait mettre le cadre d'acier (voir figure 2.4) en position verticale à l'aide d'un chariot élévateur. D'ailleurs, pour toute la durée de l'essai, le cadre est demeuré dans cette position pour permettre un séchage des deux côtés de la dalle. Quatre cadres identiques ont été fabriqués aux fins de l'étude. Le concept est le suivant: les profilés d'acier en I (W250x73) situés à chacune des extrémités de la dalle, solidaires de cette dernière par le biais d'ancrages noyés, sont reliés de part et d'autre de la dalle par des profilés tubulaires (HSS152x102x11) en acier, s'opposant ainsi à la contraction libre du corps d'épreuve exposé au séchage. Le support central (tige filetée de 5 mm de diamètre à l'avant et à l'arrière du cadre) avait comme fonction d'empêcher la flexion (sens faible) des profilés tubulaires. Théoriquement, le degré de restriction (∂) offert par les cadres est donné par l'équation suivante, où E_b (GPa) représente le module d'élasticité effectif du béton prenant en compte l'âge et le comportement viscoélastique du béton.

$$\partial = 1 / (1 + 0,015E_b) \quad (2.4)$$

Pour des bétons usuels, dont le module élastique à 28 jours varie généralement entre 25 et 35 GPa, cela signifie un degré de restriction théorique minimal de l'ordre de 70%, le module élastique évoluant peu après 28 jours et la composante viscoélastique étant négligée. Ce degré de restriction nous semblait un bon compromis entre le degré de restriction effectif et le poids et la dimension des cadres. Les deux colonnes latérales de chaque cadres étaient instrumentées avec des jauges de déformations résistives branchées en pont complet. La

contrainte calculée dans chacune des colonnes était enregistrée dans le temps, ce qui permet, par correspondance directe, de calculer l'effort induit par le retrait empêché dans la dalle de béton.

$$\varepsilon_{\text{acier}} = K \Delta V \quad \text{où} \quad K = 2/(FV (1 + \nu_{\text{acier}})) \quad (2.5)$$

$$\sigma_{\text{béton}} = (A_{\text{acier}} / A_{\text{béton}}) \varepsilon_{\text{acier}} E_{\text{acier}} \quad (2.6)$$

ΔV = lecture des jauges (volt)

F = facteur de jauges = 2,065

ν_{acier} = coefficient de poisson de l'acier = 0,30

V = voltage d'alimentation = 5 volts

E_{acier} = module élastique de l'acier = 200000 MPa

$A_{\text{acier}} / A_{\text{béton}}$ = rapport de surface = 0,334

Tel que mentionné précédemment, les dalles de retrait restreint étaient exposées au séchage à trois jours, durée qui se voulait représentative de la pratique de mûrissement usuelle en chantier au Canada. Au même moment où l'essai de retrait restreint démarrait, une dalle témoin de section identique était exposée dans les mêmes conditions. L'essai de retrait libre que nous avons effectué n'était pas l'essai normalisé, car nous voulions observer le retrait d'une éprouvette ayant un rapport surface séchante sur volume identique à celui de la dalle de retrait restreint. La dalle de retrait libre a donc été scellée sur les parois latérales à l'aide d'un papier d'aluminium auto-adhésif et a été séchée à la verticale tout comme la dalle de retrait restreint. Évidemment, les conditions environnementales étaient les mêmes, puisque les éprouvettes témoins étaient placées tout près de celles de retrait restreint. L'évolution des déformations de retrait a été mesurée dans le temps avec des jauges de type Demec. La disposition des plots, collés une fois le béton durci, a été faite de manière à obtenir sept valeurs de retrait libre pour chaque côté de la dalle. Il y avait quatre mesures axiales et trois mesures transversales. L'écartement initial entre les plots était d'environ 200 mm (voir la figure 2.5). Par la suite, nous avons mesuré la distance entre les plots à différents intervalles, soit 1, 3, 7, 14, 21, 28, 42, 56 et 98 jours.

Comme nous ne pouvions pas contrôler la température et l'humidité ambiantes du laboratoire, ces deux paramètres étaient mesurés à l'aide de sondes enregistreuses. La connaissance de la variation de température nous permettait de corriger les déformations enregistrées.

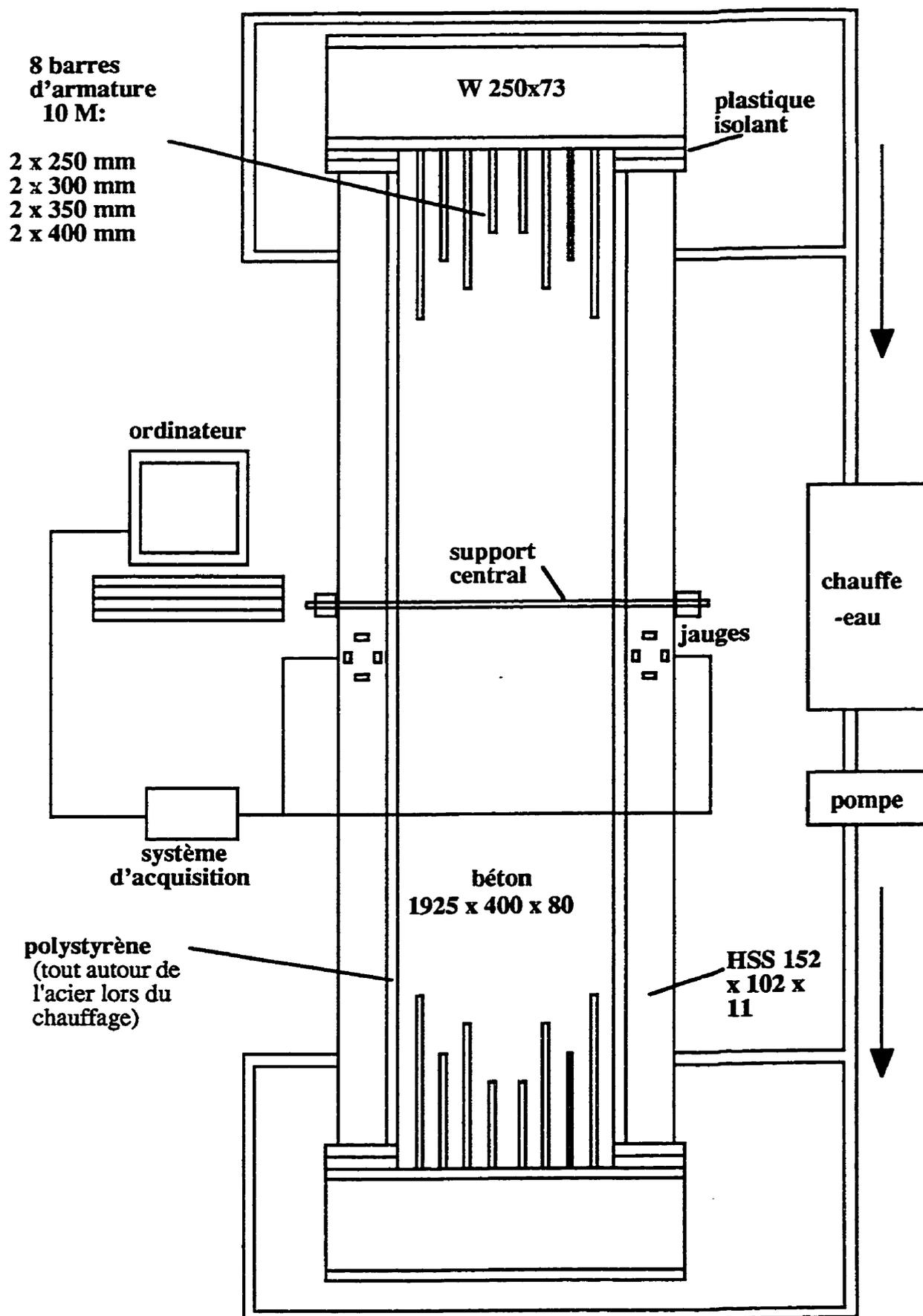


Figure 2.4: Schéma du montage de l'essai de retrait restreint

Tout au long de la période de séchage, qui durait jusqu'au moment où le retrait libre commençait à se stabiliser, une inspection méticuleuse de la fissuration était effectuée à l'aide d'une lunette grossissante, et cela des deux côtés de la dalle.

Lorsque le taux de retrait devenait relativement faible (≈ 56 d), nous procédions à un essai de traction sur les éprouvettes de béton en faisant circuler de l'eau chaude à l'intérieur des colonnes d'acier des cadres d'essai. Ce système auxiliaire avait été prévu pour pallier à l'incapacité éventuelle des cadres de retrait restreint à conduire les dalles à un état de fissuration suffisant pour provoquer la multifissuration. Comme l'eau pouvait atteindre des températures avoisinant $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, nous avons prévu isoler les colonnes d'acier à l'aide d'une feuille de polystyrène de 25 mm d'épaisseur et isoler les têtes du cadre à l'aide d'un plastique à haute résistance de $12,7\text{ mm}$ d'épaisseur (module élastique de 12 GPa , résistance en compression de 230 MPa et température d'essai de 130°C), ce qui permettait à la dalle de conserver sa température initiale. L'élévation de température ($\approx 40^{\circ}\text{C}$) par rapport à la température ambiante de référence, se traduisait par une déformation axiale (allongement) potentielle du cadre de l'ordre de 500×10^{-6} .

En plus de sa simplicité et de sa souplesse, l'un des principaux avantages de cet essai est la possibilité d'imposer l'effort de traction supplémentaire à des taux de chargement très lents. Le taux maximal d'accroissement de la température était de 4°C/h . Pour cet essai, nous suivions l'évolution de la déformation de l'éprouvette à l'aide des deux ponts de jauges collés sur les colonnes d'acier ainsi que quatre capteurs de déplacement (LVDT) disposés sur les deux faces de la dalle (voir la figure 2.6) de manière à mesurer l'écartement des faces intérieures des poutres d'extrémité en fonction de l'élévation de température. La température des colonnes était mesurée à l'aide d'un thermocouple placé entre l'isolant et chaque colonne d'acier.

Les déformations thermiques dans les colonnes nous permettaient donc d'augmenter la déformation totale imposée dans la dalle. Malgré tout, la multifissuration du béton renforcé de fibres n'était pas assurée, car la déformation totale imposée n'était pas très élevée compte tenu de la perte élastique lors de la première fissuration. Pour s'assurer de pouvoir conduire les corps d'épreuve à un degré de fissuration suffisamment élevé, nous avons mis au point un essai de traction sur nos éprouvettes de grande taille. Pour cet essai peu usuel, le piston d'un vérin hydraulique d'une grande capacité (1000 kN en traction), supporté par une poutre massive, était fixé au profilé en I supérieur de l'échantillon à l'aide de boulons et le profilé inférieur était fixé à une dalle de béton structurale de la même manière (voir figure 2.6). Pour

cet essai, les colonnes d'acier étaient retirées. Les paramètres mesurés à l'aide cet essai étaient la force nécessaire pour obtenir la rupture complète de la dalle et le déformation (allongement de la dalle) correspondante. La force était mesurée avec une cellule de charge et la déformation était mesurée avec les quatre capteurs de déplacement (LVDT) mentionnés précédemment.

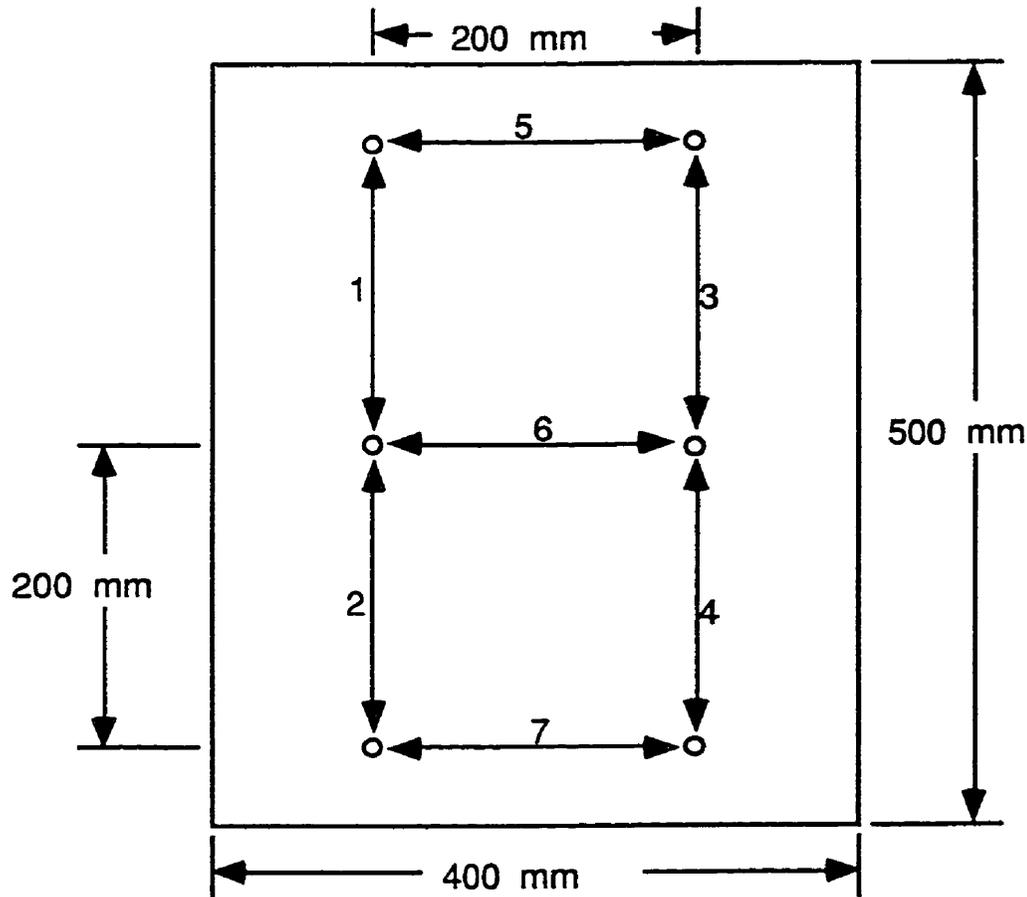


Figure 2.5: Disposition des plots

Pour vérifier si la rupture des dalles de béton survenait dans une zone où peu de fibres étaient présentes, nous avons scié la partie centrale à neuf sections différentes de manière à comparer le nombre de fibres présents à celui de la section de rupture.

Tel que mentionné précédemment, les cylindres de compression utilisés avaient 150 mm de diamètre et 300 mm de hauteur. Ils étaient tous démoulés 20 ± 4 heures après la gachée d'essai et étaient alors immergés dans de l'eau contenant de la chaux. Trois de ces cylindres étaient testés en compression selon la norme CSA A23.2-9C (Détermination de la

résistance à la compression d'éprouvettes de béton cylindriques) après 3 jours de mûrissement et les trois autres après 28 jours.

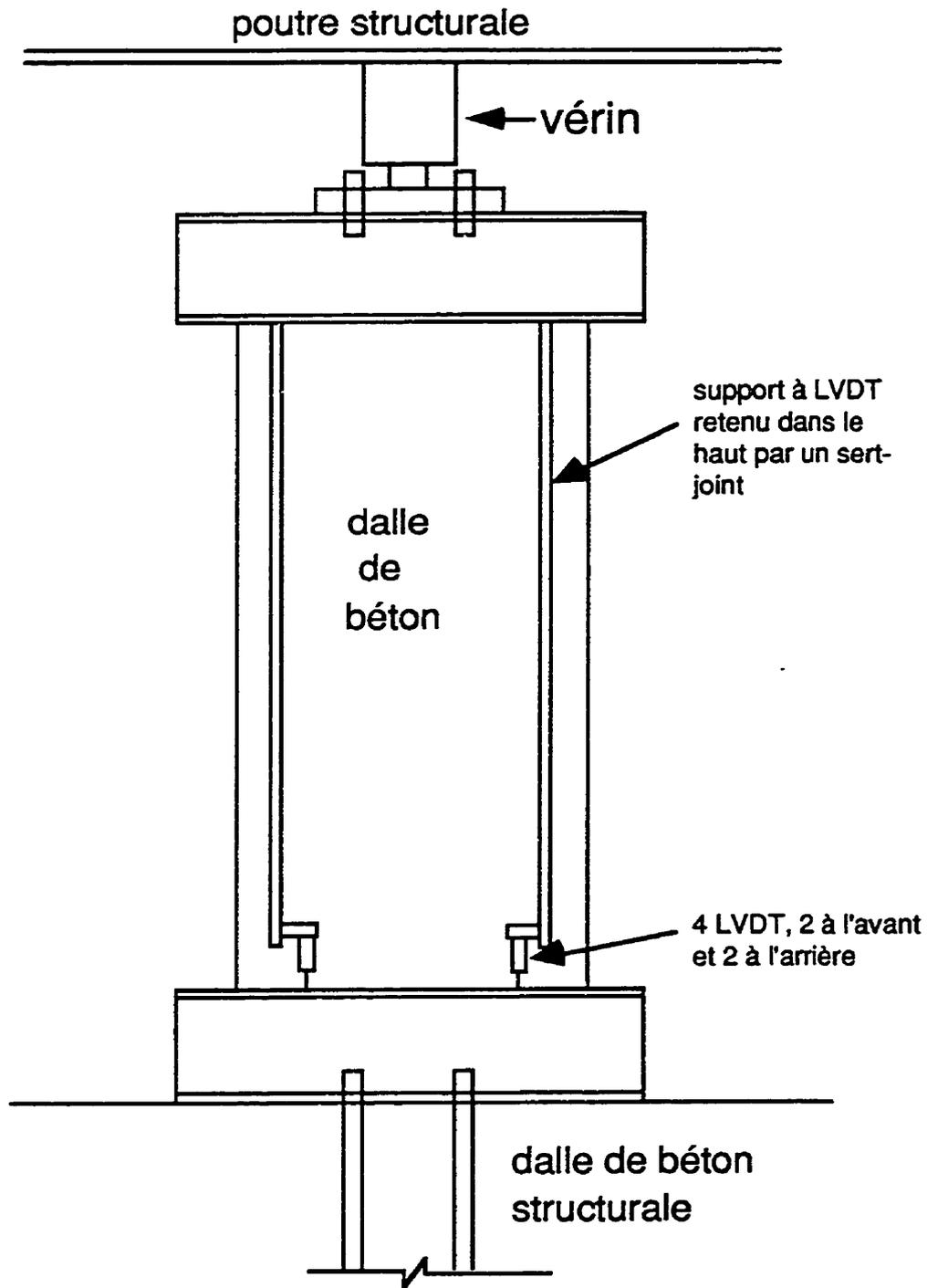


Figure 2.6: Schéma de l'essai de traction

Pour déterminer le module élastique des mélanges, nous avons effectué l'essai normalisé ASTM C649 à vingt-huit jours. Sur une moyenne de deux éprouvettes par mélange, la valeur du module élastique correspond à la pente de la droite obtenue par régression linéaire de la courbe comprise entre une contrainte nulle et la contrainte correspondant à 40% de la contrainte de rupture. Chaque échantillon était chargé deux fois de façon consécutive. Les déformations du béton étaient régulièrement enregistrées et, à partir de la moyenne de ces enregistrements, une courbe contrainte-déformation était tracée pour chacune des éprouvettes.

Pour effectuer nos essais de flexion, il fallait tout d'abord démouler et scier la dalle de 425 mm x 500 mm x 125 mm en trois poutres de 425 mm x 125 mm x 125 mm. Ces opérations étaient effectuées à 20 ± 4 heures après la gachée d'essai et avaient pour but de minimiser l'effet de paroi sur l'orientation des fibres. Par la suite, les trois poutres étaient mûries dans de l'eau saturée de chaux et ont été testées à 28 jours de mûrissement. L'essai a été effectué selon la norme ASTM C1018, qui décrit l'essai de flexion à 4 points.

Les paramètres qui nous intéressaient étaient le module de rupture (MOR), l'allure générale de la courbe charge-déplacement ainsi que le nombre de fibres sur la section de rupture. Pour les éprouvettes utilisées, le module de rupture se calculait à l'aide de la formule suivante:

$$\text{MOR} = P * 375 / (b * d^2) \quad (2.7)$$

où MOR est exprimé en MPa, P est la charge de fissuration exprimée en N, b est la largeur de la poutre en mm et d est la hauteur de la poutre en mm.

CHAPITRE 3

DISTRIBUTION DES FIBRES: RÉSULTATS ET ANALYSE

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, les résultats de chacun des essais sur le béton durci sont présentés sous forme de tableaux ou de figures. L'analyse de ces résultats est également présentée. La première partie traite l'isotropie tandis que la seconde traite l'hétérogénéité dans la distribution des fibres.

3.2 Résultats généraux

Dans l'étude de la distribution des fibres, il n'y a pas eu réellement d'essais sur les éprouvettes de béton durci. On procédait simplement au dénombrement des fibres sur divers plans des prismes sciés. À l'annexe E, on présente les résultats obtenus lors du comptage des fibres. Pour aider à la compréhension de ces tableaux, voici une description sommaire des différentes lignes et colonnes.

La première ligne représente le numéro de chacune des éprouvettes étudiées, soit les prismes 1 à 12 disposés de la manière présentée à la figure 2.3 du chapitre 2. Il y a donc une colonne pour chacun des prismes et, dans les deux dernières colonnes, on retrouve respectivement la moyenne et le coefficient de variation des 12 prismes pour chacune des lignes des tableaux. Les résultats de la 2^e à la 9^e ligne représentent la quantité de fibres totale observée sur les différentes faces verticales des prismes tandis que ceux des 10^e et 11^e lignes représentent la quantité de fibres totale des faces horizontales.

Les lignes 12 à 21 sont la répétition des lignes 2 à 11 à la différence qu'elles sont exprimées en terme de densité de fibres (fibres/cm²). Les lignes 22 et 23 représentent le nombre de fibres par unité de surface pour les quatre faces verticales dans les parties supérieure et inférieure de la dalle. Les trois dernières lignes de chacun des tableaux nous donnent les valeurs des coefficients d'orientation (α) correspondant respectivement à la partie supérieure des prismes, à la partie inférieure des prismes et enfin, à la moyenne des deux valeurs précédentes

Le comptage des fibres n'est pas toujours précis. Quelques fois, par distraction, on peut compter deux fois la même fibre ou bien en oublier une autre. Il y a également des pertes de fibres lors des opérations de sciage, mais l'erreur qui en résulte est probablement faible.

Les résultats obtenus semblent généralement bons puisque les valeurs de densité de fibres d'un mélange à l'autre sont comparables (voir annexe E). Sur les plans horizontaux, une moyenne de 0,16 fibres/cm² a été comptée pour les mélanges à 20 kg/m³ de fibres. Une moyenne de 0,33 fibres/cm² a été obtenue pour ceux à 40 kg/m³ et une moyenne de 0,45 fibres/cm² pour ceux à 60 kg/m³. On note qu'un ajout de 20 kg de fibres fait augmenter la densité d'environ 0,15 fibres/cm².

Sur les plans verticaux, la même situation se présente. Pour les mélanges à 20 kg/m³ de fibres, la densité moyenne est de 0,29 fibres/cm², pour les mélanges à 40 kg/m³ de fibres, on compte 0,61 fibres/cm² tandis que les mélanges à 60 kg/m³ de fibres compte 0,94 fibres/cm². Donc, un ajout de 20 kg de fibres fait augmenter la densité d'environ 0,31 fibres/cm².

Pour ce qui est des facteurs d'orientation (α), la quantité de fibres importe peu sur les résultats et les valeurs se situent entre 0,38 et 0,65. Aucune tendance nette ne peut être établie entre ces résultats et les différents mélanges.

Les tableaux présentés à l'annexe E démontrent que les coefficients de variation de toutes les valeurs sont généralement assez élevés (situés entre 8,6% et 44,8%). Sur ce point, il faut noter que pour une même dalle, le coefficient de variation des douze prismes est plus élevé pour les facteurs d'orientation supérieurs et inférieurs (α_s et α_i) que pour ceux moyens (α_{glob}). Pour α supérieur, les coefficients de variation se situent entre 21% et 39%, ceux du α inférieur se situent entre 18% et 39% tandis que ceux du α moyen se situent 15% et 28%.

Dans tous les cas, à l'exception du mélange 45-D-60, la variation de α_{glob} est inférieure à celle de α_s et α_i . Pour ce qui est de la densité des fibres sur les plans verticaux et horizontaux, un écart marqué existe entre les différents coefficients de variation. Ceux sur les plans horizontaux se situent entre 19,8% et 43,2% tandis que ceux sur les plans verticaux se situent entre 8,6% et 21,1%. Cet écart est probablement dû au fait que la surface verticale étudiée était deux fois plus grande que celle horizontale.

3.3 Isotropie

Pour débiter l'analyse des résultats, il fallait tout d'abord valider la méthode expérimentale. Pour ce faire, nous avons calculé le facteur d'orientation (α global) en utilisant deux méthodes différentes. La première est la nôtre et consiste à étudier le nombre de fibres sur les faces périphériques d'un prisme. La seconde est la méthode de Breyse et coll. (1995) et consiste à compter les fibres sur des plans perpendiculaires se croisant au centre du prisme. La figure 3.1 présente donc les résultats obtenus par les deux méthodes et on peut remarquer qu'elles coïncident assez bien, les coefficients calculés avec notre méthode étant légèrement supérieurs. On peut également remarquer que les valeurs du facteur d'orientation varient entre 0,44 et 0,63. Cela tend à confirmer que le béton renforcé de fibres est réellement anisotrope lorsqu'il est mis en place sur une faible épaisseur.

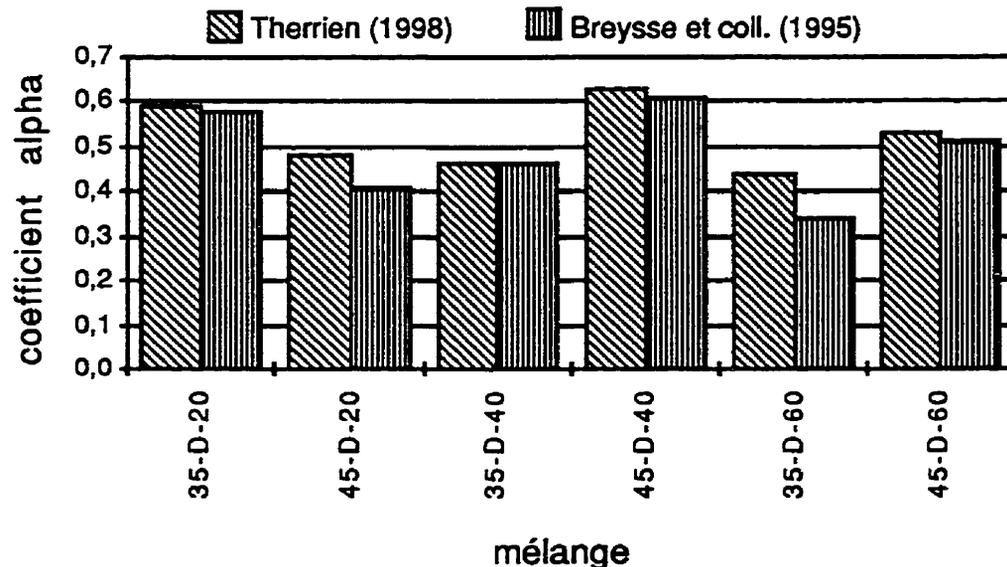


Figure 3.1: Orientation globale des fibres selon différentes méthodes

Sur la figure 3.2, on retrouve une comparaison du nombre théorique de fibres par unité de surface sur les plans verticaux pour les trois stucturations possibles avec les valeurs

expérimentales obtenues en fonction du dosages en fibres. Les valeurs théoriques ont été calculées avec l'équation 1.2 du chapitre 1 en utilisant, comme valeur α , 1,0 pour la structuration 1-D (unidirectionnelle), 0,636 ($2/\pi$) pour la structuration 2-D (en plan) et 0,5 pour la structuration 3-D (dispersion équivalente dans toutes les directions). Il ne faut toutefois pas oublier que ce coefficient n'est pas celui global (voir figure 3.1), mais bien celui transversal ou axial selon le cas (voir figure 1.9). On remarque que les valeurs expérimentales se rapprochent des valeurs théoriques correspondant à une orientation bidimensionnelle (en plan).

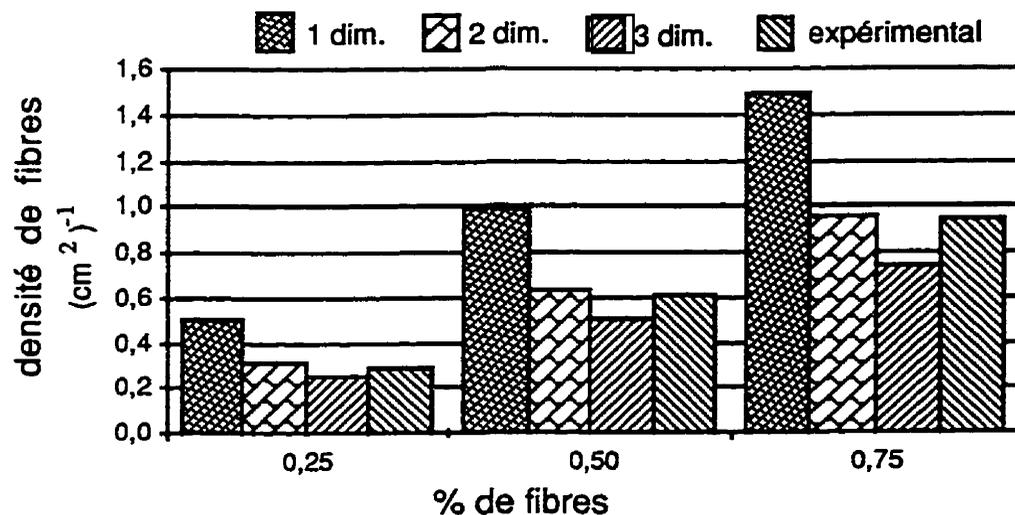


Figure 3.2: Variation du nombre de fibres par unité de surface en fonction du type de structuration

Lorsqu'on regarde le graphique de la figure 3.3, il semble qu'une structuration 2-D est favorisée par un affaissement élevé, ce qui constitue une tendance en soi. Si un affaissement très élevé (>200 mm) semble assurer une orientation en deux dimensions ($\alpha=0,50$), un affaissement plus raisonnable (70 à 100 mm) semble avoir un effet plus négligeable sur l'orientation des fibres. Pour un affaissement semblable, la durée des opérations de vibration lors de la mise en place a peut-être une influence plus significative.

La figure 3.4 présente l'orientation des fibres en fonction de la profondeur de l'éprouvette, i.e. la demi-portion inférieure ou supérieure. On remarque que le béton a tendance à être davantage structuré dans la partie inférieure de l'éprouvette (valeur de α plus faible). Cela est peut-être dû à la présence du coffrage sous l'éprouvette ou à la vibration lors de la coulée de béton. On peut également constater que la quantité de fibres ainsi que le

rapport eau-ciment n'influencent pas de manière significative les valeurs obtenues puisqu'aucune tendance nette n'est observée.

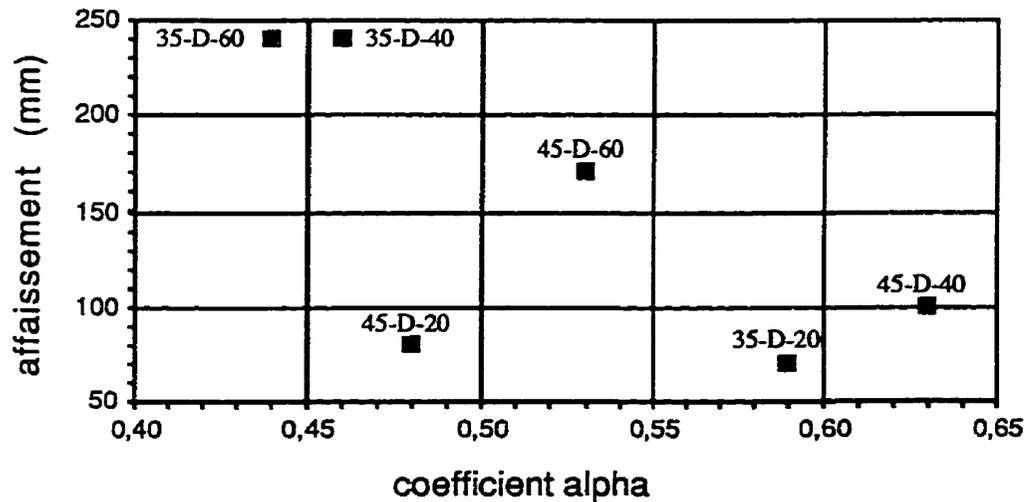


Figure 3.3: Relation entre la maniabilité des mélanges et leur anisotropie

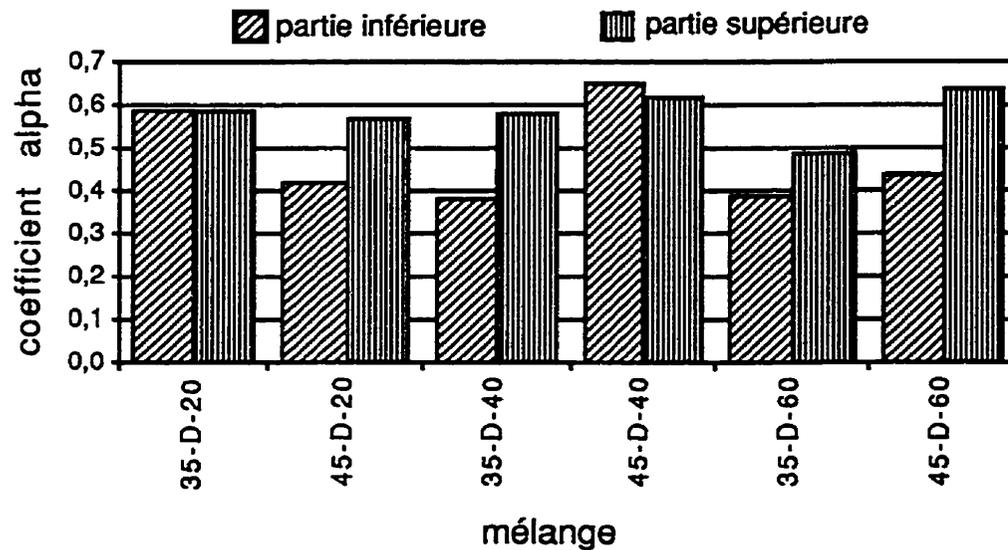


Figure 3.4: Orientation des fibres en fonction de la profondeur de l'échantillon

En résumé, le dosage en fibres et le type de matrice influencent peu le type de structuration qu'on obtient en couches minces (dallages en béton). Par contre, la mesure de l'affaissement et la durée des opérations de vibration ont un effet non négligeable sur l'orientation des fibres. Plus l'affaissement du béton à l'état frais est élevée et plus le temps de vibration est long, plus les fibres semblent s'orienter à l'horizontal. Quoi qu'il en soit, en

général, un béton renforcé de fibres mis en place en couches minces ($h \leq 2l_f$) semble posséder une structuration des fibres selon deux directions principales, soit ceux d'un plan horizontal.

3.4 Hétérogénéité

Pour caractériser l'hétérogénéité du béton renforcé de fibres, nous avons étudié la variation du nombre de fibres sur un même plan, entre des plans d'orientation différente (x - z versus y - z) ou entre plusieurs plans parallèles successifs (voir figure 3.5).

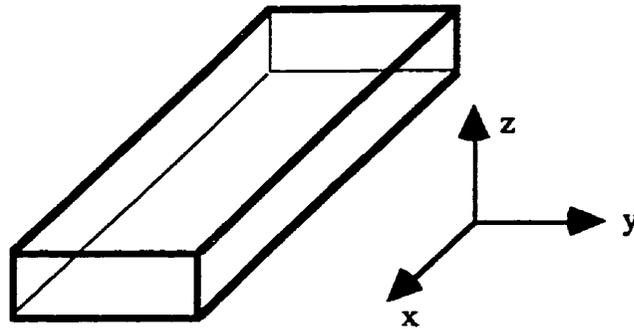


Figure 3.5: système cartésien utilisé

Tout d'abord, nous vérifions l'hétérogénéité des fibres sur les plans horizontaux grâce à la figure 3.6. On peut s'apercevoir sur cette figure qu'il existe une certaine hétérogénéité pour les fibres traversantes sur un plan horizontal (x - y), car leur nombre moyen n'est pas toujours similaire sur les plans inférieurs et supérieurs (mélanges 45-D-40 et 45-D-60). Par contre, aucune tendance générale n'est révélée d'un béton à l'autre.

Sur la figure 3.7, on compare la densité de fibres traversantes sur les plans verticaux (x - z et y - z), selon qu'on se trouve dans la demi-portion supérieure ou inférieure de la dalle. En regardant le diagramme, on s'aperçoit qu'il y a en général plus de fibres traversantes dans la partie inférieure que dans la partie supérieure des plans verticaux. Cet effet étant plus marqué pour les mélanges à 40 kg et 60 kg. Le fond du coffrage, mais surtout la vibration, sont probablement les causes de cette hétérogénéité.

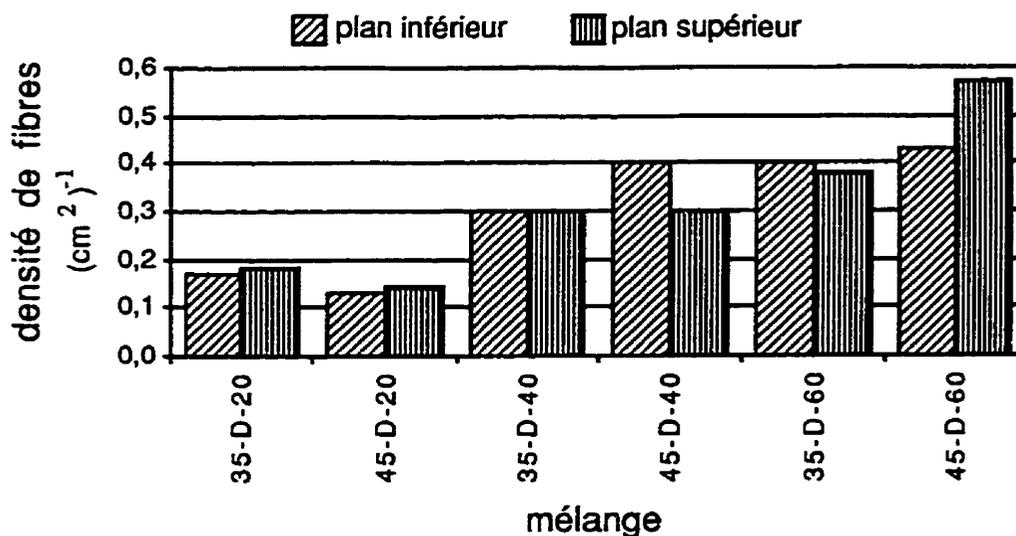


Figure 3.6: Nombre de fibres traversantes sur les plans horizontaux

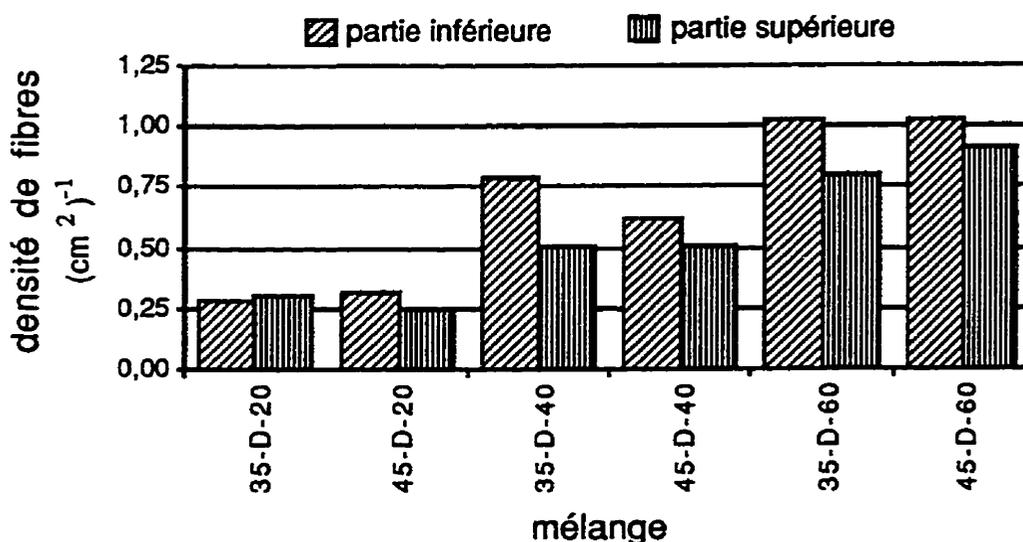


Figure 3.7: Nombre de fibres traversantes sur les plans verticaux

La figure 3.8 est plus complexe car elle compare la densité de fibres moyenne rencontrée sur les quatre plans transversaux (y-z) de la dalle originale (plans w-w, x-x, y-y et z-z de la figure 2.3 du chapitre 2) à la densité de fibres moyenne observée sur les trois plans centraux longitudinaux (x-z) de la dalle originale (plans t-t, u-u et v-v de la figure 2.3 du chapitre 2). Les valeurs obtenues pour les deux plans longitudinaux situés près des coffrages ont été négligées puisqu'elles n'étaient pas vraiment représentatives. Comme ils étaient situés à environ 45 mm d'une paroi du coffrage, celui-ci a peut-être influencé

l'orientation des fibres. La vibration du béton lors de la coulée a également pu entraîner plus de pâte que de fibres le long des parois. Le nombre total de fibres sur chacun des cinq plans longitudinaux est présenté au tableau 3.1 et on y distingue rapidement un appauvrissement sur les plans situés près des parois.

Malgré cela, on note une certaine hétérogénéité (x-z versus y-z) (voir figure 3.8), en particulier pour les mélanges à 60 kg/m^3 de fibres où les plans transversaux possèdent une densité de fibres supérieure à celle des plans longitudinaux.

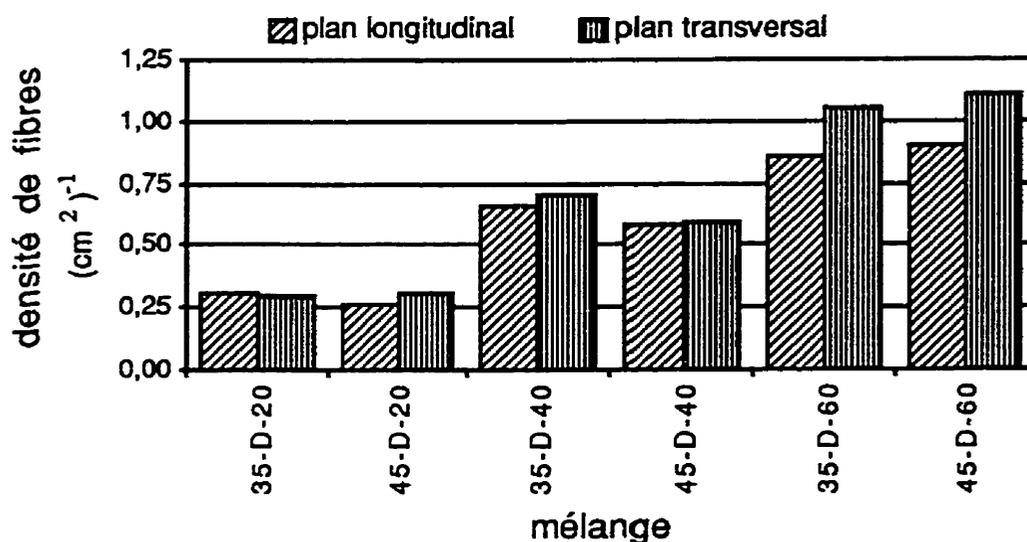


Figure 3.8: Nombre de fibres sur les plans longitudinaux et transversaux

Tableau 3.1: Variation du nombre de fibres sur les plans longitudinaux à la dalle

mélange	plan #1	plan v-v	plan u-u	plan t-t	plan #5
35-D-20	124	158	123	162	97
45-D-20	112	133	128	122	94
35-D-40	236	331	304	315	257
45-D-40	233	199	319	319	203
35-D-60	237	429	375	443	292
45-D-60	246	474	418	421	199

Sur les diagrammes des figures 3.9 à 3.20, on montre l'influence de la dimension de l'éprouvette sur le coefficient de variation du nombre de fibres mesuré sur plusieurs plans

parallèles. Les figures 3.9 à 3.14 traitent les plans longitudinaux (x-z) à la dalle tandis que les figures 3.15 à 3.20 traitent les plans transversaux (y-z).

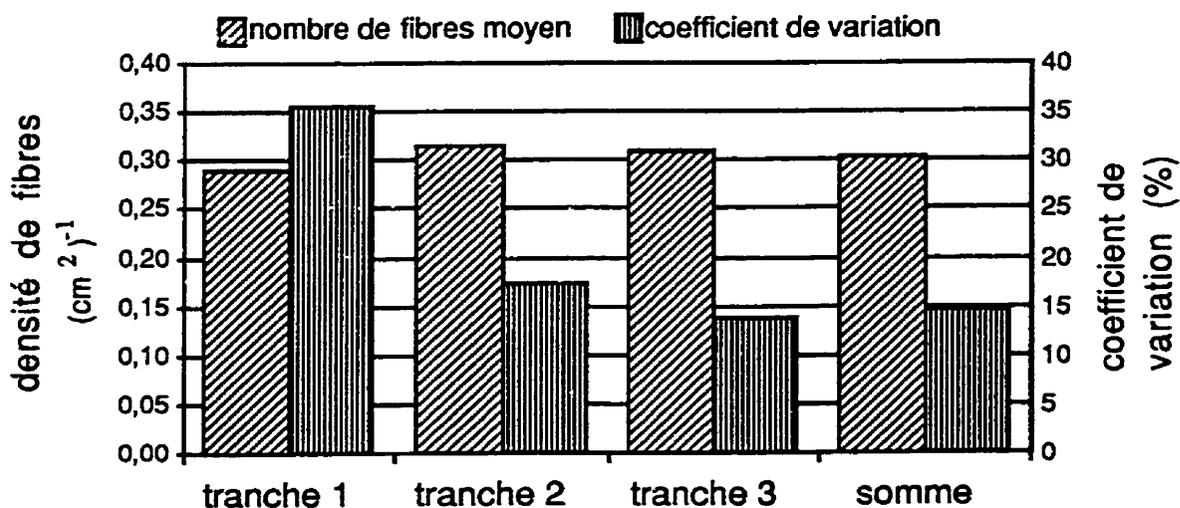


Figure 3.9: Variation du nombre de fibres sur les plans longitudinaux de la dalle 35-D-20

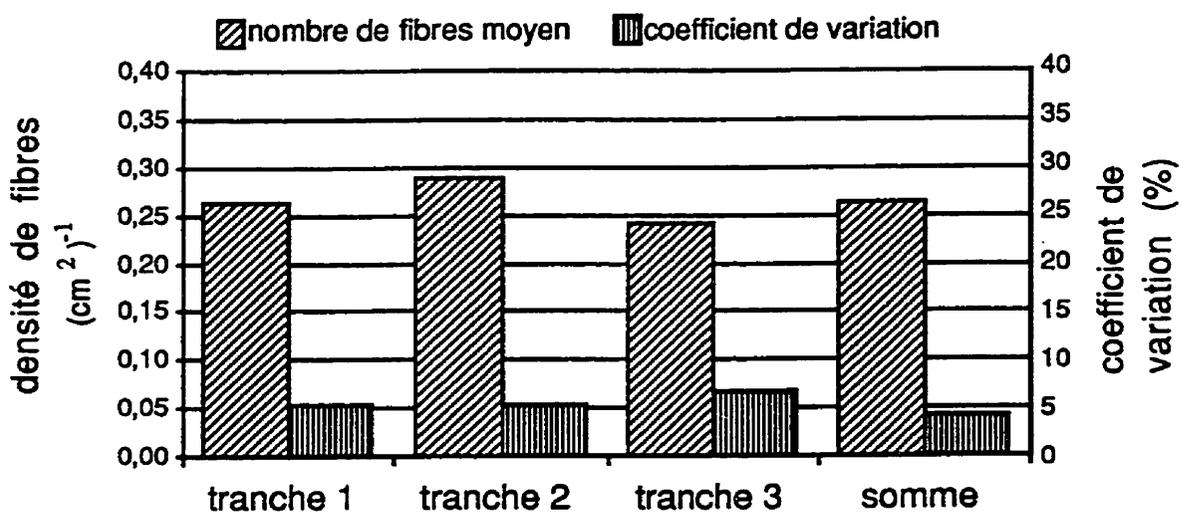


Figure 3.10: Variation du nombre de fibres sur les plans longitudinaux de la dalle 45-D-20

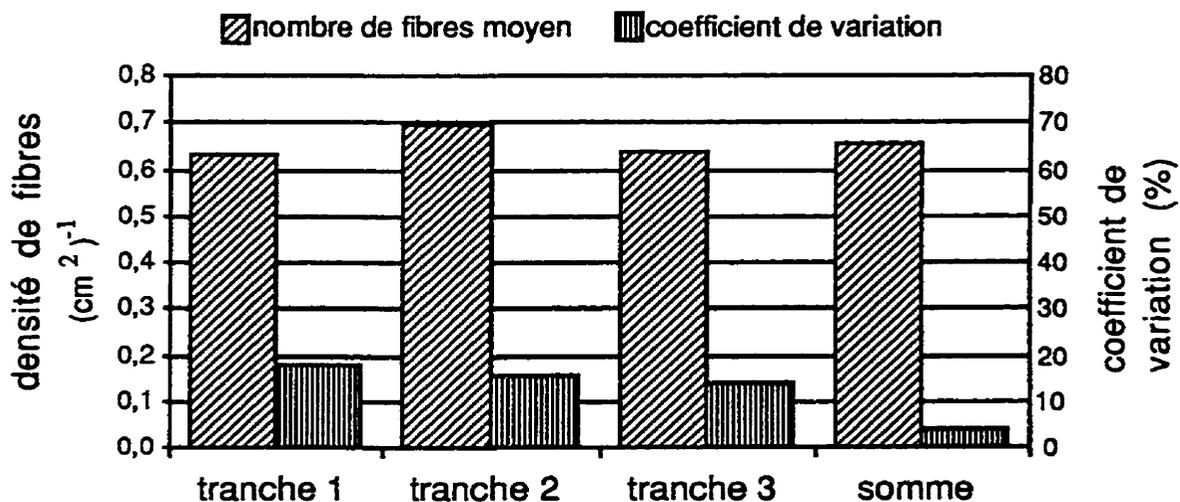


Figure 3.11: Variation du nombre de fibres sur les plans longitudinaux de la dalle 35-D-40

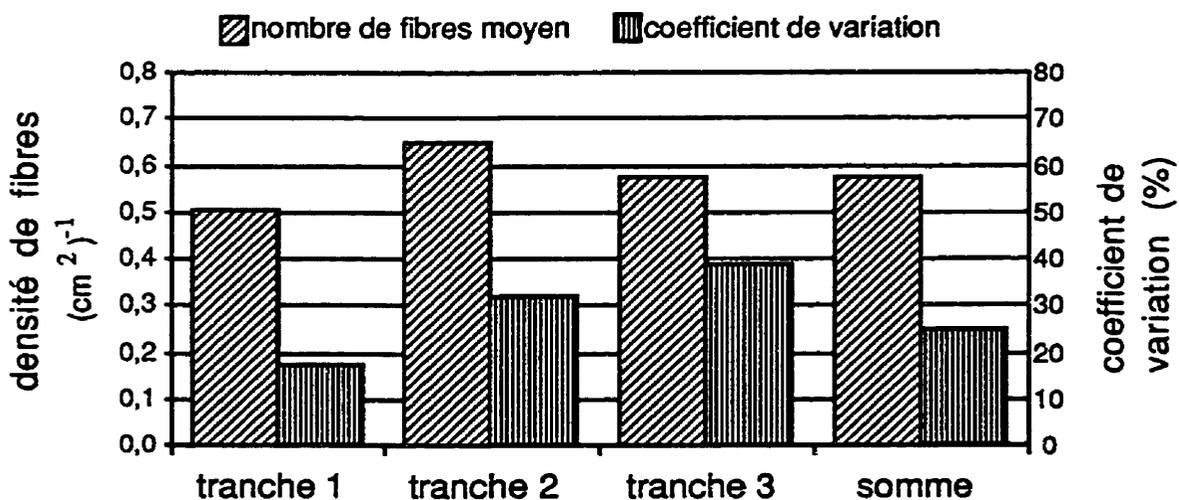


Figure 3.12: Variation du nombre de fibres sur les plans longitudinaux de la dalle 45-D-40

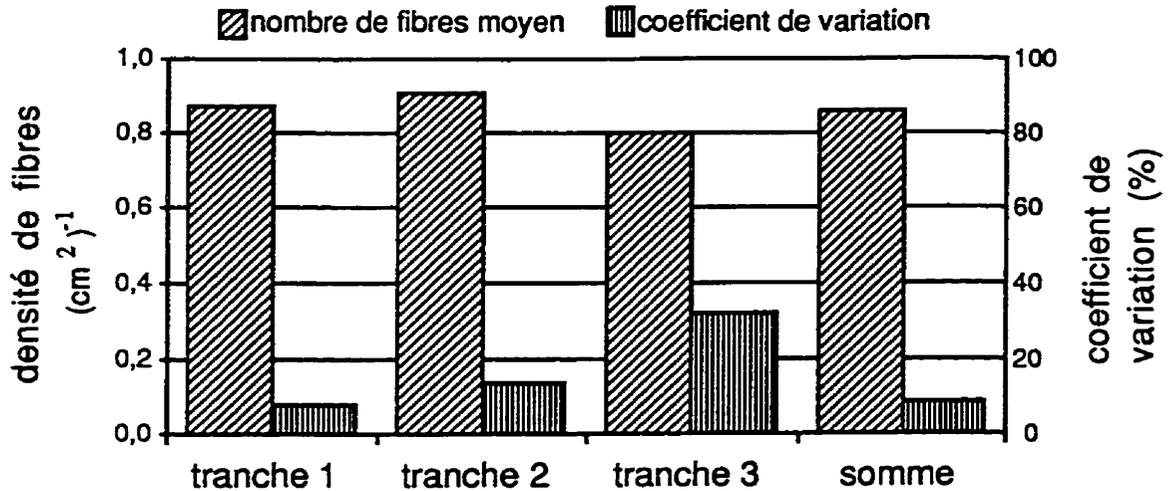


Figure 3.13: Variation du nombre de fibres sur les plans longitudinaux de la dalle 35-D-60

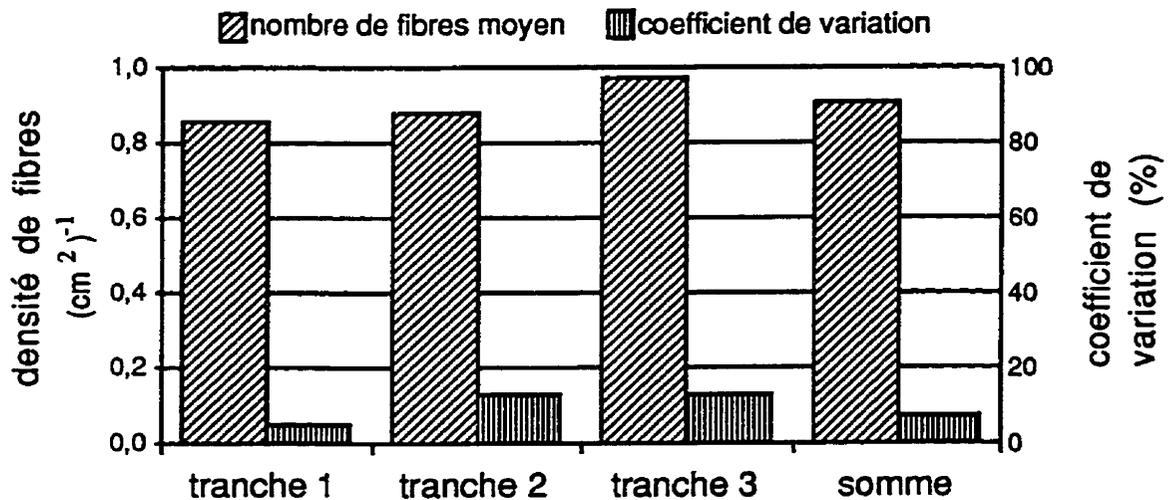


Figure 3.14: Variation du nombre de fibres sur les plans longitudinaux de la dalle 45-D-60

Pour comprendre ces figures, il faut tout d'abord expliquer que les tranches 1 à 3 représentent chacune quatre prismes, soit les prismes 1-2-3-4 pour la tranche 1, 5-6-7-8 pour la tranche 2 et 9-10-11-12 pour la tranche 3 (voir figure 2.3 du chapitre 2). La densité moyenne de fibres de chacune des tranches est comptée à partir des valeurs retrouvées sur les faces "b" et "d" des quatre prismes et le coefficient de variation est celui établi entre les plans t-t, u-u et v-v pour une seule tranche. Pour ce qui est de la "somme", il s'agit en fait de la totalité des plans t-t, u-u et v-v (largeur de trois tranches). Il s'agit de la moyenne des trois tranches pour ce qui est de la densité de fibres, mais on s'aperçoit que les coefficients de variation ne suivent pas la même règle. Il faut donc remarquer que la variation du nombre de

fibres sur les plans parallèles de petites dimensions est pratiquement toujours supérieure à la variation du nombre de fibres de la somme des petites surfaces.

Pour les figures 3.15 à 3.20 on utilise la même méthode à l'exception qu'elles présentent les plans transversaux à la dalle (plans w-w, x-x, y-y et z-z de la figure 2.3). Il y a donc quatre tranches, soit les groupes de prismes 1-5-9, 2-6-10, 3-7-11 et 4-8-12.

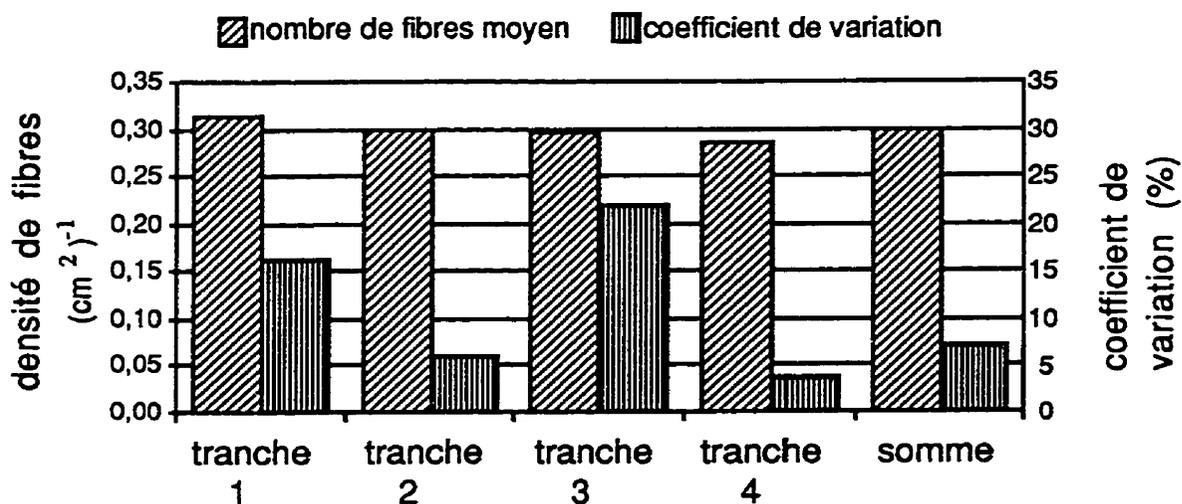


Figure 3.15: Variation du nombre de fibres sur les plans transversaux de la dalle 35-D-20

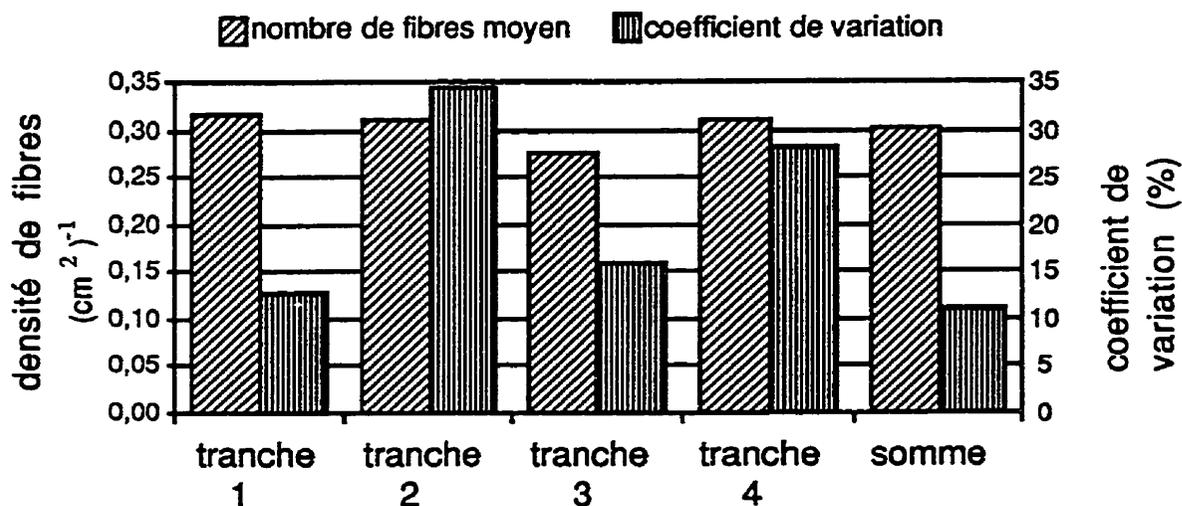


Figure 3.16: Variation du nombre de fibres sur les plans transversaux de la dalle 45-D-20

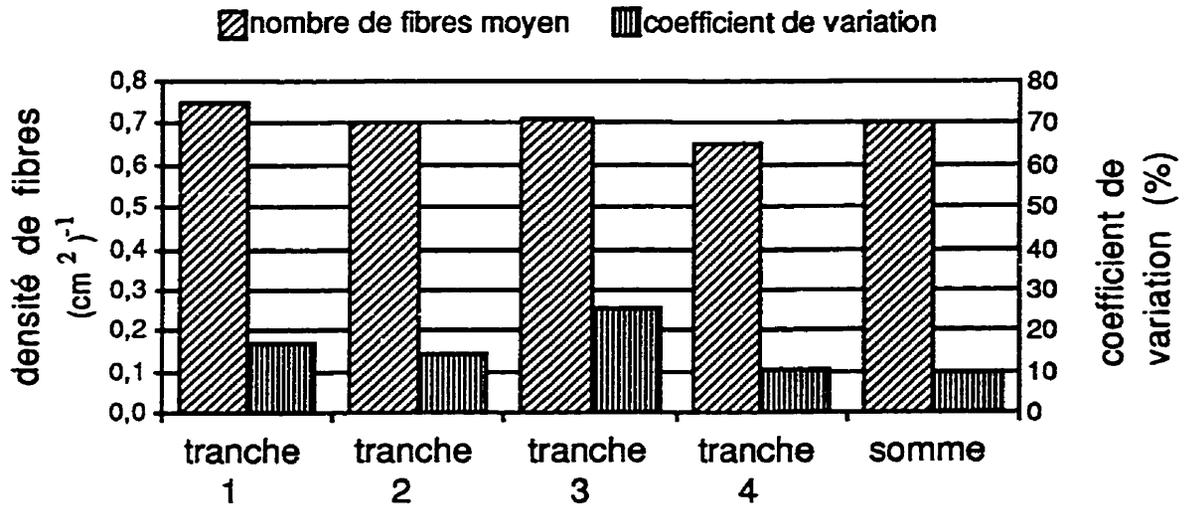


Figure 3.17: Variation du nombre de fibres sur les plans transversaux de la dalle 35-D-40

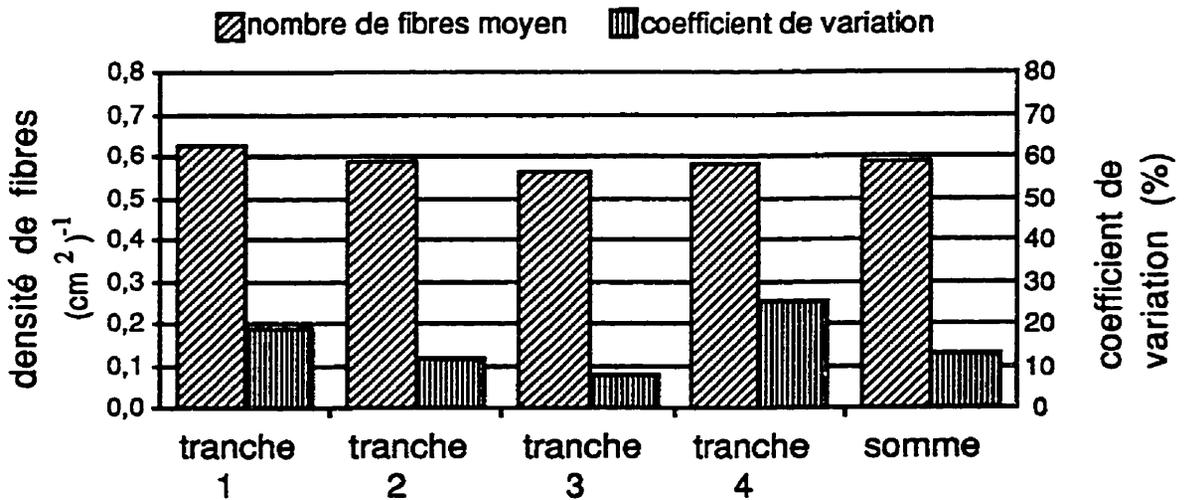


Figure 3.18: Variation du nombre de fibres sur les plans transversaux de la dalle 45-D-40

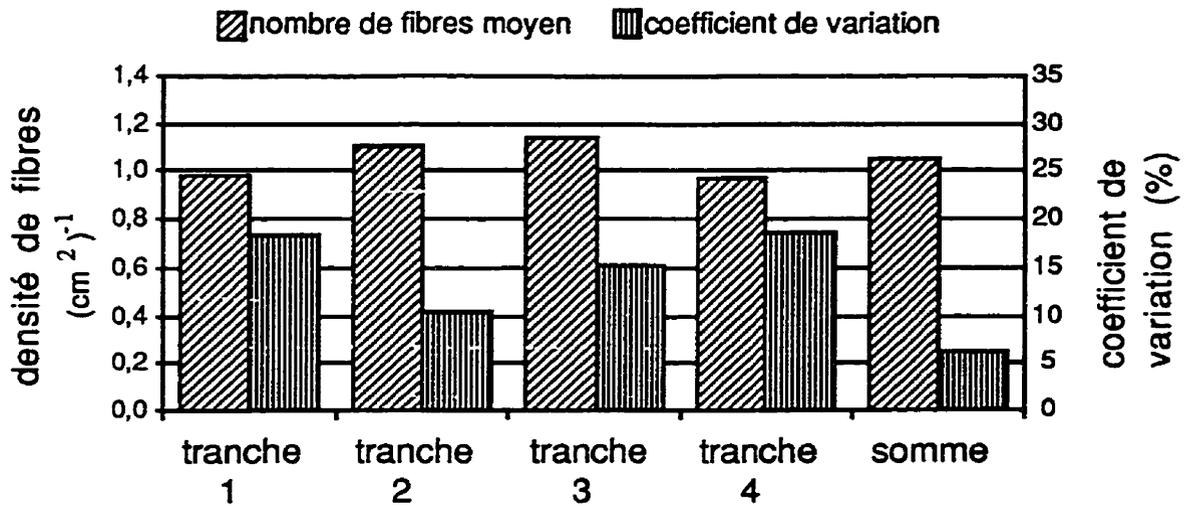


Figure 3.19: Variation du nombre de fibres sur les plans transversaux de la dalle 35-D-60

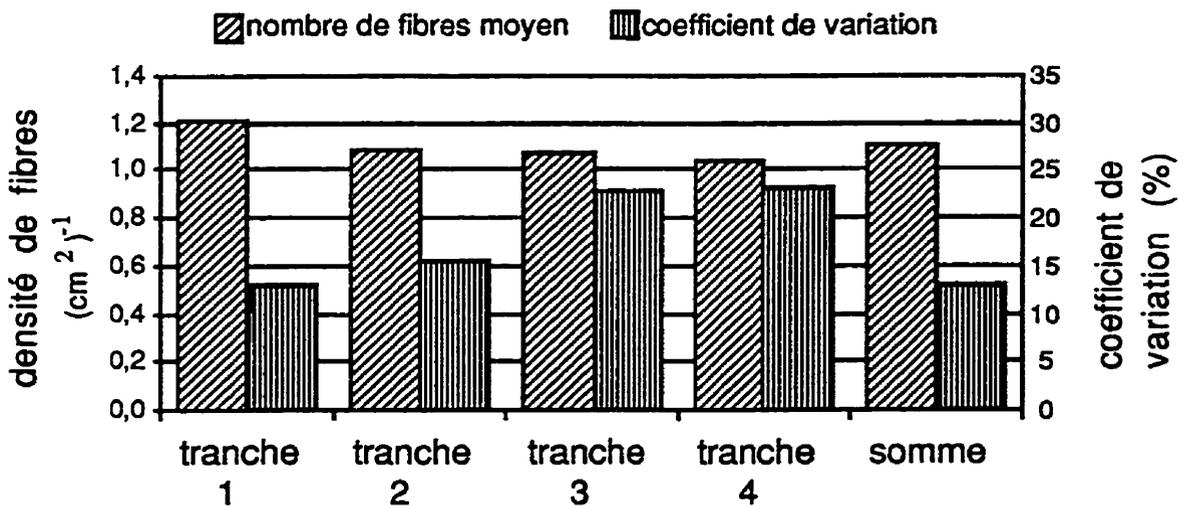


Figure 3.20: Variation du nombre de fibres sur les plans transversaux de la dalle 45-D-60

On remarque sur ces dernières figures que le même phénomène survient, c'est-à-dire que la somme des quatre petites surfaces possède un coefficient de variation pratiquement toujours inférieur à celui de chacune des tranches prise individuellement.

De ce fait, il devient évident que l'utilisation de grandes éprouvettes entraîne moins de variabilité dans les résultats que les petites éprouvettes puisque ses plans parallèles se ressemblent beaucoup plus du point de vue du nombre total de fibres.

En résumé, les résultats tendent à démontrer que le dosage en fibres influence légèrement le degré d'hétérogénéité de la distribution des fibres à l'intérieur d'un dallage de béton. En effet, les bétons dosés à 20 kg/m^3 affichent des coefficients de variation plus importants que les deux autres et les bétons dosés à 40 kg/m^3 ont des coefficients de variation un peu plus élevés que les bétons dosés à 60 kg/m^3 .

En général, la distribution des fibres d'un BRFA demeure toujours hétérogène, mais l'utilisation de corps d'épreuve de grande taille semble atténuer ce problème d'hétérogénéité qui cause parfois de grandes variations dans les résultats d'une étude effectuée avec de petites éprouvettes. En effet, l'hétérogénéité prise localement sur de petites surfaces est très grande comparée à l'hétérogénéité prises sur de grandes surfaces.

Donc, si on croit que le nombre de fibres effectif est important et que celui-ci gouverne en partie le comportement du matériau, l'utilisation d'éprouvette de grande taille est conseillé pour diminuer la variation des résultats et faciliter l'analyse de ceux-ci.

CHAPITRE 4

MULTIFISSURATION: RÉSULTATS ET ANALYSE

4.1 Introduction

Suite à la première partie de l'étude qui consistait à évaluer le degré de structuration des fibres à l'intérieur d'un dallage de béton, nous avons procédé à l'étude de la multifissuration. Pour cette seconde partie, dans un premier temps, nous avons observé le potentiel de multifissuration pour différents dosages en fibres et, suite à ces résultats, nous avons fixé le dosage en fibres pour la seconde série d'essais de manière à observer le potentiel de multifissuration de différents types de fibres et différents types de matrices.

4.2 Essais de compression et de module élastique

Le tableau 4.1 présente les résultats moyens et les coefficients de variation des essais de compression effectués après 3 jours et 28 jours de mûrissement, de même que les modules élastiques mesurés à 28 jours. Chacune des résistances en compression indiquées est en fait la moyenne des valeurs obtenues pour trois éprouvettes. La détermination de la résistance en compression et du module élastique des mélanges de béton était nécessaire pour caractériser les mélanges étudiés.

Tout d'abord, nous nous sommes aperçus que la résistance à la compression à trois jours des mélanges de rapport eau/ciment de 0,40 étaient très élevées (≈ 40 MPa) malgré l'utilisation d'un ciment ordinaire de type 10. Le fait de ne pas avoir d'air entraîné (2 à 3% d'air) a donc permis d'obtenir des résistances supérieures à celle d'un béton à air entraîné.

Tableau 4.1: Résistance à la compression

mélange (#)	rés. comp. à 3 jours (MPa)	coefficient de variation (%)	rés. comp. à 28 jours (MPa)	coefficient de variation (%)	mod. élas. à 28 jours (GPa)
40-X-X	38,5	0,1	49,9	0,8	29,1
40-T-40	40,7	1,7	52,3*	0,1*	29,8**
40-T-60	38,2	1,5	49,9	0,8	27,8
40-T-100	39,6	2,1	50,8	1,2	30,2
40-D-100	40,9	0,2	52,3	0,7	27,5
60-T-100	25,5	1,5	37,4	1,9	23,8
80-D-100	12,2	7,7	22,4	0,9	18,8

*Essai sur deux cylindres seulement.

**Essai sur un cylindre seulement.

Pour ce qui est des mélanges de rapport eau/ciment de 0,60 et 0,80, le même phénomène s'est produit, car les résultats de 25 MPa et 12 MPa respectivement sont relativement élevés. Ces résultats nous permettent de caractériser le béton au tout début de la période de séchage, c'est-à-dire au début des essais de retrait libre et de retrait restreint. Déjà, pour la première série, nous savions que les mélanges de béton avaient une résistance en traction supérieure à 3 MPa ($f_t \approx 0,1f_c$) et qu'il faudrait une grande valeur de retrait libre pour amener à la rupture les corps d'épreuve soumis au retrait restreint. Les résistances de 40 MPa sont très élevées, mais influencent peu le retrait libre et la déformation ultime en traction, par contre, elles ont une influence importante sur le fluage en traction. Sur ce point les mélanges 60-T-100 et 80-D-100 étaient plus susceptibles de subir du fluage en raison de leur faible résistance.

Pour ce qui est des résultats à 28 jours, nous avons obtenu des valeurs de l'ordre de 50 MPa pour les bétons de rapport eau/ciment de 0,40, soit une faible augmentation de 25% par rapport à la résistance mesurée à 3 jours. La résistance du mélange 60-T-100 est passée de 25 MPa à 37 MPa, soit une augmentation de la résistance de 50 % et la résistance du mélange 80-D-100 a augmenté de presque 100 %, passant de 12 MPa à 22 MPa. Cette différence d'augmentation est explicable par le fait que pour les mélanges de rapport eau/ciment élevé, le squelette formé par les gels de C-S-H met plus de temps à se construire en raison de l'écartement des grains de ciment dans le système [Neville 1981].

Lorsqu'on compare les résistances en compression avec les modules élastique à 28 jours, on constate que la rigidité augmente avec la résistance. En se basant sur l'équation de puissance classique suggérée dans la norme A23.3 et en effectuant une régression, on obtient la relation suivante:

$$E_{28d} = 4020(f'_c)^{0,5} \quad (4.1)$$

Pour tous ces essais, les coefficients de variation sont toujours demeurés très faibles, soit de l'ordre de 1,5%, reflétant la bonne exécution des essais et l'homogénéité des matériaux.

4.3 Essais de flexion

Le tableau 4.2 montre les résultats obtenus lors des essais de flexion à 28 jours sur les poutres sciées. Pour chacun des mélanges, en plus du module de rupture, de la charge de fissuration et de la charge maximale, on y présente la quantité de fibres recensées dans la partie inférieure et sur la section entière de la poutre au plan de rupture. Les moyennes ainsi que les coefficients de variation pour les trois poutres de chacun des mélanges sont également présentés.

Pour compléter la présentation des résultats des essais de flexion, les figures 4.1 à 4.8 regroupent les trois courbes charge-déflexion pour chacun des mélanges.

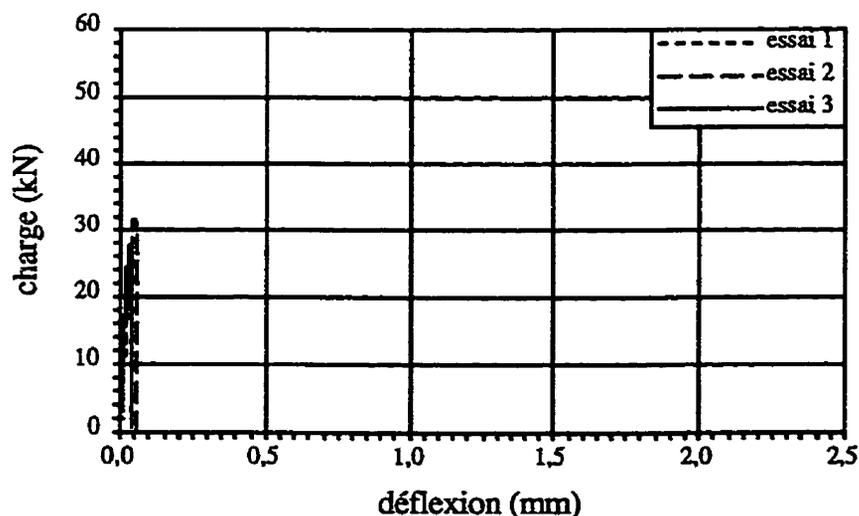


Figure 4.1: Essai de flexion du mélange 40-X-X

Tableau 4.2: Résistance à la flexion

Mélange (#)	Poutre (#)	Module de rupture (MPa)	Charge de fissuration (kN)	Charge maximale (kN)	nombre de fibres sous l'axe neutre	nombre de fibres total
40-X-X	1	4,77	25,20	25,20	-	-
	2	5,74	31,41	31,41	-	-
	3	5,29	28,89	28,89	-	-
	moyenne	5,3	28,5	28,5	-	-
	c. var. (%)	7,5	8,9	8,9	-	-
40-T-40	1	5,10	29,40	29,40	11	27
	2	4,72	28,76	42,26	32	45
	3	5,06	27,23	27,30	19	31
	moyenne	5,0	28,5	33,0	21	34
	c. var. (%)	3,4	3,9	20,0	41,9	22,5
40-T-60	1	6,40	35,75	42,16	34	65
	2	5,96	33,61	34,89	22	34
	3	5,94	33,10	38,46	18	36
	moyenne	6,1	34,2	38,5	25	45
	c. var. (%)	3,5	4,1	7,7	27,6	31,5
40-T-100	1	6,33	34,84	52,47	34	89
	2	5,79	31,81	49,25	28	88
	3	6,01	32,35	58,65	40	88
	moyenne	6,0	33,0	53,5	34	88
	c. var. (%)	3,7	4,9	7,3	14,4	0,5
40-D-100	1	5,51	29,42	41,46	46	86
	2	4,87	26,54	36,58	52	85
	3	5,05	27,59	45,72	52	102
	moyenne	5,1	27,9	41,3	50	91
	c. var. (%)	5,2	5,2	9,1	5,7	8,6
60-T-100	1	4,82	25,20	43,37	46	83
	2	4,75	24,66	29,56	35	80
	3	5,12	26,52	44,78	54	105
	moyenne	4,9	25,5	39,2	45	89
	c. var. (%)	3,3	3,8	17,5	17,3	12,5

Tableau 3.8: Résistance à la flexion (suite)

Mélange (#)	Poutre (#)	Module de rupture (MPa)	Charge de fissuration (kN)	Charge maximale (kN)	nombre de fibres sous l'axe neutre	nombre de fibres total
80-D-100 (3 jours)	1	3,06	15,68	21,24	65	160
	2	3,04	15,82	19,02	81	129
	3	3,10	16,10	21,43	60	148
	moyenne c. var. (%)	3,1 0,8	15,9 1,3	20,6 5,3	69 13,0	146 8,8
80-D-100 (28 jours)	1	3,87	19,89	33,20	79	133
	2	3,39	17,39	22,49	58	114
	3	4,32	22,26	30,78	55	120
	moyenne c. var. (%)	3,9 9,8	19,8 12,3	28,8 15,9	64 16,7	122 6,5

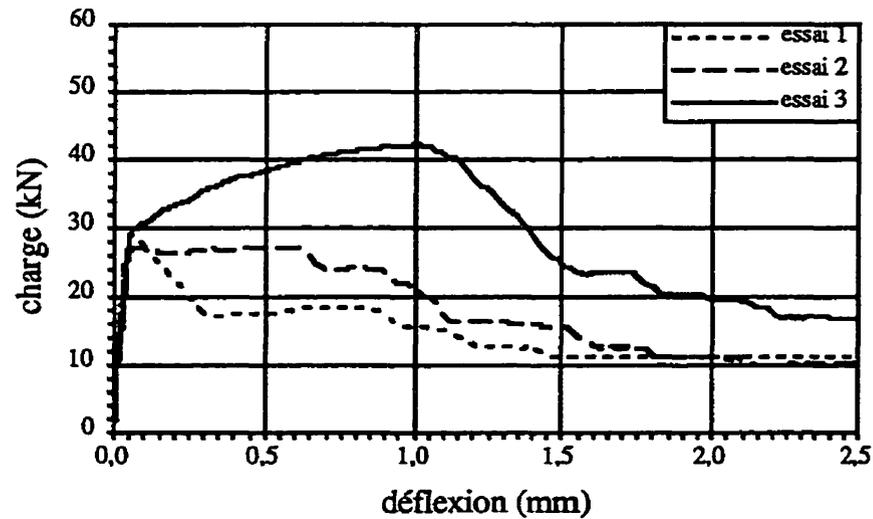


Figure 4.2: Essai de flexion du mélange 40-T-40

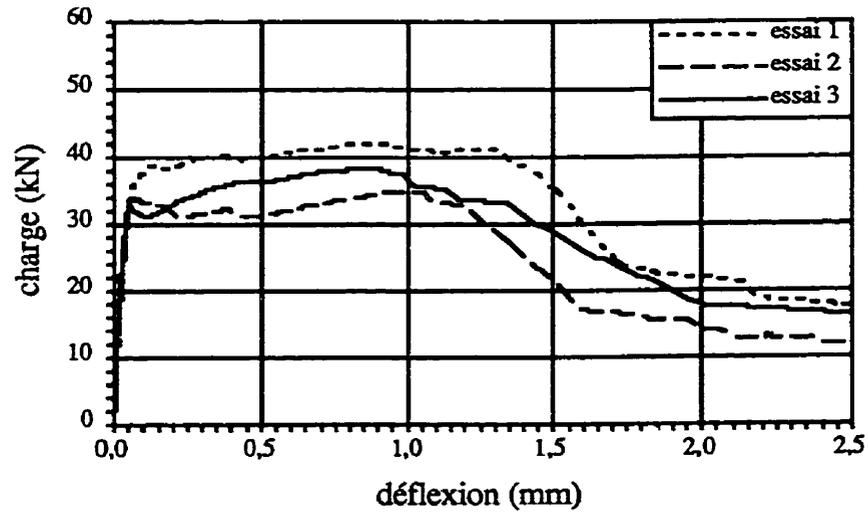


Figure 4.3: Essai de flexion du mélange 40-T-60

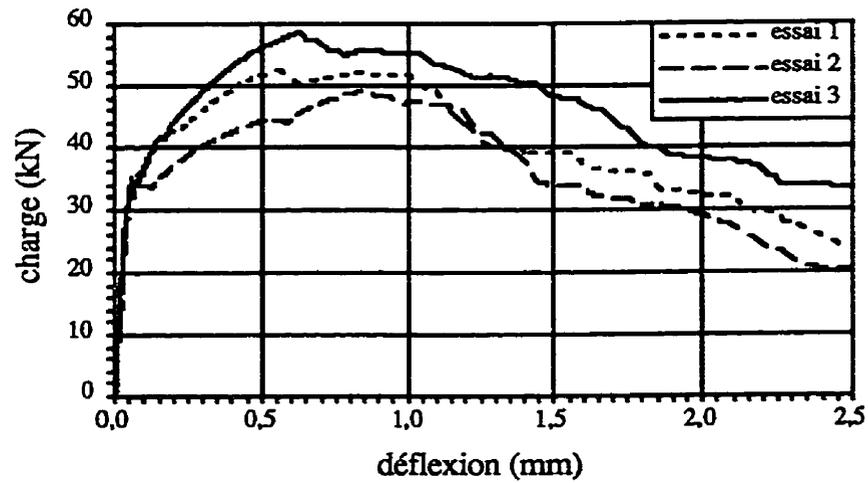


Figure 4.4: Essai de flexion du mélange 40-T-100

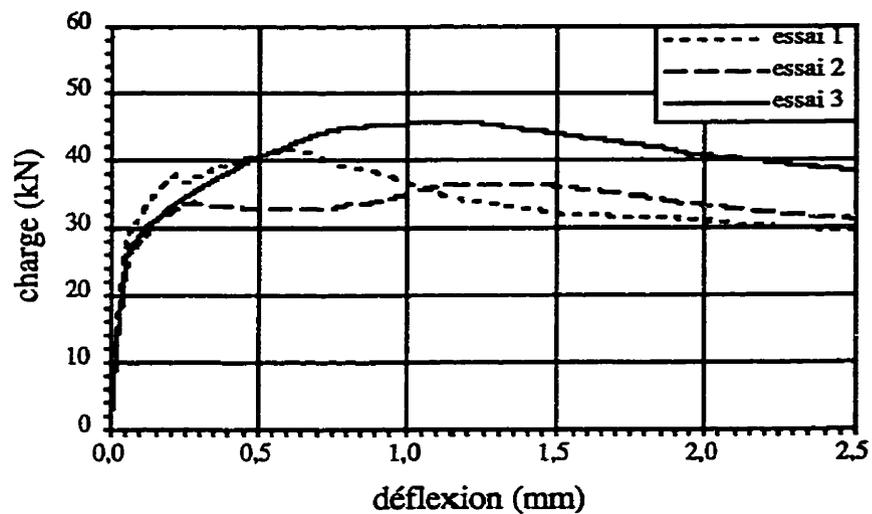


Figure 4.5: Essai de flexion du mélange 40-D-100

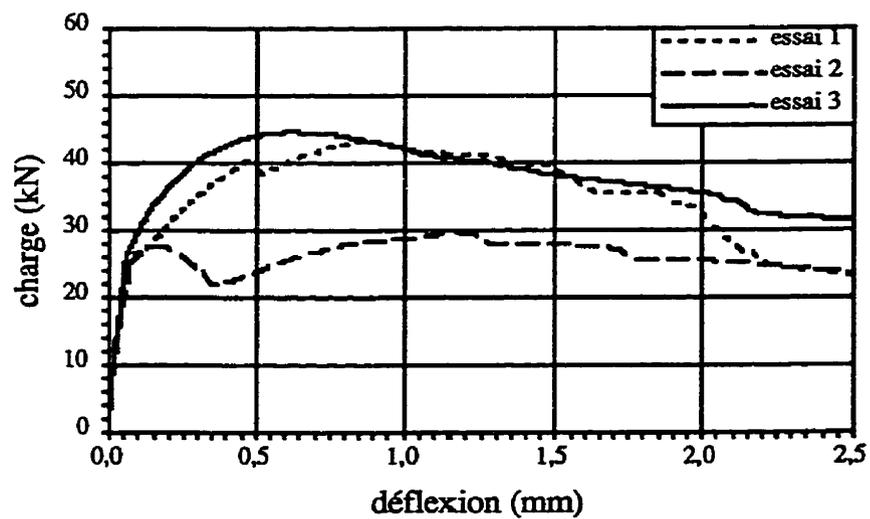


Figure 4.6: Essai de flexion du mélange 60-T-100

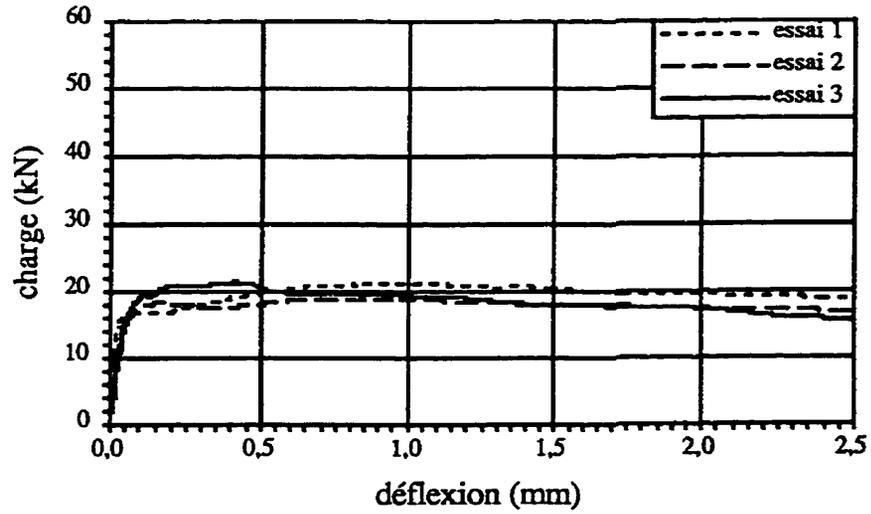


Figure 4.7: Essai de flexion du mélange 80-D-100 à 3 jours

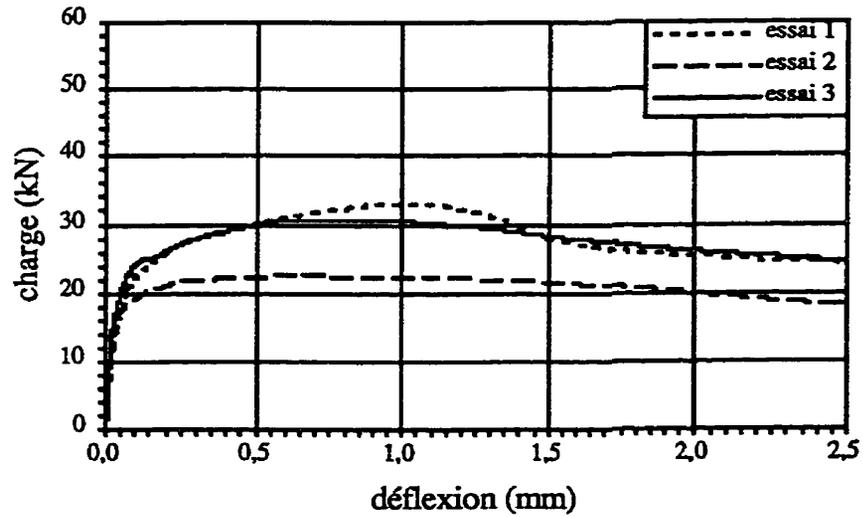


Figure 4.8: Essai de flexion du mélange 80-D-100 à 28 jours

Pour évaluer la résistance en traction du béton, l'essai de flexion 4-points est couramment utilisé car il est simple à exécuter. De ces essais, nous avons pu recueillir plusieurs données, soit le module de rupture, la charge de fissuration, la charge maximale, le nombre de fibres présentes à la section de rupture et, enfin, la relation charge-déflexion pour chacune des poutres.

Le module de rupture est une surestimation de la résistance en traction du béton car la zone sollicitée en traction maximale est très petite (fibre inférieure de la poutre). Le module de rupture (voir tableau 4.2 et figure 4.9) varie entre 5 et 6 MPa pour les mélanges de rapport eau/ciment de 0,40, et atteint près de 5 MPa pour le mélange 60-T-100 et 4 MPa pour le mélange 80-D-100. Si pour le mélange témoin et les mélanges avec 40 kg et 60 kg de fibres, il est simple de déterminer la charge de rupture et ainsi calculer le module de rupture, il en est tout autrement pour les mélanges plus fortement dosés en fibres. Les courbes charge-déflexion de ces mélanges ne montrent pas de chute de résistance après la rupture de la matrice et la détermination précise de la charge pour laquelle la matrice a cédé est un exercice subjectif. Nous avons obtenu des modules de rupture supérieurs, soit 6 MPa, pour les mélanges à 60 kg et 100 kg de fibres Twincone, la cause est peut-être une surestimation de la charge de rupture ou tout simplement que les macrofibres ont un certain effet sur la résistance en traction tout comme les microfibres, mais avec une efficacité moindre. La présence des ancrages aux extrémités des fibres empêche le glissement des fibres, ce qui aurait pour conséquence de retarder l'apparition de la première fissure. De son côté, la fibre Dramix ne semble pas du tout améliorer la résistance en traction de la matrice, comme on peut le constater en comparant les mélanges 40-D-100 et 40-X-X.

Si la variation des modules de rupture était faible entre les trois poutres de chaque mélange, il en va tout autrement pour la charge maximale, très variable d'une poutre à l'autre. Cette variabilité est probablement attribuable en partie à une légère variation des dimensions des poutres (prise en compte dans le module de rupture), car elles étaient sciées, mais surtout à la grande variation du nombre, de l'orientation et de la longueur d'ancrages des fibres dans les sections de rupture.

Systématiquement, plus il y a de fibres dans la section de rupture et plus la charge maximale atteinte lors de l'essai est élevée (voir tableau 4.2 et figure 4.10). Par exemple, pour le mélange 40-T-100, la poutre ayant 28 fibres dans la partie inférieure a atteint 49 kN, celle en ayant 34 a atteint 52 kN et la dernière qui possédait 40 fibres sous son axe neutre a culminé à 58 kN, soit presque le double de la charge où la matrice a fissuré. Si on regarde la

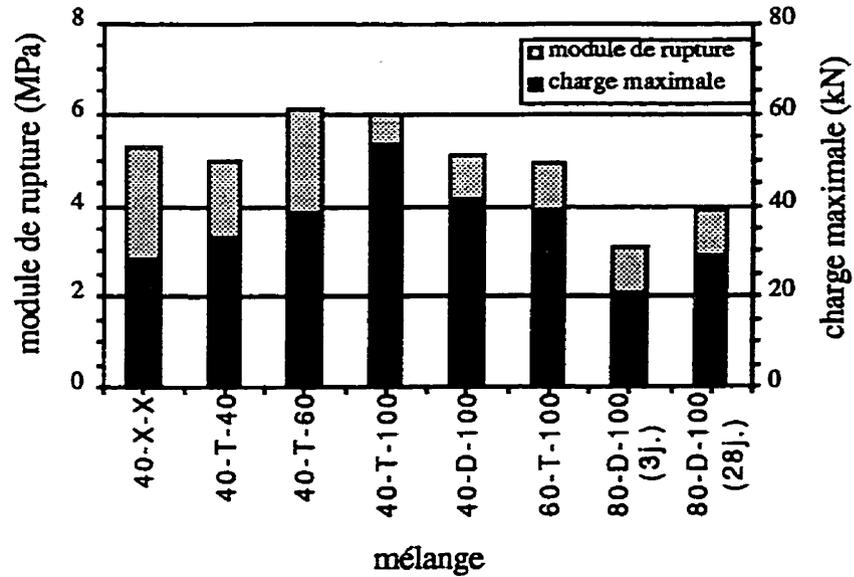


Figure 4.9: module de rupture moyen et charge maximale moyenne pour les différents mélanges

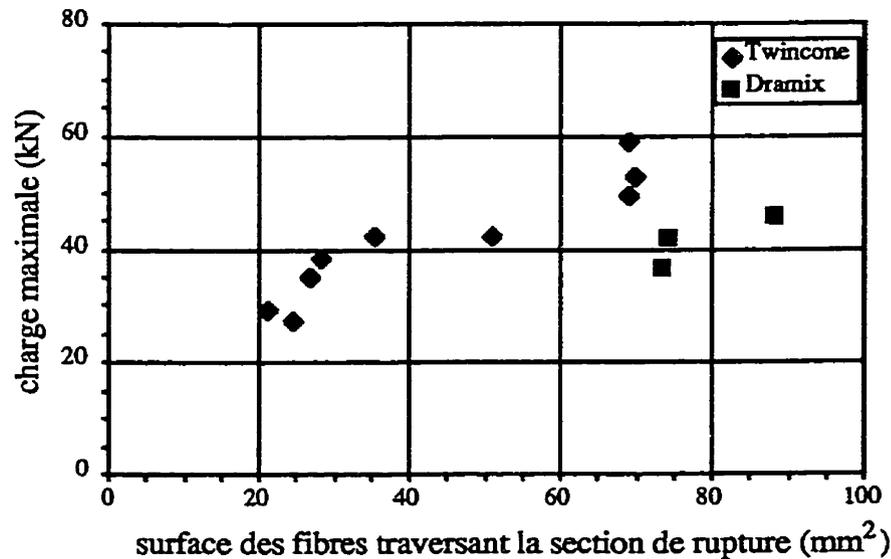


Figure 4.10: Effet des différents types de fibres sur la résistance ultime en flexion pour des mélanges de rapport eau/ciment de 0,40

valeur moyenne de ces charges maximales, il est évident que plus il y a de fibres Twincone dans les mélanges à 0,40 de rapport eau/ciment, plus la charge maximale moyenne est élevée. Par ailleurs, les 100 kg de fibres Dramix du mélange 40-D-100 n'ont pas la même efficacité que les 100 kg de fibres Twincone (41,2 kN vs 53,4 kN). Les résultats obtenus tendent à indiquer que, comparativement aux fibres Dramix, les fibres Twincone permettent

une reprise des efforts plus importante après l'initiation de la fissuration. La géométrie de ces dernières favorisent un meilleur ancrage et, incidemment, on a observé pour les fibres de ce type un nombre non négligeable (environ 20%) de fibres rompues sur les faciès de rupture des éprouvettes.

Pour compléter les résultats du tableau 4.2, les courbes charge-déplacement en flexion des trois éprouvettes de chacun des mélanges sont portées en graphique sur les figures 4.1 à 4.8. Alors que le béton témoin (40-X-X) atteint la rupture peu après l'atteinte de la charge de fissuration, tous les mélanges renforcés présentent une pseudo-ductilité significative. Les résultats de flexion des mélanges dosés à 60 kg/m^3 et 100 kg/m^3 , qui affichent un accroissement ou un maintien de la capacité significatif après la fissuration, pourraient laisser présager un comportement multifissurant. Or, sur la plupart des éprouvettes, une seule fissure est apparue avant la rupture et, dans quelques cas, deux fissures sont apparues au droit des points d'application de la charge. En aucun cas, n'avons-nous observé une seconde fissure lorsque la première s'est produite au centre de la poutre et jamais plus de deux fissures ne sont apparues sur les poutres de 375 mm de portée.

Toujours sur les figures 4.1 à 4.8, il est intéressant de remarquer que, bien que leur utilisation n'entraîne pas un accroissement de la charge ultime aussi important que ce qu'on obtient avec les fibres Twincone, les fibres Dramix permettent cependant de maintenir la capacité post-pic de la poutre sans réduction sensible pour des flèches plus élevées. Cela est vraisemblablement lié, encore une fois, à la géométrie et aux mécanismes d'arrachement des fibres.

Ces résultats ne permettent pas d'affirmer si ces bétons sont vraiment multifissurants, car l'essai de flexion n'est pas nécessairement représentatif, bien qu'on observe dans certain cas une augmentation de presque 100 % de la charge de première fissuration pour atteindre la charge maximale. Il faut mentionner que nous ne recherchons pas la multifissuration du béton provoquée par un effet de structure, mais bien la multifissuration du béton à titre de propriété intrinsèque du matériau. Ce sont donc l'essai de retrait restreint et l'essai de traction directe sur les corps d'épreuve de grande taille qui apporteront la réponse attendue.

4.4 Essais de retrait libre

Les essais de retrait libre ont été conduits avec des éprouvettes de grande dimension sur lesquelles la déformation était mesurée en 14 points à chacune des échéances prédéterminées. Les figures 4.11 à 4.17 retracent donc l'évolution de la mesure moyenne du retrait libre pour chacun des mélanges étudiés à partir de la fin de la période de mûrissement (3 jours).

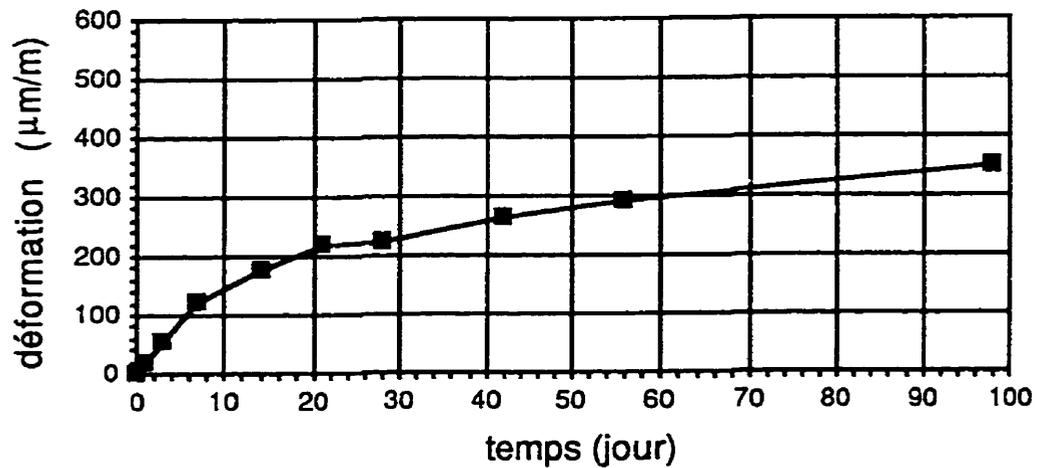


Figure 4.11: Évolution du retrait libre pour le mélange 40-X-X

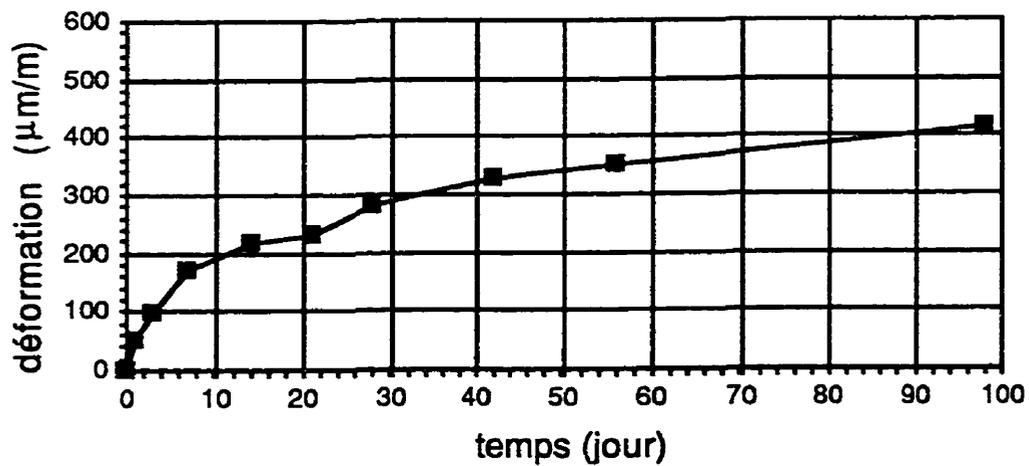


Figure 4.12: Évolution du retrait libre pour le mélange 40-T-40

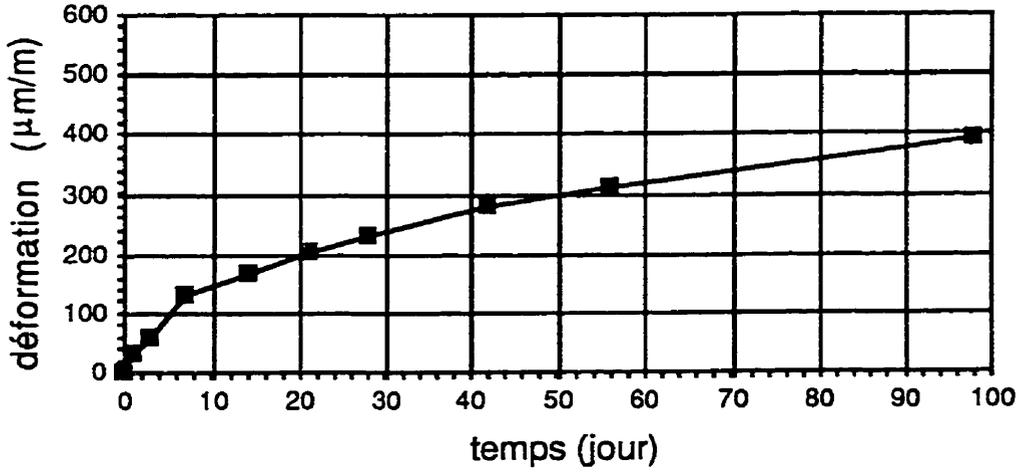


Figure 4.13: Évolution du retrait libre pour le mélange 40-T-60

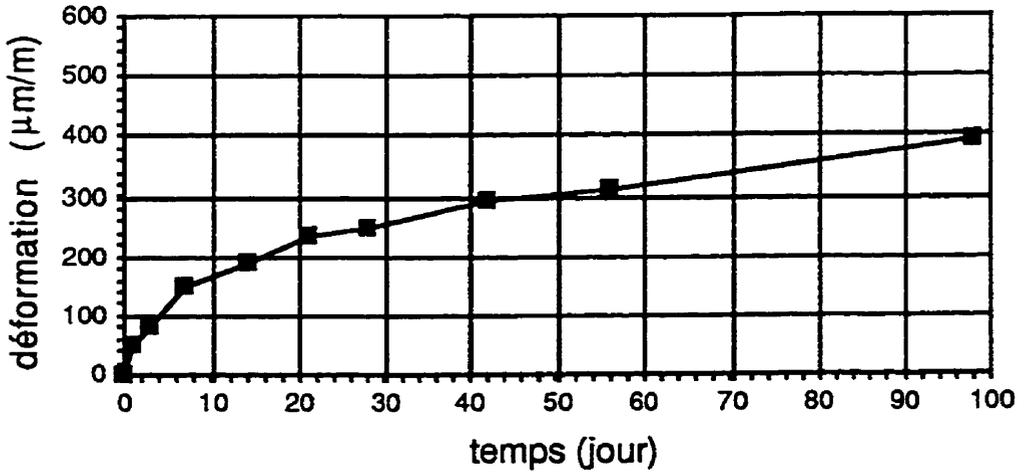


Figure 4.14: Évolution du retrait libre pour le mélange 40-T-100

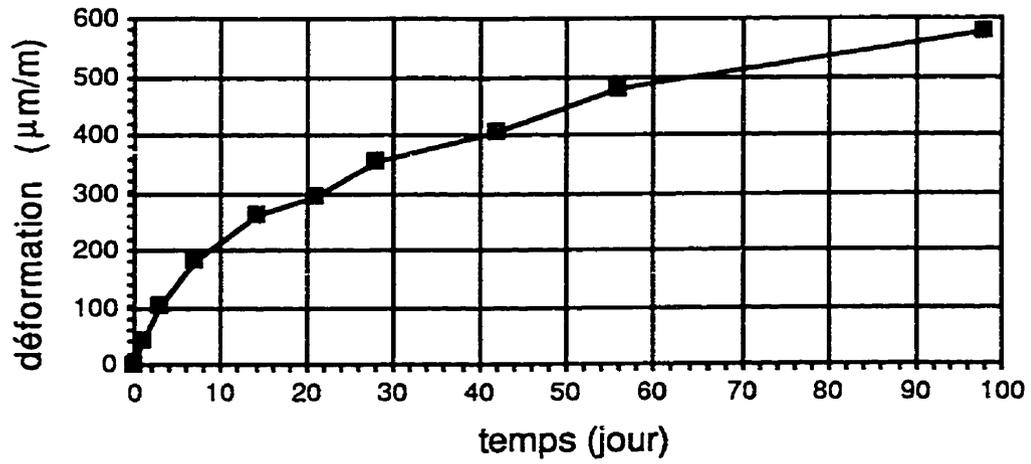


Figure 4.15: Évolution du retrait libre pour le mélange 40-D-100

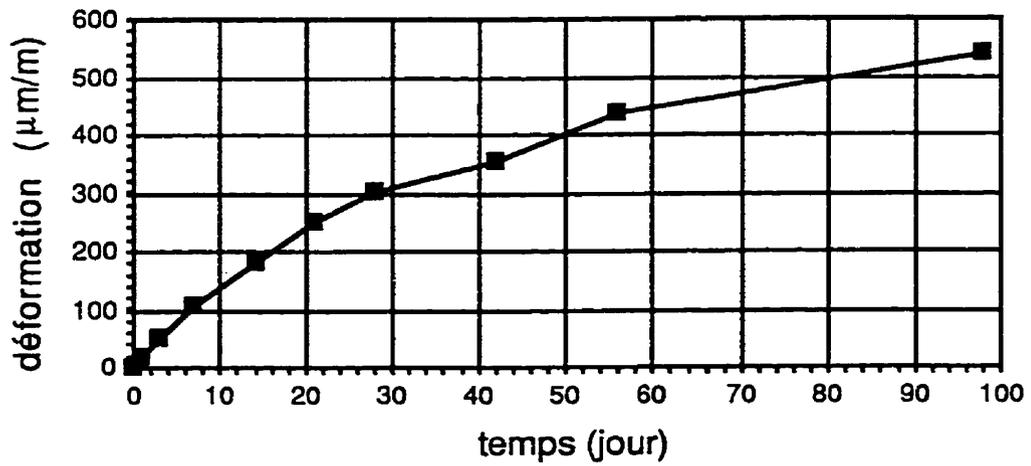


Figure 4.16: Évolution du retrait libre pour le mélange 60-T-100

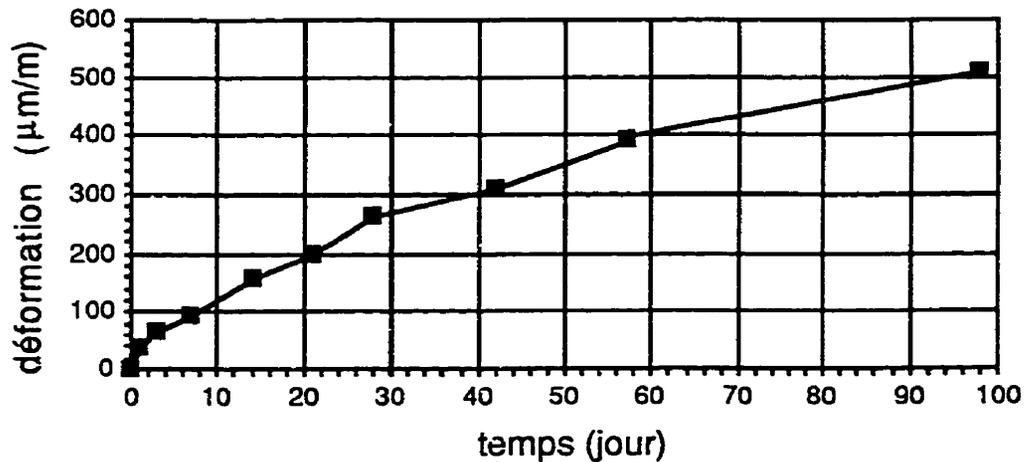


Figure 4.17: Évolution du retrait libre pour le mélange 80-D-100

Les essais de retrait libre que nous avons conduits au cours de ce projet n'étaient pas des essais normalisés, car nous voulions reproduire des conditions (rapport surface/volume et conditions atmosphériques) identiques à celles de l'essai de retrait restreint effectué durant la même période. Comme les éprouvettes étaient de grande dimension, plusieurs mesures étaient effectuées, soit sept de chaque côté (côté coffré et côté fini à la truelle). Le désavantage majeur d'utiliser un tel essai est que nous ne pouvions pas contrôler la température et l'humidité ambiantes, mais les deux paramètres étaient enregistrés en continu. Il a ainsi été possible de corriger les valeurs obtenues. Pour tous les mélanges, une correction de $5 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ a été effectuée par rapport à la température qui prévalait au laboratoire lors de la prise de la mesure initiale.

La première caractéristique que nous avons observée lors de ces essais est que pour tous les mélanges, le retrait du côté coffré de l'éprouvette était toujours inférieur (environ 10 à 20%) (voir annexe B) à celui du côté fini à la truelle et cela tout au long de l'essai. Une plus grande porosité de la surface finie pourrait peut-être expliquer ce phénomène.

Lorsque l'on regarde l'évolution du retrait au cours des 100 premiers jours de séchage, on peut s'apercevoir que la moitié du retrait final est survenu dans les 14 à 21 premiers jours pour tous les mélanges, malgré une variation significative de l'humidité tout au long des essais. Toutefois, l'humidité moyenne en cours d'essai semble avoir beaucoup influencé la valeur finale du retrait libre (voir tableau 4.3).

Sur ce point, on peut noter que les quatre mélanges avec un rapport eau/ciment de 0,40 et renforcés la fibre Twincone (série #1) ont atteint, après 98 jours de séchage, environ 400 $\mu\text{m}/\text{m}$ de déformation alors que les trois autres mélanges (série #2) ont atteint entre 500 et 600 $\mu\text{m}/\text{m}$ après la même durée de séchage (voir figure 4.18). L'explication de ces résultats est sûrement la grande influence de l'humidité relative ambiante, car celle-ci s'est maintenue à environ 65% pour les quatre premiers mélanges (période de séchage du 3 juillet 1997 au 23 octobre 1997) tandis qu'elle est passée à environ 45% à partir du 20 octobre 1997, ce qui correspond à la mise en marche du système de chauffage du laboratoire. Comme les trois derniers mélanges ont séché dans la période du 25 septembre 1997 au 20 février 1998, ils ont été exposés au séchage pendant une grande période de temps où l'humidité était très faible. À titre indicatif, le tableau 4.3 indique les minima et maxima enregistrés au laboratoire ainsi que la date et l'heure où ces pointes dans les conditions environnementales sont survenues, et cela, à chaque mois au cours desquels les essais ont été effectués (voir annexe A pour la variation complète de l'humidité et de la température).

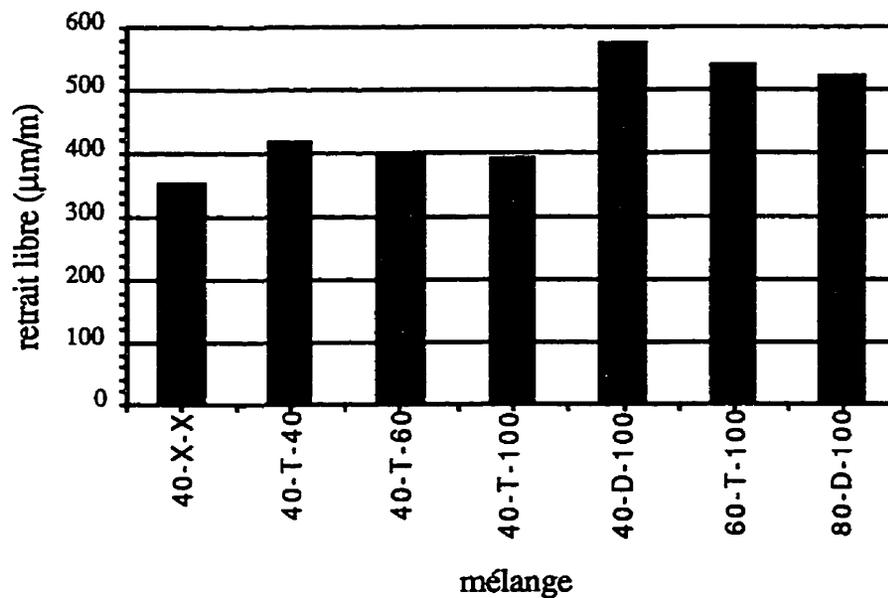


Figure 4.18: Retrait libre des différents mélanges à 100 jours

Pour ce qui est de l'influence du dosage en fibres et du type de fibres utilisées, aucune tendance nette n'a pu être observée. En effet, lors de la première série, le retrait libre a diminué avec l'augmentation du dosage en fibres, mais il est toujours demeuré plus élevé que le retrait libre du béton témoin. Quant au type de fibres utilisées, il est très difficile de

comparer les mélanges 40-T-100 et 40-D-100, car ils n'ont pas été exposés aux mêmes conditions environnementales (humidité relative et température).

Tableau 4.3: Écarts de température et d'humidité relative

mois	paramètre	valeur	date
juillet	temp. minimale	21,3°C	20 au 22 juil.
	temp. maximale	28,3°C	2 juil.
	hum. rel. min.	47,1%	23 et 29 juil.
	hum. rel. max.	75,1%	28 juil.
août	temp. minimale	20,9°C	7, 14 et 22 août
	temp. maximale	25,6°C	1, 8 au 10 août
	hum. rel. min.	45,4%	5 août
	hum. rel. max.	73,3%	11, 29 et 30 août
septembre	temp. minimale	16,3°C	22 sept.
	temp. maximale	24,0°C	1 sept.
	hum. rel. min.	42,1%	24 sept.
	hum. rel. max.	75,1%	1 et 2 sept.
octobre	temp. minimale	14,8°C	18 et 19 oct.
	temp. maximale	23,2°C	25, 26 et 28 oct.
	hum. rel. min.	29,7%	23 et 27 oct.
	hum. rel. max.	71,5%	5 et 6 oct.
novembre	temp. minimale	14,4°C	27 nov.
	temp. maximale	23,6°C	3 et 5 nov.
	hum. rel. min.	25,4%	13 nov.
	hum. rel. max.	59,0%	29 et 30 nov.
décembre	temp. minimale	14,4°C	6, 8 et 9 déc.
	temp. maximale	19,0°C	9 déc.
	hum. rel. min.	23,9%	10 déc.
	hum. rel. max.	67,9%	3 au 6 déc.

Bien que partiels, les résultats de la seconde série de mélanges tendent à indiquer que le rapport eau/ciment a peu d'influence sur l'amplitude du retrait et que l'un des paramètres les plus influents, hormis l'humidité relative, est le volume de pâte. En effet, le mélange 40-D-100 a eu un retrait supérieur aux deux mélanges à matrice faible, soit les mélanges 60-T-

100 et 80-D-100 qui contenaient très peu de pâte (voir tableau 2.6 du chapitre 2) malgré la présence de 100 kg/m^3 de fibres.

Là où le rapport eau/ciment joue un rôle important, c'est évidemment à l'égard de la perte de masse, c'est-à-dire la quantité d'eau évaporée. On peut voir sur la figure 4.19 que des valeurs inférieures à 1% pour les mélanges de rapport eau/ciment de 0,40 passent à 2% et 2,5% respectivement pour les mélanges 60-T-100 et 80-D-100. La quantité d'eau libre ayant peu ou pas d'influence sur la contraction de séchage augmente de façon importante avec le rapport eau/ciment.

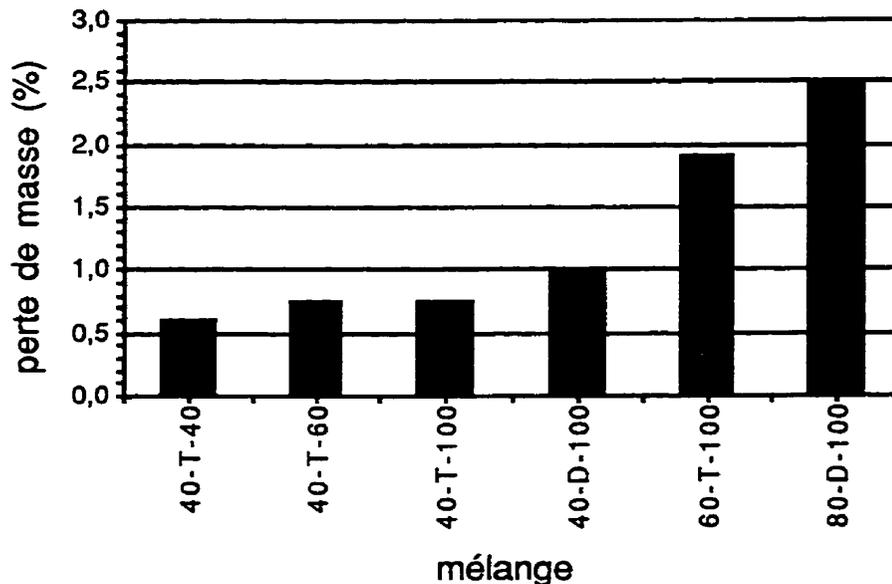


Figure 4.19: Perte de masse des différents mélanges à 100 jours

4.5 Essais de retrait restreint

Pour les essais de retrait restreint, les données expérimentales que nous avons recueillies sont celles sur l'évolution des contraintes à l'intérieur des colonnes d'acier des cadres d'essai. Une fois ces valeurs obtenues, il devient très simple de calculer les contraintes à l'intérieur même du béton. Les figures 4.20 à 4.26 présentent l'évolution de ces contraintes tout au long de la période de séchage des dalles.

L'essai de retrait restreint était effectué sur des corps d'épreuve de grande taille et cela pour chacun des mélanges. Des huit ponts de jauges installés sur les quatre cadres, un seul n'a pas donné des résultats fiables. Il s'agissait du pont correspondant à l'une des colonnes

du cadre #3. Les résultats obtenus avec ce cadre sont donc ceux d'un seul pont de jauges, tandis que les autres, la moyenne des deux ponts de jauges. Au tableau 4.4, on présente une correspondance entre les différents mélanges et les quatre cadres.

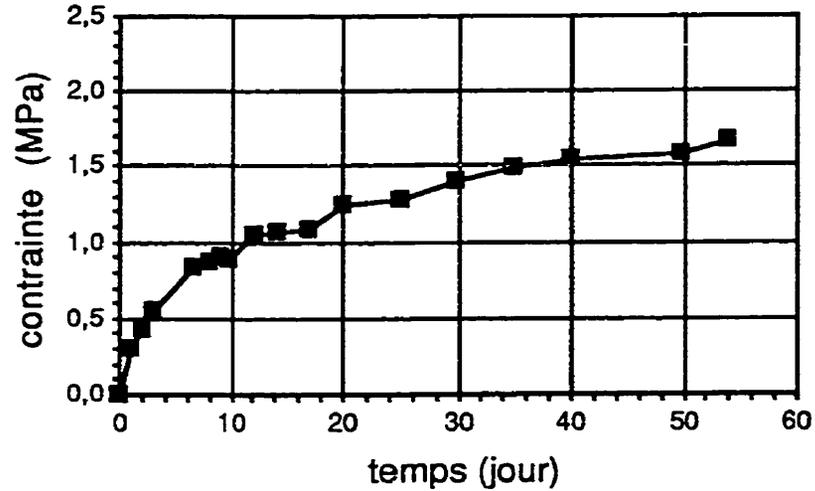


Figure 4.20: Évolution des contraintes pour le mélange 40-X-X

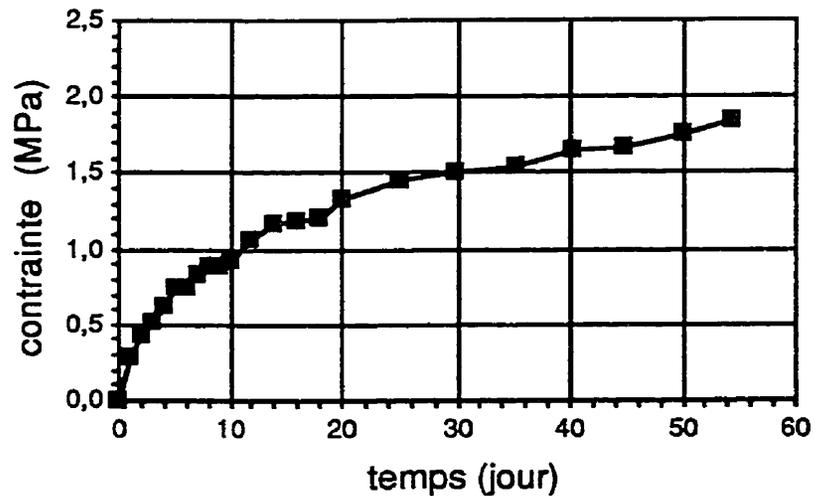


Figure 4.21: Évolution des contraintes pour le mélange 40-T-40

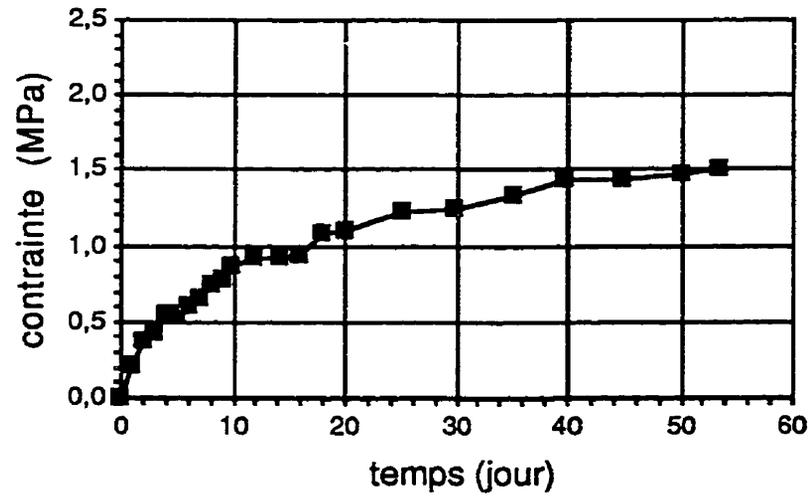


Figure 4.22: Évolution des contraintes pour le mélange 40-T-60

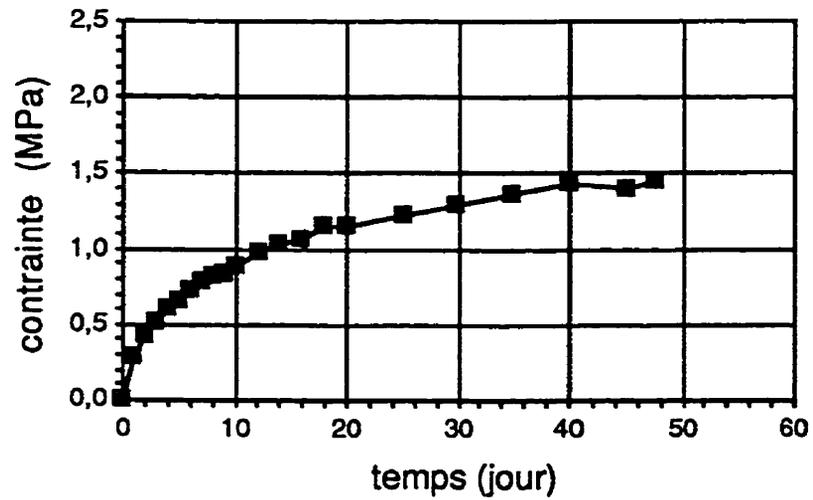


Figure 4.23: Évolution des contraintes pour le mélange 40-T-100

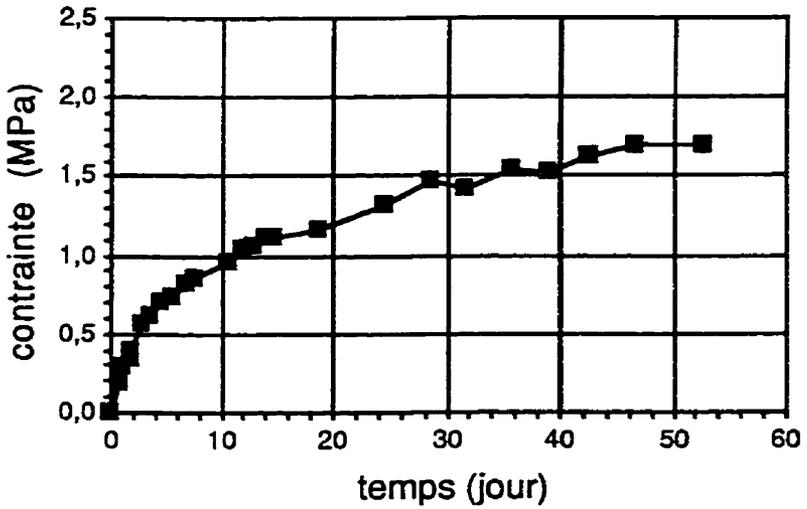


Figure 4.24: Évolution des contraintes pour le mélange 40-D-100

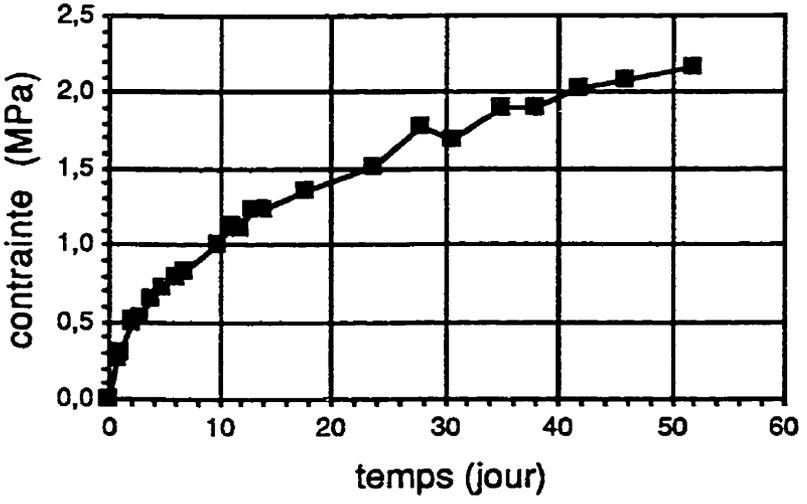


Figure 4.25: Évolution des contraintes pour le mélange 60-T-100

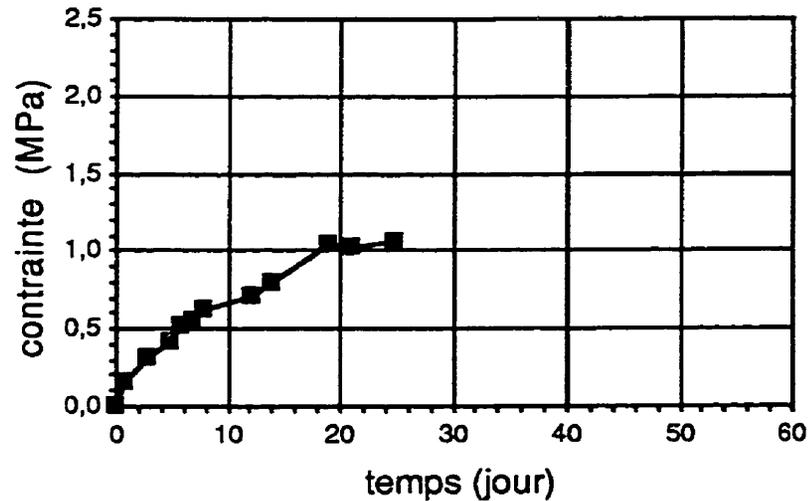


Figure 4.26: Évolution des contraintes pour le mélange 80-D-100

Tableau 4.4: Correspondance entre les mélanges et les cadres d'acier

cadre	mélanges
#1	40-T-100 et 40-D-100
#2	40-X-X et 60-T-100
#3	40-T-40
#4	40-T-60 et 80-D-100

À partir des déformations mesurées sur les colonnes des cadres, on détermine la contrainte moyenne dans l'acier et par correspondance directe (équilibre statique) on calcule l'effort induit dans le béton. La figure 4.27 présente les résultats obtenus pour les différents mélanges.

À l'exception du mélange 80-D-100, qui n'a été restreint que pour une période de 25 jours, les mélanges testés présentent une contrainte variant entre 1,5 MPa et 2,2 MPa après environ 7 à 8 semaines de séchage. L'effort induit par le retrait peut être influencé par le cadre avec lequel l'essai a été effectué, mais il dépend principalement du retrait libre, du module élastique et du fluage du béton. Sur les graphiques des figures 4.11 à 4.17 et 4.20 à 4.26, on constate une correspondance entre les courbes de retrait libre et celles de retrait

restreint, en ce qui a trait à leur cinétique. Cela démontre la cohérence des résultats obtenus avec les jauges, sans pour autant signifier qu'il s'agit de valeurs exactes.

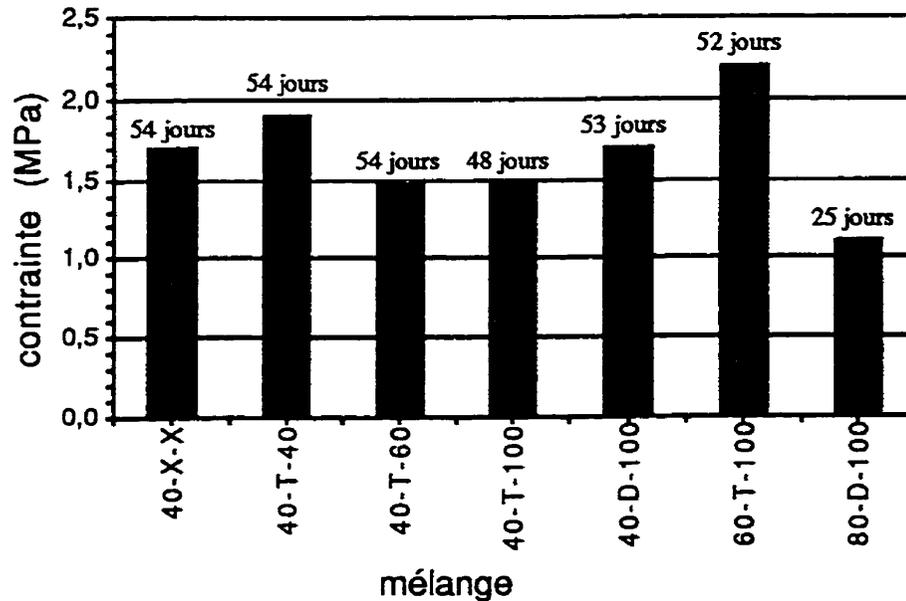


Figure 4.27: Contrainte de traction atteinte lors du retrait restreint

Lorsqu'on fait un petit calcul rapide pour évaluer la contrainte théorique qui aurait été atteinte si le béton était parfaitement élastique et non vieillissant, on en arrive à des écarts importants avec les valeurs obtenues expérimentalement.

$$\sigma = \varepsilon * E \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} \varepsilon = \text{valeur de retrait libre du béton} \\ E = \text{module élastique du béton (28 jours)} \end{array}$$

Pour le mélange 40-X-X:

$$\sigma = 350E-6 * 29000 \text{ MPa}$$

$$\sigma = 10,15 \text{ MPa} \gg 1,7 \text{ MPa}$$

En plus de la rigidité du cadre (efficacité de restriction de l'ordre de 70%), il y a également le fluage en traction du béton et le module élastique du béton qui n'est pas constant (plus faible au début de l'essai que celui avec lequel on effectue le calcul; E_{3d} vs E_{28d}) qui permettent de soulager la contrainte de retrait restreint.

Le fluage peut expliquer en bonne partie l'écart; des résultats publiés [Bissonnette et Pigeon 1995] démontrent que le fluage en traction du béton (avec ou sans fibres) en

conditions de séchage peut atteindre aisément 100 à 150 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$; on peut calculer de façon simpliste un module d'élasticité «équivalent»:

$$E_b \text{ \acute{e}q.} = 1,0 \text{ MPa} / (35\text{E-}6 + 100\text{E-}6) \approx 7,4 \text{ GPa}$$

(déf. élas.) (fluage)

En utilisant le module élastique équivalent dans le calcul du degré de restriction effectif à l'aide de l'équation 2.4 du chapitre 2, on obtient:

$$\partial = 0,90 \quad \text{et} \quad \epsilon_{\text{acier}} \approx 0,1\epsilon_{\text{retrait}}$$

$$\text{Si } \epsilon_{\text{retrait}} = 350\text{E-}6 \quad \text{donc} \quad \epsilon_{\text{acier}} = 35\text{E-}6 \quad \text{et} \quad \epsilon_{\text{béton}} = 315\text{E-}6$$

$$\sigma_{\text{béton}} = \epsilon_{\text{béton}} E_b \text{ \acute{e}q.} = 2,33 \text{ MPa}$$

Cette dernière valeur se situe légèrement au-dessus du spectre des valeurs mesurées expérimentalement. Ce n'est donc pas surprenant que la fissuration n'ait pas été atteinte, peu importe le mélange. Il aurait fallu idéalement conduire des essais de fluage en même temps et sous les mêmes conditions, mais cela excédait largement le cadre de ce travail.

En plus de ces trois caractéristiques (rigidité du cadre, module élastique du béton et fluage) très importantes, d'autres phénomènes secondaires ont également pu se produire, soit la flexion des poutres d'extrémités des cadres (W250x73), un léger fléchissement au niveau des colonnes sur les côtés des cadres (HSS150x100) et également un glissement relatif entre les ancrages et le béton.

Tous ces paramètres, n'ont pu être mesurés et/ou corrigés faute de temps et de moyens, mais une utilisation optimale des cadres d'essai nécessiterait quelques améliorations:

- Installation de ponts de jauges sur la face intérieure (côté du béton) des profilés HSS de façon à mesurer une déformation axiale réelle qui ne serait pas influencée par la flexion possibles des colonnes;
- Calibration de chacun des cadres à l'aide d'un vérin hydraulique;
- Installation de jauges de déformation directement sur le béton, ce qui permettrait notamment d'estimer le glissement du béton dans les ancrages;
- Utilisation de cordes vibrantes qui permettraient de garantir la stabilité à long terme.

De cette façon, les réponses obtenues seraient plus justes et plus faciles à analyser. Si nous n'avons pas procédé de cette manière dès le début des essais c'est que nous pensions que les corps d'épreuve auraient fissuré après une durée de séchage relativement courte et c'est le mode de fissuration qui nous intéressait et non pas la valeur absolue des contraintes atteintes. Comme celles-ci n'ont pas atteint la résistance en traction des bétons, aucun résultat attendu n'a été obtenu avec cet essai. Nous avons donc poursuivi la quête de la multifissuration à l'aide des essais de traction directe.

4.6 Essais de traction thermique

Après 54 jours de séchage, alors que le taux de retrait avait passablement diminué, aucune des dalles soumises à l'essai de retrait restreint n'était fissurée. Nous avons alors procédé à la seconde étape, c'est-à-dire l'essai de traction thermique. Au cours de ces essais, la contrainte à l'intérieur du béton a été mesurée de la même manière que dans l'essai de retrait restreint. De plus, nous avons enregistré les déformations des dalles de béton à l'aide de capteurs de déplacement (LVDT) en quatre points. Les figures 4.28 à 4.35 relatent donc l'évolution de ces deux paramètres en fonction de l'augmentation de la température à l'intérieur des colonnes d'acier. Il est à noter que la contrainte initiale dans le béton n'était pas nulle lors de l'essai de traction thermique comme le démontrent les figures, mais elle était plutôt équivalente à la contrainte finale obtenue lors de l'essai de retrait restreint.

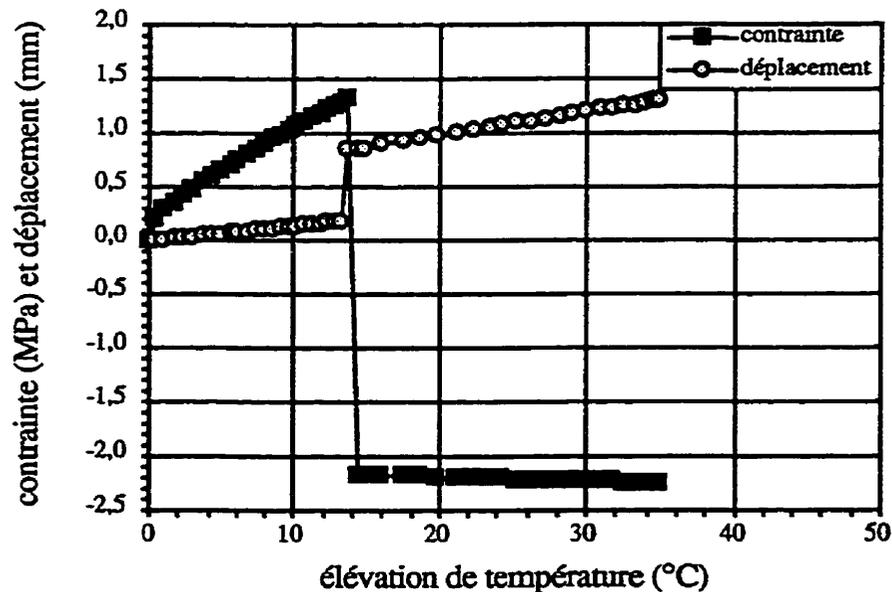


Figure 4.28: Essai de traction par chauffage du mélange 40-X-X

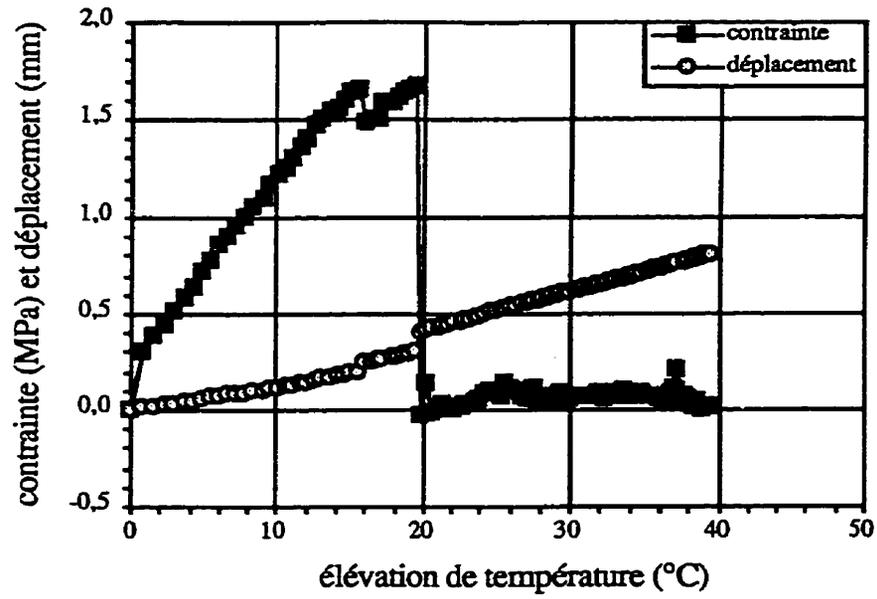


Figure 4.29: Essai de traction par chauffage du mélange 40-T-40

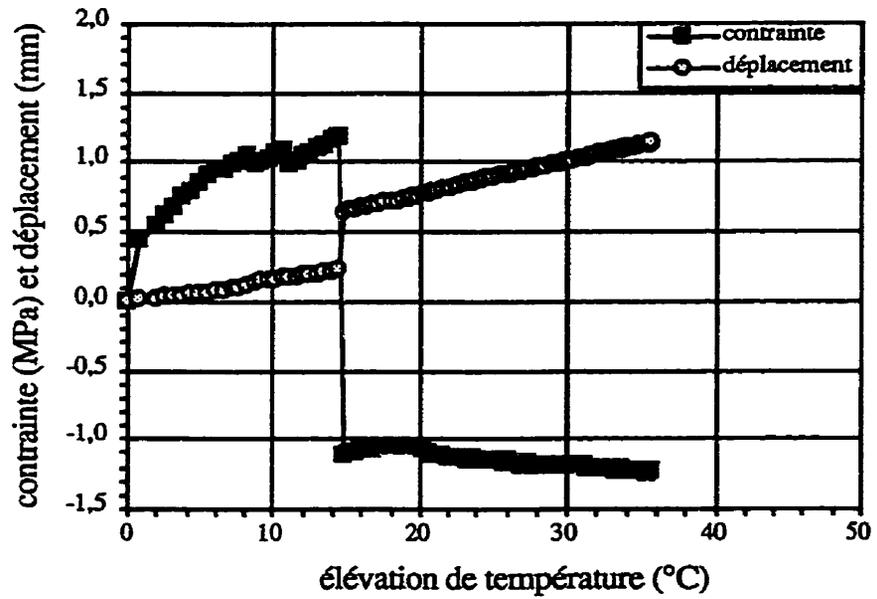


Figure 4.30: Essai de traction par chauffage du mélange 40-T-60

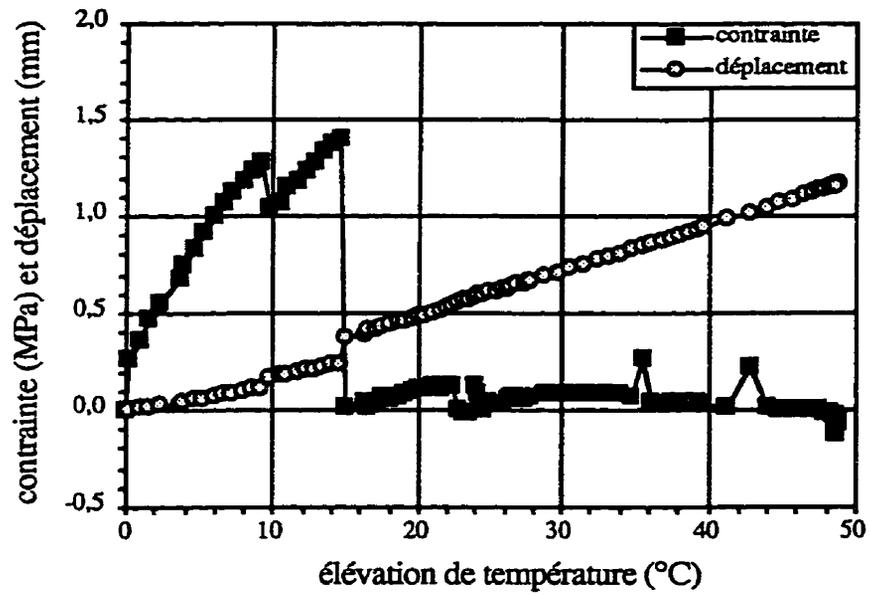


Figure 4.31: Essai de traction par chauffage du mélange 40-T-100

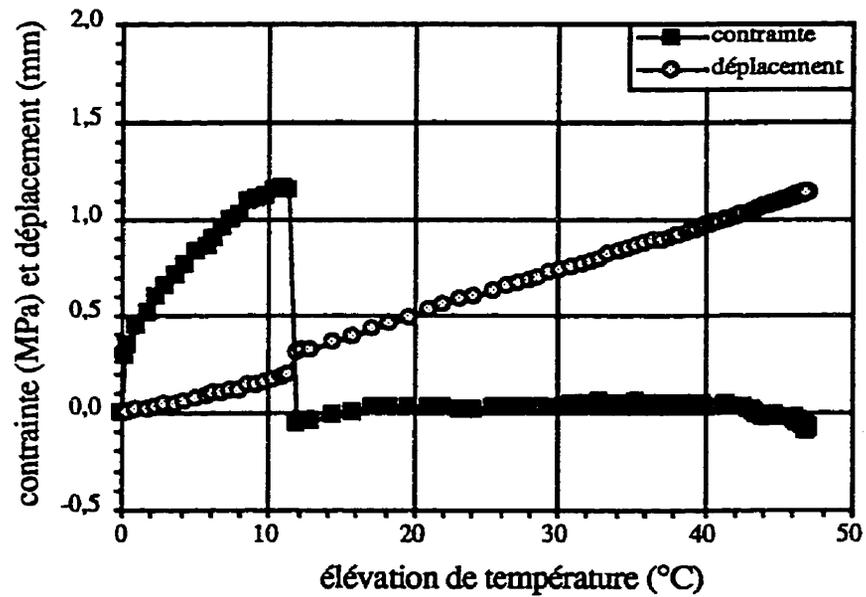


Figure 4.32: Essai de traction par chauffage du mélange 40-D-100

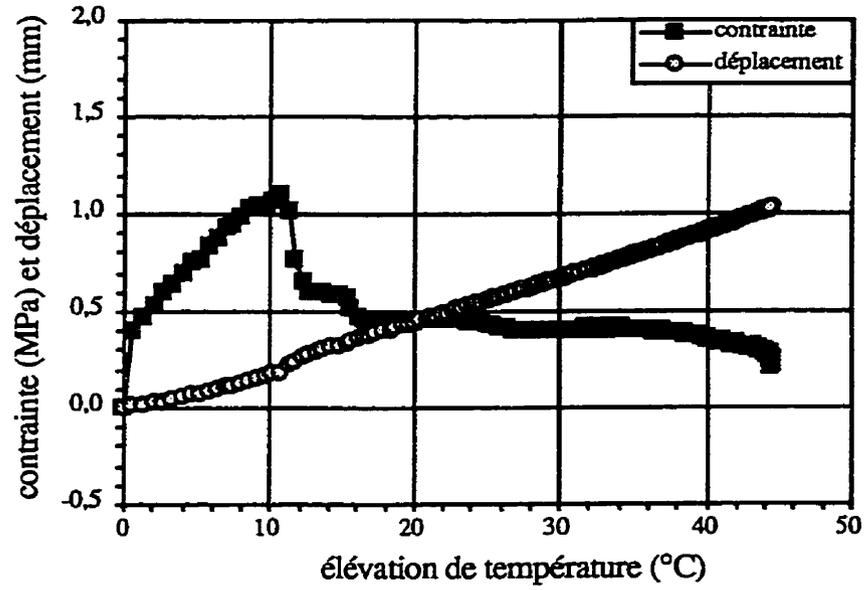


Figure 4.33: Essai de traction par chauffage du mélange 60-T-100

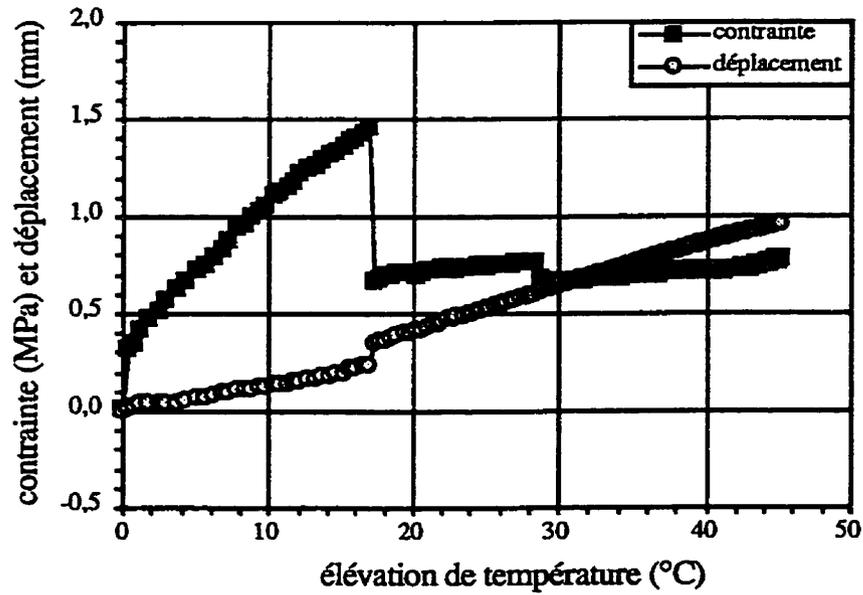


Figure 4.34: Essai de traction par chauffage du mélange 80-D-100 à 3 jours

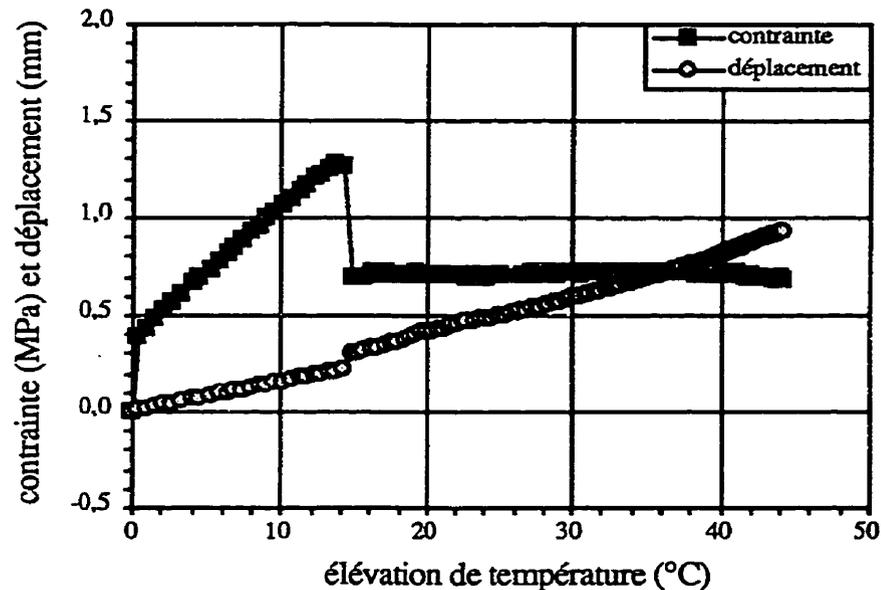


Figure 4.35: Essai de traction par chauffage du mélange 80-D-100 à 28 jours

Comme nous utilisons les mêmes ponts de jauges que lors des essais de retrait restreint, l'incertitude dans les mesures était nécessairement la même. En fait, elle était accrue puisqu'un nouveau paramètre venait s'ajouter aux autres, soit l'influence d'une hausse très significative de la température sur la réponse des jauges. Pour pallier à cet inconvénient et rendre le traitement des résultats possible, une calibration a été effectuée. Pour ce faire, nous avons procédé à un essai de chauffage sur chacun des cadres à vide, c'est-à-dire sans béton à l'intérieur. Les résultats obtenus (voir annexe D) démontrent que la relation voltage vs température est linéaire (voir tableau 4.5).

Comme on peut le voir, le coefficient de proportionnalité diffère sensiblement d'un pont de jauges à l'autre dû aux défauts d'alignement des jauges.

Commençons tout d'abord par une brève analyse des courbes présentées aux figures 4.28 à 4.35. Sur chaque graphique, nous retrouvons deux courbes, soit la contrainte à l'intérieur du béton et l'allongement de la dalle de béton, tous deux en fonction de l'élévation de température enregistré sur les colonnes d'acier au moyen de thermocouples. Le calcul de la contrainte est effectué de la même manière que lors de l'essai de retrait restreint à l'exception qu'on y a ajouté la correction due à l'augmentation de la température. Pour ce qui

est de l'allongement, cette mesure correspond tout simplement à la lecture des quatre capteurs de déplacement disposés à chaque coin de la dalle de béton.

Tableau 4.5: Relation voltage vs température

colonne (#)	coeff. de proportionnalité ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)
cadre 1, colonne A	2,92
cadre 1, colonne B	5,92
cadre 2, colonne A	4,00
cadre 2, colonne B	-1,42
cadre 3, colonne A	2,52
cadre 3, colonne B	3,09
cadre 4, colonne A	5,51
cadre 4, colonne B	10,60

Pour valider cet essai, il suffit d'analyser le comportement du mélange 40-X-X. Sur le graphique de la figure 4.28, on aperçoit la contrainte et l'allongement augmenter linéairement jusqu'à la rupture du corps d'éprouve. À ce moment, la contrainte chute à zéro et l'allongement augmente, tous deux brusquement. Par la suite, la contrainte demeure constante (nulle) puisque l'éprouvette est rompue et l'allongement continu d'augmenter puisque les capteurs de déplacement sont fixés à chaque extrémité du cadre d'acier. Donc les courbes suivent une certaine logique, mais qu'en est-il des valeurs?

Après avoir atteint 1,3 MPa, la contrainte a chuté de 3,5 MPa pour se stabiliser à -2,2 MPa. Si 3,5 MPa doit correspondre à la résistance en traction du béton (valeur très réaliste), 2,2 MPa correspondrait à la contrainte prévalant à la fin de l'essai de retrait restreint. Malheureusement, le retrait restreint de ce mélange n'avait atteint qu'une valeur de 1,67 MPa. La différence de 0,53 MPa serait donc attribuable au retrait endogène qui n'a pas été enregistré au cours des trois jours de mûrissement. Ceci est évidemment une valeur très approximative et arbitraire, mais tout de même très satisfaisante dans les circonstances.

De son côté, la courbe correspondant à l'allongement a atteint la valeur d'environ 0,2 mm tout juste avant la rupture. Si on transforme cette valeur en terme de contrainte dans le

béton, on obtient environ 3,0 MPa (évaluation linéaire), ce qui est légèrement élevé compte tenu du fait qu'elle n'aurait pas dû franchir la barre de 1,5 MPa puisque nous avons obtenu 1.3 MPa avec la lecture des jauges. Nous conserverons tout de même ces valeurs à titre comparatif entre les mélanges.

Au tableau 4.6, nous retrouvons l'essentiel de chaque graphique (figures 4.28 à 4.35) relatif à l'essai de traction thermique.

Tableau 4.6: Essai de traction thermique

mélange	contrainte à la rupture* (MPa)	chute de contrainte (MPa)	allongement à la rupture (mm)	allongement relâché (mm)
40-X-X	$1,67+1,30=3,0$	3,50	0,20	0,65
40-T-40	$1,85+1,66=3,5$	1,68	0,30	0,10
40-T-60	$1,51+1,20=2,7$	2,30	0,20	0,45
40-T-100	$1,45+1,40=2,9$	1,40	0,24	0,12
40-D-100	$1,70+1,16=2,9$	1,22	0,20	0,10
60-T-100	$2,17+1,10=3,3$	0,50	0,18	0,04
80-D-100 (3 j)	1,46	0,80	0,24	0,10
80-D-100 (28 j)	$1,05+1,28=2,3$	0,58	0,22	0,08

* Valeur obtenue de l'essai de retrait restreint additionnée à celle obtenue de l'essai de traction thermique

Ces résultats montrent que la contrainte maximale atteinte est assez constante malgré que certains mélanges avaient une matrice plus faible, en particulier le mélange 60-T-100 qui a atteint 3,3 MPa.

Pour ce qui est de la chute de contrainte, les valeurs varient beaucoup. On retrouve évidemment une perte maximale pour le mélange 40-X-X due à l'absence de fibres et une perte minimale de 0,5 MPa pour le mélange 60-T-100. Ce dernier résultat est toutefois peu réaliste puisque la fissure créée lors de cette rupture était située à l'extrémité des barres d'ancrages dans le béton. Leur présence a donc eu pour effet de réduire la perte de contrainte en transférant la charge d'un côté à l'autre de la fissure.

Sur le graphique de la figure 4.34, on retrouve les résultats d'un essai de traction thermique supplémentaire réalisé dès la fin du mûrissement sur une seconde dalle du mélange 80-D-100 qui avait été préparée à cette fin. L'essai visait à mettre en évidence un effet possible de la maturité sur le paramètre σ_{fU}/τ_{fU} de l'équation 1.8 du chapitre 1, mais le comportement observé a été similaire à celui de la dalle soumise au retrait restreint.

L'objectif principal du projet était de formuler des mélanges de béton multifissurants et à la vue de ces résultats, c'est-à-dire des courbes où l'on peut observer une grande perte de contrainte après la fissuration de la matrice, il semble évident que les mélanges étudiés n'ont pas cette propriété. Pour les mélanges 40-T-40, 40-T-60, 40-T-100 et 60-T-100, une fissure étroite est apparue dans la zone d'ancrage de la dalle et cette fissuration correspond à la légère chute de contrainte observée sur les courbes environ 5°C avant la rupture principale. Il ne s'agit pas de multifissuration, mais probablement d'une conséquence d'efforts de flexion parasites au niveau de l'encastrement attribuables à un défaut d'alignement de la dalle (excentricité des goujons par rapport au centre de la dalle) à l'intérieur du cadre d'acier, la fissure étant visible que d'un seul côté.

Pour confirmer ce que les courbes démontrent, tout au long des essais, une inspection visuelle des dalles était effectuée de chaque côté de celle-ci de façon à s'assurer qu'aucune fissure n'apparaisse sans avoir affecter les instruments de mesures. Heureusement, aucune fissure n'a été aperçue sur les éprouvettes à l'exception de celles constatées par les instruments de mesure. Les premières fissures à apparaître étaient celles dans les ancrages et elles avaient une largeur d'environ 0,08 mm. Cette largeur demeurerait toutefois constante puisque les fissures étaient situées dans les ancrages.

Pour ce qui est de la fissure principale, il n'y avait aucun doute sur son apparition puisque le bruit provoqué était très évident. Les fissures qui ont été identifiées tout de suite après leur apparition étaient généralement situées au centre de la dalle (+ ou -), sauf dans le cas du mélange 60-T-100. Leur largeur initiale variait alors 0,2 mm et 0,8 mm pour atteindre des valeurs supérieures à 1,0 mm lorsque l'essai se terminait. Ce sont les mélanges fortement fibrés et ceux ayant peu ou pas eu de retrait restreint (40-T-100, 40-D-100, 60-T-100 et 80-D-100) qui avaient l'ouverture de fissure la plus faible au départ.

Pour ce qui est du type de fissuration, c'est assez simple, car les mélanges 40-X-X, 40-T-40 et 40-T-60 montraient à la rupture une fissure unique très franche, tandis que les autres mélanges affichaient une zone de désagrégation variant de 50 mm à 100 mm de

largeur. Cette zone était caractérisée par un chevauchement de fissures plus ou moins étroites et nombreuses, mais il ne s'agissait pas d'un comportement multifissurant.

Si on se souvient bien, en flexion, nous avons obtenu un pseudo-écrouissage de certaines éprouvettes. Une comparaison du nombre de fibres par unité de surface dans les sections de rupture serait intéressant (voir tableau 4.7). Prenons par exemple le mélange 40-T-100:

en flexion (sous l'axe neutre): $34 \text{ fibres} / (12,5 * 6,25) \text{ cm}^2 = 0,44 \text{ fibres/cm}^2$

en flexion (section complète): $88 \text{ fibres} / (12,5 \text{ cm})^2 = 0,56 \text{ fibres/cm}^2$

en traction : $268 \text{ fibres} / (40,0 * 8,0) \text{ cm}^2 = 0,84 \text{ fibres/cm}^2$

Tableau 4.7: Densité de fibres: flexion vs traction

Mélange (#)	Flexion* (fibres/cm ²)	Traction (fibres/cm ²)
40-T-40	0,27	0,43
40-T-60	0,32	0,40
40-T-100	0,44	0,84

* densité de fibres sous l'axe neutre

Il y avait donc plus de fibres à la section de rupture de la dalle qu'à celle de la poutre de flexion, mais, malgré cela, l'essai de flexion a procuré des résultats s'approchant davantage du comportement qu'on présume associé à la multifissuration. En effet, on a observé un comportement pseudo-écrouissant en flexion pour les bétons dosés à 60 kg/m^3 et plus en fibres, alors qu'en traction, tous les bétons ont affiché une chute de capacité abrupte peu de temps après l'apparition de la première fissure.

4.7 Essais de traction avec le vérin

À la fin des essais de traction thermique, l'ouverture de la fissuration était d'environ un millimètre. Comme la possibilité de multifissurer n'était pas encore totalement épuisée, nous avons effectué un second essai de traction directe sur les corps d'épreuve de grande taille, mais cette fois-ci avec l'aide d'un vérin hydraulique de grande capacité.

L'essai, contrôlé en charge, avait pour but de vérifier le potentiel de multifissuration jusqu'à la rupture complète du béton.

Les résultats que nous avons obtenu sont présentés sur les figures 4.36 à 4.38. Il s'agit tout simplement d'un graphique montrant l'évolution de la contrainte à l'intérieur du béton en fonction du déplacement moyen (allongement) des capteurs de déplacement installés à chaque coin du corps d'épreuve. En fait, le déplacement observé correspond à l'ouverture de la fissure existante.

On peut remarquer que la contrainte maximale atteinte dans ces éprouvettes préfissurées n'a été que de 1,5 MPa pour le mélange 40-T-40, 1,1 MPa pour le mélange 40-T-60 et 1,7 MPa pour le mélange 40-T-100. Comme il s'agit de contraintes bien inférieures à la contrainte de rupture de la matrice, la possibilité que la matrice multifissure était évidemment inexistante.

Les autres essais de traction thermique ont donné les mêmes résultats, il a été jugé inutile de procéder à de nouveaux essais sur le vérin.

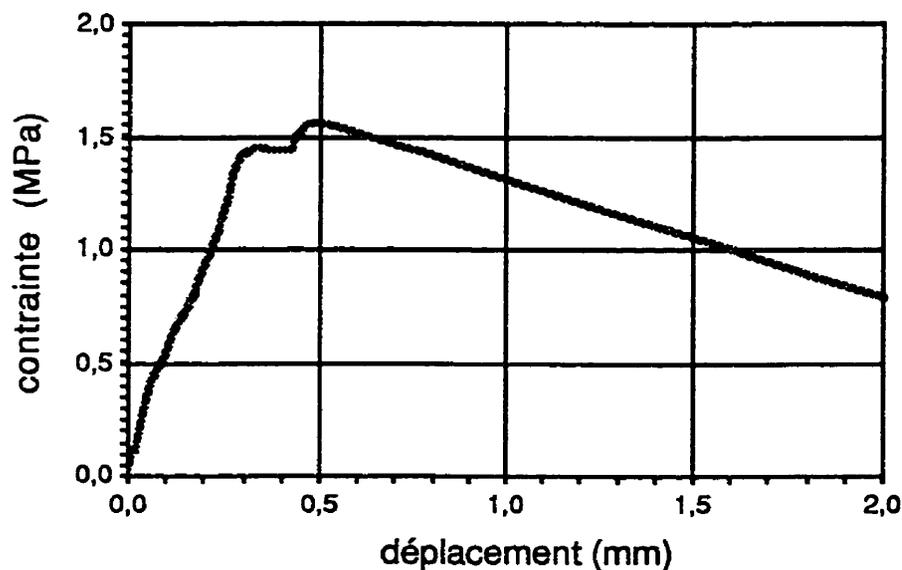


Figure 4.36: Essai de traction directe avec un vérin (mélange 40-T-40)

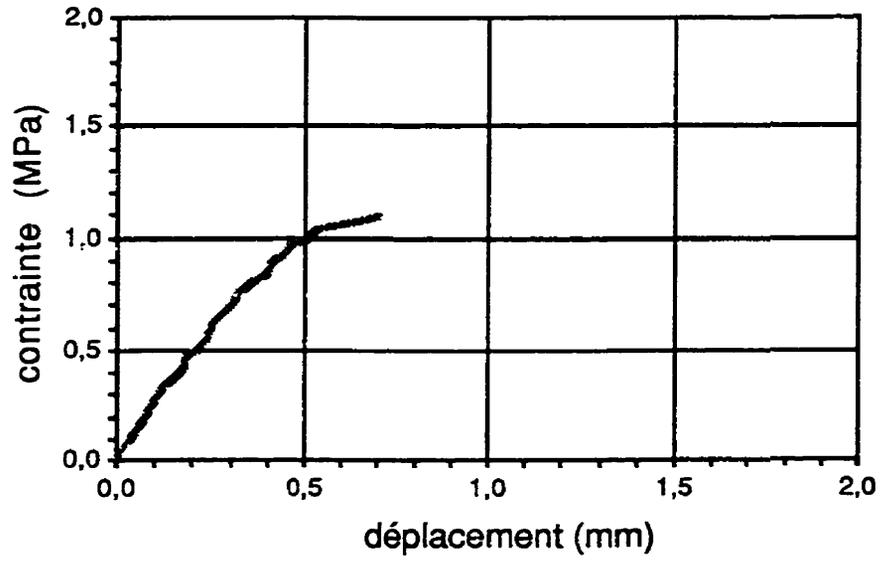


Figure 4.37: Essai de traction directe avec un vérin (mélange 40-T-60)

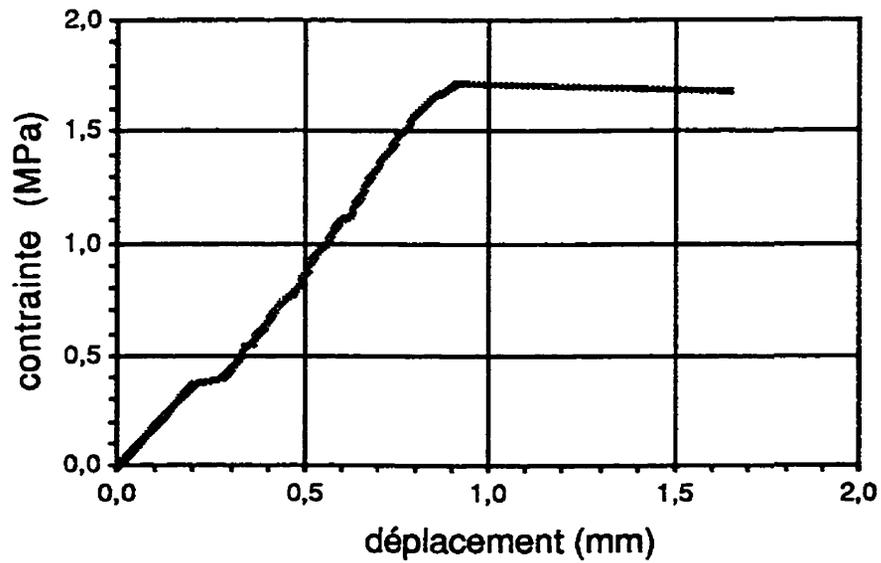


Figure 4.38: Essai de traction directe avec un vérin (mélange 40-T-100)

Il semble donc que pour les types de matrices considérés dans cette étude et pour des dosages en fibres n'excédant pas 100 kg/m^3 , la multifissuration ne constitue pas une propriété des BRFA à l'état durci. Comment alors expliquer les résultats évoqués précédemment obtenus par Banthia et coll. (1993) et Grzybowski et Shah (1990)? Dans le premier cas, le séchage des éprouvettes de section très fines débutait trois heures après le contact eau-ciment, de sorte que les résultats décrivent le comportement d'un matériau à l'état presque plastique. Dans le second cas, les essais réalisés comportaient un effet de structure significatif dans la réponse du matériau. En effet, l'essai de retrait restreint annulaire implique le développement d'un gradient d'humidité non symétrique dans le béton qui, conjugué à la restriction physique de l'anneau d'acier, favorise le développement de plus d'une fissure.

Comme le prédisent les modèles théoriques, des BRFA intrinsèquement multifissurants à l'état durci ne peuvent vraisemblablement être obtenus qu'à des dosages en fibres très élevés, à tous le moins supérieurs à 100 kg/m^3 . L'utilisation de dosages de bétons situés entre 60 et 100 kg/m^3 semblent avoir comme seul effet de créer une zone de désagrégation dans l'éprouvette plutôt qu'une fissure franche. Leur utilisation n'est donc pas recommandée.

Si des essais futurs sont à prévoir avec le même type d'essais, une matrice plus dense (utilisation de la fumée de silice) devrait être testée pour améliorer le lien fibre-matrice.

CONCLUSION

Les chapes en béton renforcé de fibres d'acier, doivent être plus minces que celles en béton conventionnel et doivent permettre un contrôle de la fissuration de façon beaucoup plus efficace. De cette manière, sous un effort de traction suffisamment élevé, la matrice cimentaire se fissure en plusieurs endroits avant la localisation. Ce comportement est désigné par le terme «multifissuration».

L'objectif principal de ce projet de maîtrise était donc l'étude de la multifissuration du béton renforcé de macrofibres d'acier. De façon plus précise, nous avons tout d'abord étudié la distribution des fibres à l'intérieur d'une chape mince. Une connaissance accrue de l'hétérogénéité et de l'anisotropie des fibres nous permettrait de mieux utiliser les fibres et surtout d'en optimiser le dosage.

Suite à la première partie, les constatations suivantes se sont dégagées:

- Le béton renforcé de fibres d'acier, lorsqu'il est placé en couche mince allant jusqu'au double de la longueur de la fibre, tend à se structurer par lui-même, c'est-à-dire que la majorité des fibres se placent dans une position où leur efficacité est supérieure (i.e. plus ou moins à l'horizontal) sans avoir à utiliser une technique de mise en place spéciale.
- La structuration du béton renforcé de fibres d'acier est légèrement plus prononcée dans la partie inférieure de la chape et cela est dû à un plus grand nombre de fibres traversantes sur les plans verticaux dans le bas que dans le haut, le nombre de fibres traversantes sur les plans horizontaux étant le même dans le haut et dans le bas.
- L'utilisation de corps d'épreuve de grande taille de préférence à de petites éprouvettes, minimise la variabilité dans les résultats.

- Le rapport eau/ciment n'a pas d'influence sur l'hétérogénéité et l'anisotropie de chape mince en béton renforcé de fibres d'acier.
- Une hausse du dosage en fibres tend à diminuer l'hétérogénéité du béton renforcé de fibres d'acier.
- On peut noter une influence du type de mise en place, du type de vibration ainsi que de la maniabilité sur la distribution des fibres.

En clair, l'utilisation du BRFA en couche mince favorise une structuration 2D. Cette conclusion est favorable à l'obtention de resurfaçages ou dalles multifissurants avec des dosages en fibres raisonnables.

Avant de débiter la seconde partie de l'étude, on disposait de très peu d'information sur les caractéristiques de mélange à viser pour mettre en oeuvre des bétons multifissurants. Nous avons donc décidé d'utiliser, lors d'une première série d'essais, des mélanges ayant un rapport eau/ciment de 0,40 avec des quantités de fibres allant jusqu'à 100 kg/m^3 de béton. Ce rapport eau/ciment a été choisi en regard des exigences minimales de la norme A23.1-94.

Pour cette première série d'essais, les résultats obtenus lors des essais de flexion sur les mélanges fortement fibrés apparaissaient prometteurs, car on observait régulièrement deux fissures par poutre et une bonne augmentation de la charge après la première fissuration. Par contre, les essais de retrait restreint n'ont toutefois pas permis d'atteindre l'objectif qui était de faire fissurer les dalles, car l'humidité relative ambiante du laboratoire était parfois trop élevée et le degré de restriction des cadres était insuffisant. Nous avons donc utilisé un essai de traction directe thermique qui s'est révélé efficace, mais il n'a pas produit les résultats que nous espérions puisqu'aucun mélange n'a multifissuré.

Pour faire suite à cette première série d'essais infructueuse, nous avons orienté le programme expérimental vers des mélanges ayant une matrice de faible résistance. Il s'agit des mélanges de rapport eau/ciment de 0,60 et 0,80.

Nous avons utilisé ces mélanges, car nous envisagions que des bétons possédant une matrice de faible résistance auraient plus de chance de multifissurer. La charge de rupture étant inférieure à celles des mélanges précédents. La condition nécessaire pour que cette

hypothèse se réalise était que le lien pâte-fibre ne s'affaiblissent pas autant que la matrice elle-même (diminuer σ_{fU}/τ_{fU} en diminuant σ_{fU}).

Pour la seconde série, les mêmes essais que lors de la première ont été menés à différentes échéances et des résultats similaires ont été obtenus, c'est-à-dire qu'aucune multifissuration de la matrice n'a été observée.

Les résultats du programme expérimental réalisé dans cette étude tendent à démontrer que la multifissuration ne constitue pas une propriété véritable des BRFA, du moins à l'intérieur de la gamme de matériaux généralement envisageables sur le plan pratique. Sans que cela ne remette en question le rôle des fibres sur l'ouverture des fissures, il convient d'analyser avec une certaine prudence les résultats obtenus dans des essais où le comportement du matériau est influencé par les conditions de retenue et/ou les conditions d'exposition.

D'autres travaux sont nécessaires afin de mettre en évidence l'existence potentielle d'une teneur en fibres critique au-delà de laquelle le comportement à la rupture devient multifissurant. L'utilisation de la fumée de silice et l'optimisation du squelette granulaire sont également des axes de recherche envisageables. Par ailleurs, la prédiction du comportement des BRFA nécessite une caractérisation fiable du paramètre σ_{fU}/τ_{fU} .

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aveston, J., Mercer, R.A. et Sillwood, J.M. (1974) Fiber reinforced cements - scientific foundation for specifications, Composites, standards testing and desing, p. 93-103.
- Aveston, J. et Kelly, A. (1973) Theory of multiple fracture of fibrous composites, Journal of materials science, vol. 8, p. 352-362.
- Banthia, N., Azzabi, M. et Pigeon, M. (1993) Restrained shrinkage cracking in fiber-reinforced cementitious composites, Materials and Structures, vol. 26, p. 405-413.
- Banthia, N., Yan, C. et Mindess, S. (1996) Restrained shrinkage cracking in fiber reinforced concrete: a novel test technique, Cement and concrete research, vol. 26, n° 1, p. 9-14.
- Baron, J. (1982) Les retraits de la pâte de ciment, Le béton hydraulique, Paris, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, chapitre 27, p. 485-501.
- Beaudoin, J.J. (1990) Handbook of fiber reinforced concrete, Noyes publications, Park Ridge, New Jersey, USA.
- Bentur, A. et Mindess, S. (1990) Fiber reinforced cementitious composites, Elsevier appl. sci., London, England.
- Betterton, R.M., Knutson, M.J. et Marks, V.J. (1985) Fibrous portland cement concrete overlay research in Greene County, Iowa, Transportation research record, n° 1040, p.1-7.
- Bissonnette, B. (1996) Le fluage en traction: un aspect important de la problématique des réparations minces en béton, Thèse de doctorat, Université Laval, Québec.

- Bissonnette, B., Therrien, Y., Pleau, R., Pigeon, M. et Saucier, F. (1998) Étude du potentiel de multifissuration dans des bétons renforcés de fibres d'acier, 3^e colloque international francophone sur les BRFM, Québec.
- Bissonnette, B., Pigeon, M. (1995) Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concretes, *Cement and concrete research*, vol. 25, n^o 5, p. 1075-1085.
- Cantin, R. (1997) Etude des propriétés à basse température et de la durabilité du béton armé de fibres d'acier, Thèse de doctorat, Université Laval, Québec.
- Chanvillard, G., Aïtcin, P.-C. et Lupien, C. (1989) Resurfaçage en béton renforcé de fibres d'acier, autoroute 40-comté de Kirkland, Études et recherches en transports, Ministère des transports du Québec.
- Chanvillard, G., Aïtcin, P.-C., Lupien, C. et Do, M.-T. (1994) Les resurfaçages minces adhérents en béton renforcé de fibres métalliques, *Les bétons renforcés de fibres métalliques*, Colloque francophone, Béthune, France, p. 93-104.
- Cho, B.-S., El-Shakra, Z.M. et Gopalaratnam, V.S. (1991) Failure of FRC in direct and indirect tensile test configurations, *International symposium on fatigue and fracture in steel and concrete structures*, p. 587-601.
- Emmons et Vaysburd (1994) Factors affecting the durability of concrete repair: the contractor's view point, *Const. and Building Mat.*, vol. 8, n^o 1, p. 5-16.
- Grzybowski, M. et Shah, S.P. (1990) Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete, *ACI Materials journal*, vol. 87, n^o 2, p. 138-148.
- Hannant, D.J. (1978) *Fiber cements and fiber concretes*, Wiley, Chichester (R.U.).
- Li, S.-H., Shah, S.P., Li, Z. et Mura, T. (1993) Micromechanical analysis of multiple fracture and evaluation of debonding behavior for fiber-reinforced composites, *International journal solids structures*, vol. 30, n^o 11, p. 1429-1459.
- Li, V.C. (1992) Postcrack scaling relations for fiber reinforced cementitious composites, *Journal of materials in civil engineering*, vol. 4, n^o 1, p. 41-57.

- Li, V.C. et Leung, C.K.Y. (1992) Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites. *Journal of engineering mechanics*, vol. 118, n° 9, p. 2246-2264.
- Li, V.C. et Wu, H.-C. (1992) Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites. *Applied mechanic reviews*, vol. 45, n° 8, p. 390-398.
- Marshall, D.B., Cox, B.N. et Evans, A.G. (1985) The mechanics of matrix cracking in brittle- matrix fiber composites, *Acta. metall.*, vol. 33, n° 11, p. 2013-2021.
- Mobasher, B., Stang, H. et Shah, S.P. (1990) Microcracking in fibre reinforced concrete, *Cement and concrete research*, vol. 20, p. 665-676.
- Neville, A. M. (1971) *Hardened concrete: physical and mechanical aspects*, American concrete institute, monograph n° 6.
- Neville, A. M. (1981) *Properties of concrete*, 3^e édition, Pitman Publishing Limited, Marshfield (MA) et Londres, 779p.
- Paillère, A.M., Buil, M. et Serrano, J.J. (1989) Effect of fiber addition on the autogeneous shrinkage of silica fume concrete, *ACI Materials journal*, vol. 86, n° 2, p. 139-144.
- Potter, J.C. (1985) Unique aspects of fiber-reinforced concrete pavements, *Proceedings, Third international conference on concrete pavement design and rehabilitation*, Purdue University, p. 103-106.
- Powers, T. C. (1968) The thermodynamics of volume change and creep, *Materials and structures*, vol. 1, n° 6, p. 487- 507.
- Rollings, R.S. (1993) Curling failures of steel-fiber-reinforced concrete slabs, *Journal of performance of constructed facilities*, vol.7, n°1, p.3-19.
- Radjy, F. F. (1974) *Swelling and shrinkage*, Technical university of Denmark, lectures notes.

- Ramakrishnan, V., Balaguru, P., Kostaneski, L. et Johnston, D. (1990) Field performance of fiber reinforced concrete highway pavements, Serviceability and durability of construction materials - Proceedings of the first materials engineering congress, ASCE, Denver, USA, p. 903-912.

- Rossi, P. (1997) Conversation personnelle.

- Saucier, F. (1990) Contribution à l'étude de l'adhérence des réparations en béton, Thèse de doctorat, Université Laval, Québec.

- Saucier, F., Mailhot, T. et Pigeon, M. (1996) Réflexion sur la capacité de survie après fissuration du béton armé de fibres soumis à une sollicitation de fatigue en flexion, 2^e colloque international francophone sur les BRFM, Toulouse, France, p. 97-106.

- Schroder, E.K. (1992) Mistakes, misconceptions and controversial issues concerning concrete and concrete repairs (part III), Concrete International, vol. 14, n^o 11, p. 54-59.

- Sedran, T. (1992) Étude de quelques paramètres concernant le béton projeté utilisé dans les réparations minces d'ouvrages atteints d'alcali-réaction, Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec.

- Shao, Y., Li, Z. et Shah, S.P. (1993) Matrix cracking and interface debonding in fiber-reinforced cement-matrix composites, Advanced cement based materials, vol. 1, n^o 2, p. 55-66.

- Swamy, R.N. Fracture mechanics applied to concrete, chapitre 6, p. 221-281.

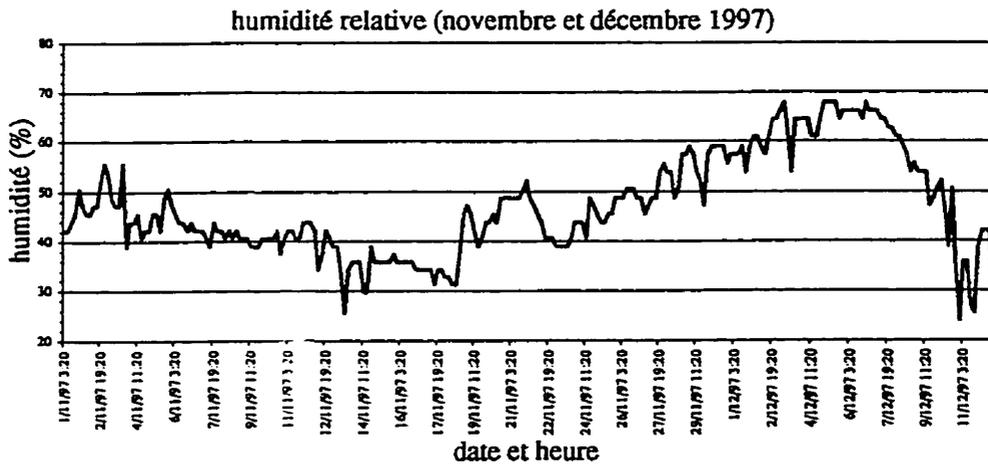
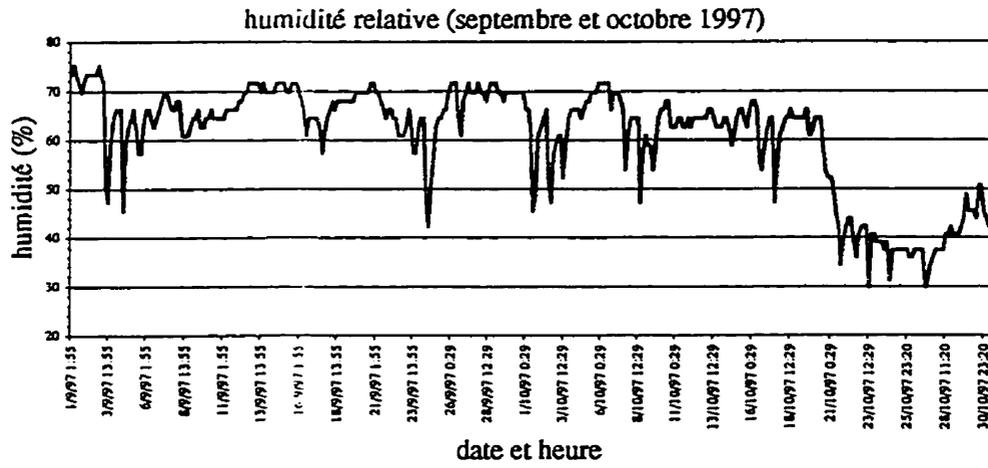
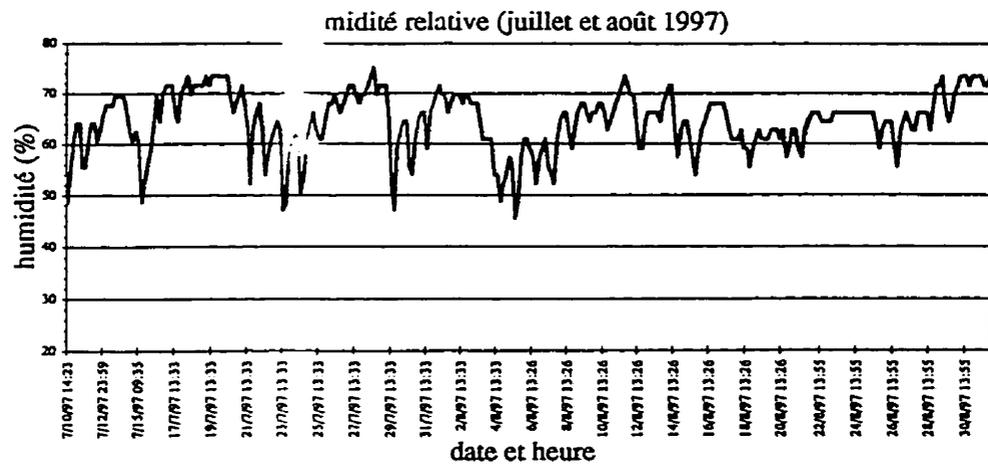
- Taerwe, L., Van Gysel, A., De Schutter, G. et Vyncke, J. (1996) Détermination de la teneur en fibres d'acier dans le béton frais et durci, 2^e colloque international francophone sur les bétons renforcés de fibres métalliques, Toulouse, p. 53-61.

- Tayabji, S.D. et Okamoto, P.A. (1985) Thickness design of concrete resurfacing, Proceedings, Third international conference on concrete pavement design and rehabilitation, Purdue University, p. 367-379.

- Tjiptobroto, P. et Hansen, W. (1993) Tensile strain hardening and multiple cracking in high-performance cement-based composites containing discontinuous fibers, ACI materials journal, vol. 90, n° 1, p. 16-25.
- Van Dam, T. (1995) Use of steel-fiber reinforced concrete in pavement structures, Transportation congress, Proceedings vol. 1, ASCE, New York, USA, p. 477-488.
- Wittmann, F. (1968) Surface tension shrinkage and strength of hardened cement paste, Materials and structures, vol. 1, n° 6, p. 547-552.
- Wu, H.-C. et Li, V.C. (1994) Trade-off between strength and ductility of random discontinuous fiber reinforced cementitious composites, Cement and concrete composites, vol. 16, n° 1, p. 23-29.

Annexe A:

**Variation de l'humidité relative et de la température
à l'intérieur du laboratoire de béton**



date et heure	humidité (%)	date et heure	humidité (%)	date et heure	humidité (%)
7/10/97 14:23	48,6	19/7/97 21:33	73,3	28/7/97 5:33	71,5
7/10/97 19:11	55,4	20/7/97 1:33	73,3	28/7/97 9:33	73,3
7/10/97 23:59	60,5	20/7/97 5:33	73,3	28/7/97 13:33	75,1
7/11/97 4:47	64,0	20/7/97 9:33	73,3	28/7/97 17:33	69,7
7/11/97 9:35	64,0	20/7/97 13:33	69,7	28/7/97 21:33	71,5
7/11/97 14:23	55,4	20/7/97 17:33	66,1	29/7/97 1:33	71,5
7/11/97 19:11	55,4	20/7/97 21:33	67,9	29/7/97 5:33	71,5
7/11/97 23:59	60,5	21/7/97 1:33	69,7	29/7/97 9:33	66,1
7/12/97 4:47	64,0	21/7/97 5:33	71,5	29/7/97 13:33	52,1
7/12/97 9:35	64,0	21/7/97 9:33	67,9	29/7/97 17:33	47,1
7/12/97 14:23	60,5	21/7/97 13:33	62,6	29/7/97 21:33	59,0
7/12/97 19:11	62,3	21/7/97 17:33	52,1	30/7/97 1:33	62,6
7/12/97 23:59	65,7	21/7/97 21:33	62,6	30/7/97 5:33	64,4
7/13/97 04:47	67,5	22/7/97 1:33	66,1	30/7/97 9:33	64,4
7/13/97 09:35	67,5	22/7/97 5:33	67,9	30/7/97 13:33	55,5
7/13/97 14:23	67,5	22/7/97 9:33	62,6	30/7/97 17:33	53,8
7/13/97 19:11	69,3	22/7/97 13:33	53,8	30/7/97 21:33	60,8
7/13/97 23:59	69,3	22/7/97 17:33	57,3	31/7/97 1:33	64,4
7/14/97 04:47	69,3	22/7/97 21:33	60,8	31/7/97 5:33	66,1
7/14/97 09:35	69,3	23/7/97 1:33	62,6	31/7/97 9:33	66,1
7/14/97 14:23	65,7	23/7/97 5:33	64,4	31/7/97 13:33	59,0
7/14/97 19:11	62,3	23/7/97 9:33	62,6	31/7/97 17:33	66,1
7/14/97 23:59	60,5	23/7/97 13:33	47,1	31/7/97 21:33	67,9
7/15/97 04:47	62,3	23/7/97 17:33	48,7	1/8/97 1:33	69,7
7/15/97 09:35	60,5	23/7/97 21:33	59,0	1/8/97 5:33	71,5
7/15/97 14:23	48,6	24/7/97 1:33	60,8	1/8/97 9:33	69,7
7/15/97 19:11	52,0	24/7/97 5:33	62,6	1/8/97 13:33	69,7
7/15/97 23:59	55,4	24/7/97 9:33	59,0	1/8/97 17:33	66,1
7/16/97 04:47	58,8	24/7/97 13:33	50,4	1/8/97 21:33	67,9
7/16/97 09:35	64,0	24/7/97 17:33	53,8	2/8/97 1:33	69,7
16/7/97 13:33	69,7	24/7/97 21:33	60,8	2/8/97 5:33	69,7
16/7/97 17:33	64,4	25/7/97 1:33	64,4	2/8/97 9:33	69,7
16/7/97 21:33	69,7	25/7/97 5:33	66,1	2/8/97 13:33	67,9
17/7/97 1:33	71,5	25/7/97 9:33	62,6	2/8/97 17:33	69,7
17/7/97 5:33	71,5	25/7/97 13:33	60,8	2/8/97 21:33	69,7
17/7/97 9:33	71,5	25/7/97 17:33	60,8	3/8/97 1:33	67,9
17/7/97 13:33	66,1	25/7/97 21:33	64,4	3/8/97 5:33	67,9
17/7/97 17:33	64,4	26/7/97 1:33	67,9	3/8/97 9:33	67,9
17/7/97 21:33	69,7	26/7/97 5:33	67,9	3/8/97 13:33	64,4
18/7/97 1:33	71,5	26/7/97 9:33	69,7	3/8/97 17:33	60,8
18/7/97 5:33	73,3	26/7/97 13:33	67,9	3/8/97 21:33	60,8
18/7/97 9:33	69,7	26/7/97 17:33	66,1	4/8/97 1:33	60,8
18/7/97 13:33	71,5	26/7/97 21:33	67,9	4/8/97 5:33	60,8
18/7/97 17:33	71,5	27/7/97 1:33	69,7	4/8/97 9:33	53,8
18/7/97 21:33	71,5	27/7/97 5:33	71,5	4/8/97 13:33	53,8
19/7/97 1:33	71,5	27/7/97 9:33	71,5	4/8/97 17:33	48,7
19/7/97 5:33	73,3	27/7/97 13:33	69,7	4/8/97 21:33	52,1
19/7/97 9:33	71,5	27/7/97 17:33	67,9	5/8/97 1:33	53,8
19/7/97 13:33	73,3	27/7/97 21:33	69,7	5/8/97 5:33	57,3
19/7/97 17:33	73,3	28/7/97 1:33	69,7	5/8/97 9:33	55,5

date et heure	humidité (%)	date et heure	humidité (%)	date et heure	humidité (%)
5/8/97 13:33	45,4	13/8/97 21:26	67,9	22/8/97 5:26	66,1
5/8/97 17:26	48,7	14/8/97 1:26	69,7	22/8/97 9:26	66,1
5/8/97 21:26	57,3	14/8/97 5:26	71,5	22/8/97 13:55	64,4
6/8/97 1:26	60,8	14/8/97 9:26	71,5	22/8/97 17:55	64,4
6/8/97 5:26	60,8	14/8/97 13:26	62,6	22/8/97 21:55	64,4
6/8/97 9:26	59,0	14/8/97 17:26	57,3	23/8/97 1:55	64,4
6/8/97 13:26	57,3	14/8/97 21:26	62,6	23/8/97 5:55	66,1
6/8/97 17:26	52,1	15/8/97 1:26	64,4	23/8/97 9:55	66,1
6/8/97 21:26	57,3	15/8/97 5:26	64,4	23/8/97 13:55	66,1
7/8/97 1:26	59,0	15/8/97 9:26	60,8	23/8/97 17:55	66,1
7/8/97 5:26	60,8	15/8/97 13:26	57,3	23/8/97 21:55	66,1
7/8/97 9:26	55,5	15/8/97 17:26	53,8	24/8/97 1:55	66,1
7/8/97 13:26	53,8	15/8/97 21:26	59,0	24/8/97 5:55	66,1
7/8/97 17:26	52,1	16/8/97 1:26	62,6	24/8/97 9:55	66,1
7/8/97 21:26	60,8	16/8/97 5:26	64,4	24/8/97 13:55	66,1
8/8/97 1:26	64,4	16/8/97 9:26	66,1	24/8/97 17:55	66,1
8/8/97 5:26	66,1	16/8/97 13:26	67,9	24/8/97 21:55	66,1
8/8/97 9:26	66,1	16/8/97 17:26	67,9	25/8/97 1:55	66,1
8/8/97 13:26	62,6	16/8/97 21:26	67,9	25/8/97 5:55	66,1
8/8/97 17:26	59,0	17/8/97 1:26	67,9	25/8/97 9:55	66,1
8/8/97 21:26	62,6	17/8/97 5:26	67,9	25/8/97 13:55	62,6
9/8/97 1:26	66,1	17/8/97 9:26	66,1	25/8/97 17:55	59,0
9/8/97 5:26	67,9	17/8/97 13:26	62,6	25/8/97 21:55	62,6
9/8/97 9:26	67,9	17/8/97 17:26	60,8	26/8/97 1:55	64,4
9/8/97 13:26	66,1	17/8/97 21:26	60,8	26/8/97 5:55	64,4
9/8/97 17:26	64,4	18/8/97 1:26	60,8	26/8/97 9:55	64,4
9/8/97 21:26	66,1	18/8/97 5:26	62,6	26/8/97 13:55	59,0
10/8/97 1:26	66,1	18/8/97 9:26	59,0	26/8/97 17:55	55,5
10/8/97 5:26	67,9	18/8/97 13:26	59,0	26/8/97 21:55	62,6
10/8/97 9:26	67,9	18/8/97 17:26	55,5	27/8/97 1:55	64,4
10/8/97 13:26	66,1	18/8/97 21:26	59,0	27/8/97 5:55	66,1
10/8/97 17:26	62,6	19/8/97 1:26	60,8	27/8/97 9:55	64,4
10/8/97 21:26	64,4	19/8/97 5:26	62,6	27/8/97 13:55	62,6
11/8/97 1:26	66,1	19/8/97 9:26	60,8	27/8/97 17:55	62,6
11/8/97 5:26	67,9	19/8/97 13:26	60,8	27/8/97 21:55	66,1
11/8/97 9:26	69,7	19/8/97 17:26	60,8	28/8/97 1:55	66,1
11/8/97 13:26	71,5	19/8/97 21:26	62,6	28/8/97 5:55	66,1
11/8/97 17:26	73,3	20/8/97 1:26	62,6	28/8/97 9:55	66,1
11/8/97 21:26	71,5	20/8/97 5:26	62,6	28/8/97 13:55	62,6
12/8/97 1:26	69,7	20/8/97 9:26	60,8	28/8/97 17:55	67,9
12/8/97 5:26	69,7	20/8/97 13:26	62,6	28/8/97 21:55	71,5
12/8/97 9:26	64,4	20/8/97 17:26	57,3	29/8/97 1:55	71,5
12/8/97 13:26	59,0	20/8/97 21:26	59,0	29/8/97 5:55	73,3
12/8/97 17:26	59,0	21/8/97 1:26	62,6	29/8/97 9:55	67,9
12/8/97 21:26	64,4	21/8/97 5:26	62,6	29/8/97 13:55	64,4
13/8/97 1:26	66,1	21/8/97 9:26	59,0	29/8/97 17:55	66,1
13/8/97 5:26	66,1	21/8/97 13:26	57,3	29/8/97 21:55	69,7
13/8/97 9:26	66,1	21/8/97 17:26	62,6	30/8/97 1:55	71,5
13/8/97 13:26	66,1	21/8/97 21:26	64,4	30/8/97 5:55	73,3
13/8/97 17:26	64,4	22/8/97 1:26	66,1	30/8/97 9:55	73,3

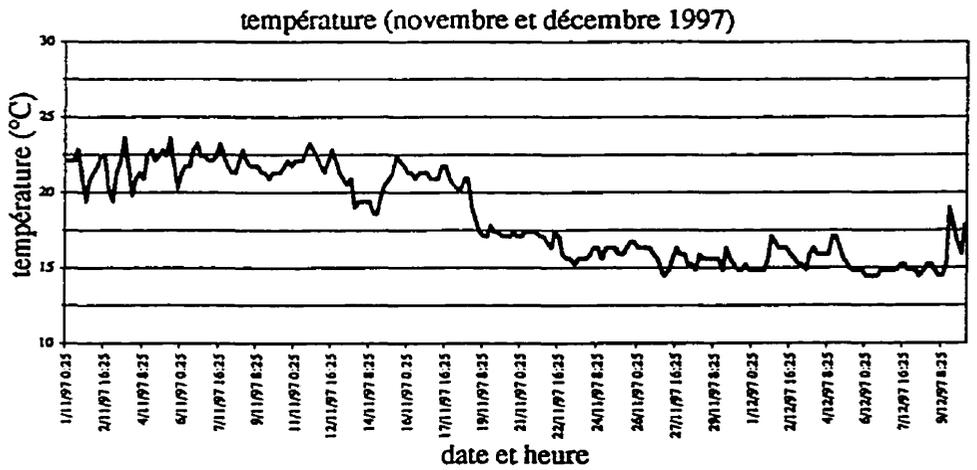
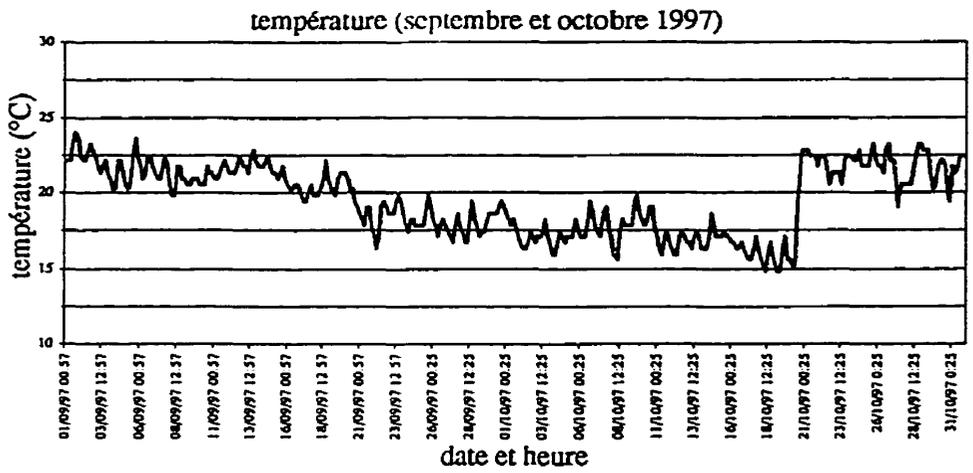
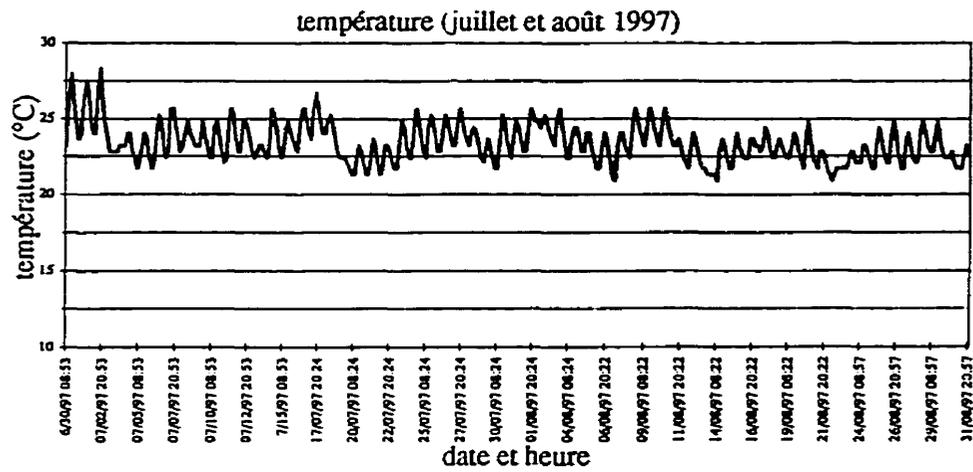
date et heure	humidité (%)	date et heure	humidité (%)	date et heure	humidité (%)
30/8/97 13:55	73,3	7/9/97 21:55	66,1	16/9/97 5:55	67,9
30/8/97 17:55	71,5	8/9/97 1:55	67,9	16/9/97 9:55	64,4
30/8/97 21:55	73,3	8/9/97 5:55	67,9	16/9/97 13:55	60,8
31/8/97 1:55	73,3	8/9/97 9:55	60,8	16/9/97 17:55	64,4
31/8/97 5:55	73,3	8/9/97 13:55	60,8	16/9/97 21:55	64,4
31/8/97 9:55	73,3	8/9/97 17:55	60,8	17/9/97 1:55	64,4
31/8/97 13:55	71,5	8/9/97 21:55	62,6	17/9/97 5:55	64,4
31/8/97 17:55	71,5	9/9/97 1:55	64,4	17/9/97 9:55	62,6
31/8/97 21:55	73,3	9/9/97 5:55	64,4	17/9/97 13:55	57,3
1/9/97 1:55	73,3	9/9/97 9:55	66,1	17/9/97 17:55	60,8
1/9/97 5:55	75,1	9/9/97 13:55	62,6	17/9/97 21:55	64,4
1/9/97 9:55	73,3	9/9/97 17:55	62,6	18/9/97 1:55	66,1
1/9/97 13:55	71,5	9/9/97 21:55	64,4	18/9/97 5:55	67,9
1/9/97 17:55	69,7	10/9/97 1:55	64,4	18/9/97 9:55	66,1
1/9/97 21:55	71,5	10/9/97 5:55	66,1	18/9/97 13:55	67,9
2/9/97 1:55	73,3	10/9/97 9:55	64,4	18/9/97 17:55	67,9
2/9/97 5:55	73,3	10/9/97 13:55	64,4	18/9/97 21:55	67,9
2/9/97 9:55	73,3	10/9/97 17:55	64,4	19/9/97 1:55	67,9
2/9/97 13:55	73,3	10/9/97 21:55	64,4	19/9/97 5:55	67,9
2/9/97 17:55	73,3	11/9/97 1:55	64,4	19/9/97 9:55	67,9
2/9/97 21:55	75,1	11/9/97 5:55	66,1	19/9/97 13:55	67,9
3/9/97 1:55	73,3	11/9/97 9:55	66,1	19/9/97 17:55	69,7
3/9/97 5:55	71,5	11/9/97 13:55	66,1	19/9/97 21:55	69,7
3/9/97 9:55	50,4	11/9/97 17:55	66,1	20/9/97 1:55	69,7
3/9/97 13:55	47,1	11/9/97 21:55	66,1	20/9/97 5:55	69,7
3/9/97 17:55	59,0	12/9/97 1:55	67,9	20/9/97 9:55	69,7
3/9/97 21:55	64,4	12/9/97 5:55	67,9	20/9/97 13:55	69,7
4/9/97 1:55	66,1	12/9/97 9:55	69,7	20/9/97 17:55	71,5
4/9/97 5:55	66,1	12/9/97 13:55	69,7	20/9/97 21:55	71,5
4/9/97 9:55	66,1	12/9/97 17:55	71,5	21/9/97 1:55	69,7
4/9/97 13:55	45,4	12/9/97 21:55	71,5	21/9/97 5:55	69,7
4/9/97 17:55	59,0	13/9/97 1:55	71,5	21/9/97 9:55	67,9
4/9/97 21:55	62,6	13/9/97 5:55	71,5	21/9/97 13:55	66,1
5/9/97 1:55	64,4	13/9/97 9:55	71,5	21/9/97 17:55	64,4
5/9/97 5:55	66,1	13/9/97 13:55	69,7	21/9/97 21:55	66,1
5/9/97 9:55	62,6	13/9/97 17:55	71,5	22/9/97 1:55	66,1
5/9/97 13:55	57,3	13/9/97 21:55	69,7	22/9/97 5:55	64,4
5/9/97 17:55	57,3	14/9/97 1:55	69,7	22/9/97 9:55	64,4
5/9/97 21:55	62,6	14/9/97 5:55	69,7	22/9/97 13:55	60,8
6/9/97 1:55	66,1	14/9/97 9:55	69,7	22/9/97 17:55	60,8
6/9/97 5:55	66,1	14/9/97 13:55	71,5	22/9/97 21:55	60,8
6/9/97 9:55	64,4	14/9/97 17:55	71,5	23/9/97 1:55	62,6
6/9/97 13:55	62,6	14/9/97 21:55	71,5	23/9/97 5:55	66,1
6/9/97 17:55	64,4	15/9/97 1:55	71,5	23/9/97 9:55	64,4
6/9/97 21:55	66,1	15/9/97 5:55	69,7	23/9/97 13:55	57,3
7/9/97 1:55	67,9	15/9/97 9:55	69,7	23/9/97 17:55	57,3
7/9/97 5:55	69,7	15/9/97 13:55	71,5	23/9/97 21:55	62,6
7/9/97 9:55	69,7	15/9/97 17:55	71,5	24/9/97 1:55	64,4
7/9/97 13:55	67,9	15/9/97 21:55	71,5	24/9/97 5:55	64,4
7/9/97 17:55	66,1	16/9/97 1:55	69,7	24/9/97 9:55	47,1

date et heure	humidité (%)	date et heure	humidité (%)	date et heure	humidité (%)
24/9/97 13:55	42,1	2/10/97 20:29	57,3	11/10/97 4:29	64,4
24/9/97 17:55	50,4	3/10/97 0:29	59,0	11/10/97 8:29	64,4
24/9/97 21:55	57,3	3/10/97 4:29	60,8	11/10/97 12:29	62,6
25/9/97 1:55	62,6	3/10/97 8:29	60,8	11/10/97 16:29	62,6
25/9/97 5:55	64,4	3/10/97 12:29	52,1	11/10/97 20:29	64,4
25/9/97 9:55	64,4	3/10/97 16:29	59,0	12/10/97 0:29	62,6
25/9/97 13:55	66,1	3/10/97 20:29	64,4	12/10/97 4:29	64,4
25/9/97 16:29	66,1	4/10/97 0:29	66,1	12/10/97 8:29	64,4
25/9/97 20:29	69,7	4/10/97 4:29	66,1	12/10/97 12:29	64,4
26/9/97 0:29	71,5	4/10/97 8:29	66,1	12/10/97 16:29	64,4
26/9/97 4:29	71,5	4/10/97 12:29	66,1	12/10/97 20:29	64,4
26/9/97 8:29	71,5	4/10/97 16:29	64,4	13/10/97 0:29	64,4
26/9/97 12:29	64,4	4/10/97 20:29	66,1	13/10/97 4:29	66,1
26/9/97 16:29	60,8	5/10/97 0:29	67,9	13/10/97 8:29	66,1
26/9/97 20:29	67,9	5/10/97 4:29	67,9	13/10/97 12:29	64,4
27/9/97 0:29	69,7	5/10/97 8:29	69,7	13/10/97 16:29	62,6
27/9/97 4:29	71,5	5/10/97 12:29	69,7	13/10/97 20:29	62,6
27/9/97 8:29	69,7	5/10/97 16:29	69,7	14/10/97 0:29	62,6
27/9/97 12:29	69,7	5/10/97 20:29	71,5	14/10/97 4:29	64,4
27/9/97 16:29	69,7	6/10/97 0:29	71,5	14/10/97 8:29	64,4
27/9/97 20:29	71,5	6/10/97 4:29	71,5	14/10/97 12:29	62,6
28/9/97 0:29	69,7	6/10/97 8:29	71,5	14/10/97 16:29	59,0
28/9/97 4:29	69,7	6/10/97 12:29	71,5	14/10/97 20:29	60,8
28/9/97 8:29	67,9	6/10/97 16:29	66,1	15/10/97 0:29	64,4
28/9/97 12:29	69,7	6/10/97 20:29	69,7	15/10/97 4:29	66,1
28/9/97 16:29	71,5	7/10/97 0:29	69,7	15/10/97 8:29	66,1
28/9/97 20:29	71,5	7/10/97 4:29	69,7	15/10/97 12:29	64,4
29/9/97 0:29	71,5	7/10/97 8:29	67,9	15/10/97 16:29	62,6
29/9/97 4:29	69,7	7/10/97 12:29	66,1	15/10/97 20:29	66,1
29/9/97 8:29	69,7	7/10/97 16:29	53,8	16/10/97 0:29	67,9
29/9/97 12:29	67,9	7/10/97 20:29	60,8	16/10/97 4:29	67,9
29/9/97 16:29	69,7	8/10/97 0:29	64,4	16/10/97 8:29	66,1
29/9/97 20:29	69,7	8/10/97 4:29	64,4	16/10/97 12:29	55,5
30/9/97 0:29	69,7	8/10/97 8:29	64,4	16/10/97 16:29	53,8
30/9/97 4:29	69,7	8/10/97 12:29	64,4	16/10/97 20:29	59,0
30/9/97 8:29	69,7	8/10/97 16:29	47,1	17/10/97 0:29	62,6
30/9/97 12:29	69,7	8/10/97 20:29	57,3	17/10/97 4:29	64,4
30/9/97 16:29	69,7	9/10/97 0:29	60,8	17/10/97 8:29	64,4
30/9/97 20:29	69,7	9/10/97 4:29	59,0	17/10/97 12:29	47,1
1/10/97 0:29	66,1	9/10/97 8:29	59,0	17/10/97 16:29	53,8
1/10/97 4:29	66,1	9/10/97 12:29	53,8	17/10/97 20:29	60,8
1/10/97 8:29	62,6	9/10/97 16:29	59,0	18/10/97 0:29	62,6
1/10/97 12:29	45,4	9/10/97 20:29	64,4	18/10/97 4:29	64,4
1/10/97 16:29	48,7	10/10/97 0:29	66,1	18/10/97 8:29	64,4
1/10/97 20:29	60,8	10/10/97 4:29	66,1	18/10/97 12:29	66,1
2/10/97 0:29	62,6	10/10/97 8:29	67,9	18/10/97 16:29	64,4
2/10/97 4:29	64,4	10/10/97 12:29	67,9	18/10/97 20:29	64,4
2/10/97 8:29	66,1	10/10/97 16:29	62,6	19/10/97 0:29	64,4
2/10/97 12:29	52,1	10/10/97 20:29	62,6	19/10/97 4:29	64,4
2/10/97 16:29	47,1	11/10/97 0:29	62,6	19/10/97 8:29	64,4

date et heure	humidité (%)	date et heure	humidité (%)	date et heure	humidité (%)
19/10/97 12:29	66,1	27/10/97 19:20	37,3	5/11/97 3:20	45,4
19/10/97 16:29	60,8	27/10/97 23:20	37,3	5/11/97 7:20	45,4
19/10/97 20:29	62,6	28/10/97 3:20	37,3	5/11/97 11:20	42,1
20/10/97 0:29	64,4	28/10/97 7:20	37,3	5/11/97 15:20	48,7
20/10/97 4:29	64,4	28/10/97 11:20	40,5	5/11/97 19:20	50,4
20/10/97 8:29	64,4	28/10/97 15:20	40,5	5/11/97 23:20	47,1
20/10/97 12:29	59,0	28/10/97 19:20	42,1	6/11/97 3:20	45,4
20/10/97 16:29	53,8	28/10/97 23:20	40,5	6/11/97 7:20	43,8
20/10/97 20:29	52,1	29/10/97 3:20	40,5	6/11/97 11:20	43,8
21/10/97 0:29	52,1	29/10/97 7:20	40,5	6/11/97 15:20	42,1
21/10/97 4:29	50,4	29/10/97 11:20	42,1	6/11/97 19:20	43,8
21/10/97 8:29	45,4	29/10/97 15:20	43,8	6/11/97 23:20	42,1
21/10/97 12:29	42,1	29/10/97 19:20	48,7	7/11/97 3:20	42,1
21/10/97 16:29	34,2	29/10/97 23:20	45,4	7/11/97 7:20	42,1
21/10/97 20:29	38,9	30/10/97 3:20	45,4	7/11/97 11:20	40,5
22/10/97 0:29	42,1	30/10/97 7:20	45,4	7/11/97 15:20	38,9
22/10/97 4:29	43,8	30/10/97 11:20	43,8	7/11/97 19:20	43,8
22/10/97 8:29	43,8	30/10/97 15:20	50,4	7/11/97 23:20	42,1
22/10/97 12:29	38,9	30/10/97 19:20	50,4	8/11/97 3:20	42,1
22/10/97 16:29	35,8	30/10/97 23:20	45,4	8/11/97 7:20	40,5
22/10/97 20:29	40,5	31/10/97 3:20	43,8	8/11/97 11:20	42,1
23/10/97 0:29	42,1	31/10/97 7:20	42,1	8/11/97 15:20	40,5
23/10/97 4:29	42,1	31/10/97 11:20	42,1	8/11/97 19:20	42,1
23/10/97 8:29	42,1	31/10/97 15:20	42,1	8/11/97 23:20	40,5
23/10/97 12:29	29,7	31/10/97 19:20	42,1	9/11/97 3:20	40,5
23/10/97 16:29	40,5	31/10/97 23:20	42,1	9/11/97 7:20	40,5
23/10/97 20:29	40,5	1/11/97 3:20	42,1	9/11/97 11:20	38,9
24/10/97 0:29	38,9	1/11/97 7:20	42,1	9/11/97 15:20	38,9
24/10/97 4:29	38,9	1/11/97 11:20	43,8	9/11/97 19:20	38,9
24/10/97 8:29	38,9	1/11/97 15:20	45,4	9/11/97 23:20	40,5
24/10/97 11:20	37,3	1/11/97 19:20	50,4	10/11/97 3:20	40,5
24/10/97 15:20	38,9	1/11/97 23:20	47,1	10/11/97 7:20	40,5
24/10/97 19:20	31,1	2/11/97 3:20	45,4	10/11/97 11:20	40,5
24/10/97 23:20	37,3	2/11/97 7:20	45,4	10/11/97 15:20	42,1
25/10/97 3:20	37,3	2/11/97 11:20	47,1	10/11/97 19:20	37,3
25/10/97 7:20	37,3	2/11/97 15:20	47,1	10/11/97 23:20	40,5
25/10/97 11:20	37,3	2/11/97 19:20	52,1	11/11/97 3:20	42,1
25/10/97 15:20	37,3	2/11/97 23:20	55,5	11/11/97 7:20	42,1
25/10/97 19:20	37,3	3/11/97 3:20	53,8	11/11/97 11:20	40,5
25/10/97 23:20	37,3	3/11/97 7:20	48,7	11/11/97 15:20	40,5
26/10/97 3:20	35,8	3/11/97 11:20	47,1	11/11/97 19:20	43,8
26/10/97 7:20	35,8	3/11/97 15:20	47,1	11/11/97 23:20	43,8
26/10/97 11:20	37,3	3/11/97 19:20	55,5	12/11/97 3:20	43,8
26/10/97 15:20	37,3	3/11/97 23:20	38,9	12/11/97 7:20	42,1
26/10/97 19:20	37,3	4/11/97 3:20	43,8	12/11/97 11:20	34,2
26/10/97 23:20	37,3	4/11/97 7:20	43,8	12/11/97 15:20	37,3
27/10/97 3:20	29,7	4/11/97 11:20	45,4	12/11/97 19:20	42,1
27/10/97 7:20	31,1	4/11/97 15:20	40,5	12/11/97 23:20	40,5
27/10/97 11:20	34,2	4/11/97 19:20	42,1	13/11/97 3:20	38,9
27/10/97 15:20	35,8	4/11/97 23:20	42,1	13/11/97 7:20	38,9

date et heure	humidité (%)	date et heure	humidité (%)	date et heure	humidité (%)
13/11/97 11:20	34,2	21/11/97 19:20	52,1	30/11/97 3:20	59,0
13/11/97 15:20	25,4	21/11/97 23:20	48,7	30/11/97 7:20	59,0
13/11/97 19:20	34,2	22/11/97 3:20	47,1	30/11/97 11:20	59,0
13/11/97 23:20	35,8	22/11/97 7:20	45,4	30/11/97 15:20	59,0
14/11/97 3:20	35,8	22/11/97 11:20	43,8	30/11/97 19:20	55,5
14/11/97 7:20	35,8	22/11/97 15:20	40,5	30/11/97 23:20	57,3
14/11/97 11:20	29,7	22/11/97 19:20	40,5	1/12/97 3:20	57,3
14/11/97 15:20	29,7	22/11/97 23:20	40,5	1/12/97 7:20	57,3
14/11/97 19:20	38,9	23/11/97 3:20	38,9	1/12/97 11:20	59,0
14/11/97 23:20	35,8	23/11/97 7:20	38,9	1/12/97 15:20	53,8
15/11/97 3:20	35,8	23/11/97 11:20	38,9	1/12/97 19:20	59,0
15/11/97 7:20	35,8	23/11/97 15:20	38,9	1/12/97 23:20	60,8
15/11/97 11:20	35,8	23/11/97 19:20	40,5	2/12/97 3:20	60,8
15/11/97 15:20	35,8	23/11/97 23:20	43,8	2/12/97 7:20	59,0
15/11/97 19:20	37,3	24/11/97 3:20	43,8	2/12/97 11:20	57,3
15/11/97 23:20	35,8	24/11/97 7:20	43,8	2/12/97 15:20	60,8
16/11/97 3:20	35,8	24/11/97 11:20	40,5	2/12/97 19:20	64,4
16/11/97 7:20	35,8	24/11/97 15:20	48,7	2/12/97 23:20	64,4
16/11/97 11:20	35,8	24/11/97 19:20	47,1	3/12/97 3:20	66,1
16/11/97 15:20	35,8	24/11/97 23:20	45,4	3/12/97 7:20	67,9
16/11/97 19:20	34,2	25/11/97 3:20	43,8	3/12/97 11:20	62,6
16/11/97 23:20	34,2	25/11/97 7:20	43,8	3/12/97 15:20	53,8
17/11/97 3:20	34,2	25/11/97 11:20	45,4	3/12/97 19:20	64,4
17/11/97 7:20	34,2	25/11/97 15:20	45,4	3/12/97 23:20	64,4
17/11/97 11:20	34,2	25/11/97 19:20	48,7	4/12/97 3:20	64,4
17/11/97 15:20	31,1	25/11/97 23:20	48,7	4/12/97 7:20	64,4
17/11/97 19:20	34,2	26/11/97 3:20	48,7	4/12/97 11:20	60,8
17/11/97 23:20	34,2	26/11/97 7:20	50,4	4/12/97 15:20	60,8
18/11/97 3:20	32,6	26/11/97 11:20	50,4	4/12/97 19:20	64,4
18/11/97 7:20	32,6	26/11/97 15:20	50,4	4/12/97 23:20	67,9
18/11/97 11:20	31,1	26/11/97 19:20	48,7	5/12/97 3:20	67,9
18/11/97 15:20	31,1	26/11/97 23:20	48,7	5/12/97 7:20	67,9
18/11/97 19:20	37,3	27/11/97 3:20	45,4	5/12/97 11:20	67,9
18/11/97 23:20	45,4	27/11/97 7:20	47,1	5/12/97 15:20	64,4
19/11/97 3:20	47,1	27/11/97 11:20	48,7	5/12/97 19:20	66,1
19/11/97 7:20	45,4	27/11/97 15:20	48,7	5/12/97 23:20	66,1
19/11/97 11:20	42,1	27/11/97 19:20	53,8	6/12/97 3:20	66,1
19/11/97 15:20	38,9	27/11/97 23:20	55,5	6/12/97 7:20	66,1
19/11/97 19:20	40,5	28/11/97 3:20	53,8	6/12/97 11:20	66,1
19/11/97 23:20	43,8	28/11/97 7:20	53,8	6/12/97 15:20	64,4
20/11/97 3:20	43,8	28/11/97 11:20	48,7	6/12/97 19:20	67,9
20/11/97 7:20	45,4	28/11/97 15:20	50,4	6/12/97 23:20	66,1
20/11/97 11:20	43,8	28/11/97 19:20	57,3	7/12/97 3:20	66,1
20/11/97 15:20	48,7	28/11/97 23:20	57,3	7/12/97 7:20	66,1
20/11/97 19:20	48,7	29/11/97 3:20	59,0	7/12/97 11:20	64,4
20/11/97 23:20	48,7	29/11/97 7:20	57,3	7/12/97 15:20	64,4
21/11/97 3:20	48,7	29/11/97 11:20	53,8	7/12/97 19:20	62,6
21/11/97 7:20	48,7	29/11/97 15:20	52,1	7/12/97 23:20	62,6
21/11/97 11:20	48,7	29/11/97 19:20	47,1	8/12/97 3:20	60,8
21/11/97 15:20	50,4	29/11/97 23:20	57,3	8/12/97 7:20	60,8

date et heure	humidité (%)
8/12/97 11:20	59,0
8/12/97 15:20	57,3
8/12/97 19:20	53,8
8/12/97 23:20	55,5
9/12/97 3:20	53,8
9/12/97 7:20	53,8
9/12/97 11:20	53,8
9/12/97 15:20	47,1
9/12/97 19:20	48,7
9/12/97 23:20	50,4
10/12/97 3:20	52,1
10/12/97 7:20	47,1
10/12/97 11:20	38,9
10/12/97 15:20	50,4
10/12/97 19:20	35,8
10/12/97 23:20	23,9
11/12/97 3:20	35,8
11/12/97 7:20	35,8
11/12/97 11:20	26,8
11/12/97 15:20	25,4
11/12/97 19:20	38,9
11/12/97 23:20	42,1
12/12/97 3:20	42,1
12/12/97 7:20	42,1
12/12/97 11:20	25,4



date et heure	température (°C)	date et heure	température (°C)	date et heure	température (°C)
6/30/97 08:53	23,2	07/08/97 16:53	24,8	17/07/97 00:24	24,8
6/30/97 12:53	26,3	07/08/97 20:53	24,0	17/07/97 04:24	24,0
6/30/97 16:53	27,9	07/09/97 00:53	23,6	17/07/97 08:24	23,6
6/30/97 20:53	26,3	07/09/97 04:53	23,2	17/07/97 12:24	25,6
07/01/97 00:53	24,8	07/09/97 08:53	23,2	17/07/97 16:24	26,7
07/01/97 04:53	23,6	07/09/97 12:53	23,2	17/07/97 20:24	25,9
07/01/97 08:53	24,0	07/09/97 16:53	24,8	18/07/97 00:24	24,8
07/01/97 12:53	26,3	07/09/97 20:53	24,0	18/07/97 04:24	24,0
07/01/97 16:53	27,5	07/10/97 00:53	23,2	18/07/97 08:24	24,0
07/01/97 20:53	26,7	07/10/97 04:53	22,4	18/07/97 12:24	24,8
07/02/97 00:53	24,8	07/10/97 08:53	22,4	18/07/97 16:24	25,2
07/02/97 04:53	24,0	07/10/97 12:53	24,4	18/07/97 20:24	24,8
07/02/97 08:53	24,0	07/10/97 16:53	24,8	19/07/97 00:24	23,6
07/02/97 12:53	27,1	07/10/97 20:53	24,0	19/07/97 04:24	22,8
07/02/97 16:53	28,3	07/11/97 00:53	22,8	19/07/97 08:24	22,4
07/02/97 20:53	25,9	07/11/97 04:53	22,1	19/07/97 12:24	22,4
07/03/97 00:53	24,8	07/11/97 08:53	22,4	19/07/97 16:24	22,4
07/03/97 04:53	23,6	07/11/97 12:53	24,8	19/07/97 20:24	22,1
07/03/97 08:53	22,8	07/11/97 16:53	25,6	20/07/97 00:24	21,7
07/03/97 12:53	22,8	07/11/97 20:53	25,2	20/07/97 04:24	21,3
07/03/97 16:53	22,8	07/12/97 00:53	23,6	20/07/97 08:24	21,3
07/03/97 20:53	22,8	07/12/97 04:53	22,8	20/07/97 12:24	22,4
07/04/97 00:53	23,2	07/12/97 08:53	22,8	20/07/97 16:24	23,2
07/04/97 04:53	23,2	07/12/97 12:53	24,8	20/07/97 20:24	22,8
07/04/97 08:53	23,2	07/12/97 16:53	24,8	21/07/97 00:24	22,1
07/04/97 12:53	24,0	07/12/97 20:53	24,4	21/07/97 04:24	21,3
07/04/97 16:53	24,0	7/13/97 00:53	23,6	21/07/97 08:24	21,3
07/04/97 20:53	22,8	7/13/97 04:53	22,8	21/07/97 12:24	22,4
07/05/97 00:53	22,4	7/13/97 08:53	22,4	21/07/97 16:24	23,6
07/05/97 04:53	21,7	7/13/97 12:53	22,8	21/07/97 20:24	23,2
07/05/97 08:53	22,1	7/13/97 16:53	23,2	22/07/97 00:24	22,1
07/05/97 12:53	23,2	7/13/97 20:53	23,2	22/07/97 04:24	21,3
07/05/97 16:53	24,0	7/14/97 00:53	22,8	22/07/97 08:24	21,7
07/05/97 20:53	23,6	7/14/97 04:53	22,4	22/07/97 12:24	23,2
07/06/97 00:53	22,4	7/14/97 08:53	22,8	22/07/97 16:24	23,2
07/06/97 04:53	21,7	7/14/97 12:53	25,6	22/07/97 20:24	22,8
07/06/97 08:53	22,1	7/14/97 16:53	25,2	23/07/97 00:24	22,1
07/06/97 12:53	24,0	7/14/97 20:53	24,4	23/07/97 04:24	21,7
07/06/97 16:53	25,2	7/15/97 00:53	23,2	23/07/97 08:24	21,7
07/06/97 20:53	24,8	7/15/97 04:53	22,4	23/07/97 12:24	23,6
07/07/97 00:53	23,2	7/15/97 08:53	22,8	23/07/97 16:24	24,8
07/07/97 04:53	22,4	7/15/97 12:53	24,4	23/07/97 20:24	24,4
07/07/97 08:53	22,8	7/15/97 16:53	24,8	24/07/97 00:24	23,2
07/07/97 12:53	25,6	7/15/97 20:53	24,0	24/07/97 04:24	22,4
07/07/97 16:53	25,6	7/16/97 00:53	23,6	24/07/97 08:24	22,4
07/07/97 20:53	24,8	7/16/97 04:53	23,2	24/07/97 12:24	24,4
07/08/97 00:53	23,6	7/16/97 08:53	22,8	24/07/97 16:24	25,6
07/08/97 04:53	22,8	16/07/97 12:24	24,4	24/07/97 20:24	24,8
07/08/97 08:53	23,2	16/07/97 16:24	25,6	25/07/97 00:24	23,6
07/08/97 12:53	24,0	16/07/97 20:24	25,6	25/07/97 04:24	22,8

date et heure	température (°C)	date et heure	température (°C)	date et heure	température (°C)
25/07/97 08:24	22,4	02/08/97 16:24	25,2	11/08/97 00:22	24,4
25/07/97 12:24	24,4	02/08/97 20:24	24,8	11/08/97 04:22	23,6
25/07/97 16:24	25,2	03/08/97 00:24	24,0	11/08/97 08:22	23,2
25/07/97 20:24	24,8	03/08/97 04:24	23,6	11/08/97 12:22	23,2
26/07/97 00:24	23,6	03/08/97 08:24	23,2	11/08/97 16:22	23,6
26/07/97 04:24	22,8	03/08/97 12:24	24,8	11/08/97 20:22	23,2
26/07/97 08:24	22,8	03/08/97 16:24	25,6	12/08/97 00:22	22,4
26/07/97 12:24	24,0	03/08/97 20:24	24,8	12/08/97 04:22	22,1
26/07/97 16:24	25,2	04/08/97 00:24	23,6	12/08/97 08:22	21,7
26/07/97 20:24	24,8	04/08/97 04:24	22,4	12/08/97 12:22	22,8
27/07/97 00:24	24,0	04/08/97 08:24	22,4	12/08/97 16:22	24,0
27/07/97 04:24	23,2	04/08/97 12:24	23,6	12/08/97 20:22	23,6
27/07/97 08:24	23,2	04/08/97 16:24	24,4	13/08/97 00:22	22,8
27/07/97 12:24	24,4	04/08/97 20:24	24,4	13/08/97 04:22	22,1
27/07/97 16:24	25,6	05/08/97 00:24	23,6	13/08/97 08:22	21,7
27/07/97 20:24	25,2	05/08/97 04:24	22,8	13/08/97 12:22	21,7
28/07/97 00:24	24,0	05/08/97 08:24	22,8	13/08/97 16:22	21,3
28/07/97 04:24	23,6	05/08/97 12:24	24,0	13/08/97 20:22	21,3
28/07/97 08:24	23,2	05/08/97 16:22	24,0	14/08/97 00:22	21,3
28/07/97 12:24	24,0	05/08/97 20:22	23,2	14/08/97 04:22	21,3
28/07/97 16:24	24,4	06/08/97 00:22	22,4	14/08/97 08:22	20,9
28/07/97 20:24	24,0	06/08/97 04:22	21,7	14/08/97 12:22	22,8
29/07/97 00:24	23,2	06/08/97 08:22	21,7	14/08/97 16:22	23,6
29/07/97 04:24	22,4	06/08/97 12:22	22,8	14/08/97 20:22	23,2
29/07/97 08:24	22,1	06/08/97 16:22	24,0	15/08/97 00:22	22,4
29/07/97 12:24	22,8	06/08/97 20:22	23,6	15/08/97 04:22	21,7
29/07/97 16:24	23,6	07/08/97 00:22	22,4	15/08/97 08:22	21,7
29/07/97 20:24	23,2	07/08/97 04:22	21,3	15/08/97 12:22	22,8
30/07/97 00:24	22,4	07/08/97 08:22	20,9	15/08/97 16:22	24,0
30/07/97 04:24	21,7	07/08/97 12:22	23,2	15/08/97 20:22	23,2
30/07/97 08:24	21,7	07/08/97 16:22	24,0	16/08/97 00:22	22,8
30/07/97 12:24	23,6	07/08/97 20:22	24,0	16/08/97 04:22	22,4
30/07/97 16:24	25,2	08/08/97 00:22	23,2	16/08/97 08:22	22,4
30/07/97 20:24	24,8	08/08/97 04:22	22,8	16/08/97 12:22	22,4
31/07/97 00:24	23,6	08/08/97 08:22	22,4	16/08/97 16:22	23,6
31/07/97 04:24	22,8	08/08/97 12:22	24,4	16/08/97 20:22	23,6
31/07/97 08:24	22,4	08/08/97 16:22	25,6	17/08/97 00:22	23,2
31/07/97 12:24	24,0	08/08/97 20:22	25,2	17/08/97 04:22	23,2
31/07/97 16:24	24,8	09/08/97 00:22	24,4	17/08/97 08:22	22,8
31/07/97 20:24	24,4	09/08/97 04:22	23,6	17/08/97 12:22	23,2
01/08/97 00:24	23,6	09/08/97 08:22	23,2	17/08/97 16:22	24,4
01/08/97 04:24	22,8	09/08/97 12:22	24,4	17/08/97 20:22	24,0
01/08/97 08:24	22,8	09/08/97 16:22	25,6	18/08/97 00:22	23,2
01/08/97 12:24	24,4	09/08/97 20:22	25,2	18/08/97 04:22	22,4
01/08/97 16:24	25,6	10/08/97 00:22	24,4	18/08/97 08:22	22,4
01/08/97 20:24	25,2	10/08/97 04:22	23,6	18/08/97 12:22	23,2
02/08/97 00:24	24,8	10/08/97 08:22	23,2	18/08/97 16:22	23,6
02/08/97 04:24	24,8	10/08/97 12:22	24,4	18/08/97 20:22	23,2
02/08/97 08:24	24,4	10/08/97 16:22	25,6	19/08/97 00:22	22,8
02/08/97 12:24	24,8	10/08/97 20:22	25,2	19/08/97 04:22	22,4

date et heure	température (°C)	date et heure	température (°C)	date et heure	température (°C)
19/08/97 08:22	22,4	27/08/97 16:57	24,0	05/09/97 00:57	20,5
19/08/97 12:22	23,2	27/08/97 20:57	23,2	05/09/97 04:57	20,2
19/08/97 16:22	24,0	28/08/97 00:57	22,4	05/09/97 08:57	20,5
19/08/97 20:22	23,6	28/08/97 04:57	22,1	05/09/97 12:57	22,4
20/08/97 00:22	22,8	28/08/97 08:57	22,4	05/09/97 16:57	23,6
20/08/97 04:22	22,1	28/08/97 12:57	24,4	05/09/97 20:57	22,4
20/08/97 08:22	21,7	28/08/97 16:57	24,8	06/09/97 00:57	21,7
20/08/97 12:22	23,6	28/08/97 20:57	24,0	06/09/97 04:57	20,9
20/08/97 16:22	24,8	29/08/97 00:57	23,2	06/09/97 08:57	21,3
20/08/97 20:22	23,6	29/08/97 04:57	22,8	06/09/97 12:57	22,4
21/08/97 00:22	22,4	29/08/97 08:57	22,8	06/09/97 16:57	22,4
21/08/97 04:22	22,1	29/08/97 12:57	24,0	06/09/97 20:57	21,7
21/08/97 08:22	21,7	29/08/97 16:57	24,8	07/09/97 00:57	21,3
21/08/97 12:22	22,8	29/08/97 20:57	23,6	07/09/97 04:57	20,9
21/08/97 16:22	22,8	30/08/97 00:57	22,8	07/09/97 08:57	20,9
21/08/97 20:22	22,4	30/08/97 04:57	22,4	07/09/97 12:57	21,7
22/08/97 00:22	21,7	30/08/97 08:57	22,4	07/09/97 16:57	22,4
22/08/97 04:22	21,3	30/08/97 12:57	22,4	07/09/97 20:57	21,7
22/08/97 08:22	20,9	30/08/97 16:57	22,8	08/09/97 00:57	20,5
22/08/97 12:57	21,3	30/08/97 20:57	22,1	08/09/97 04:57	19,8
22/08/97 16:57	21,7	31/08/97 00:57	21,7	08/09/97 08:57	19,8
22/08/97 20:57	21,7	31/08/97 04:57	21,7	08/09/97 12:57	21,7
23/08/97 00:57	21,7	31/08/97 08:57	21,7	08/09/97 16:57	21,7
23/08/97 04:57	21,7	31/08/97 12:57	22,4	08/09/97 20:57	20,9
23/08/97 08:57	21,7	31/08/97 16:57	23,2	09/09/97 00:57	20,9
23/08/97 12:57	22,1	31/08/97 20:57	22,8	09/09/97 04:57	20,5
23/08/97 16:57	22,8	01/09/97 00:57	22,1	09/09/97 08:57	20,5
23/08/97 20:57	22,8	01/09/97 04:57	22,1	09/09/97 12:57	20,9
24/08/97 00:57	22,1	01/09/97 08:57	22,1	09/09/97 16:57	20,9
24/08/97 04:57	22,1	01/09/97 12:57	23,2	09/09/97 20:57	20,9
24/08/97 08:57	22,1	01/09/97 16:57	24,0	10/09/97 00:57	20,5
24/08/97 12:57	23,2	01/09/97 20:57	23,6	10/09/97 04:57	20,5
24/08/97 16:57	23,2	02/09/97 00:57	22,4	10/09/97 08:57	20,5
24/08/97 20:57	22,8	02/09/97 04:57	22,1	10/09/97 12:57	21,7
25/08/97 00:57	22,1	02/09/97 08:57	22,1	10/09/97 16:57	21,3
25/08/97 04:57	21,7	02/09/97 12:57	22,8	10/09/97 20:57	21,3
25/08/97 08:57	21,7	02/09/97 16:57	23,2	11/09/97 00:57	20,9
25/08/97 12:57	23,6	02/09/97 20:57	22,8	11/09/97 04:57	20,9
25/08/97 16:57	24,4	03/09/97 00:57	22,4	11/09/97 08:57	21,3
25/08/97 20:57	23,6	03/09/97 04:57	21,7	11/09/97 12:57	21,7
26/08/97 00:57	22,8	03/09/97 08:57	21,3	11/09/97 16:57	22,1
26/08/97 04:57	22,1	03/09/97 12:57	21,7	11/09/97 20:57	21,7
26/08/97 08:57	22,1	03/09/97 16:57	22,1	12/09/97 00:57	21,3
26/08/97 12:57	24,0	03/09/97 20:57	21,3	12/09/97 04:57	21,3
26/08/97 16:57	24,8	04/09/97 00:57	20,9	12/09/97 08:57	21,3
26/08/97 20:57	23,6	04/09/97 04:57	20,2	12/09/97 12:57	21,7
27/08/97 00:57	22,4	04/09/97 08:57	20,2	12/09/97 16:57	22,4
27/08/97 04:57	21,7	04/09/97 12:57	22,1	12/09/97 20:57	22,1
27/08/97 08:57	21,7	04/09/97 16:57	22,1	13/09/97 00:57	21,7
27/08/97 12:57	23,6	04/09/97 20:57	21,3	13/09/97 04:57	21,7

date et heure	température (°C)	date et heure	température (°C)	date et heure	température (°C)
13/09/97 08:57	21,3	21/09/97 16:57	19,0	30/09/97 00:25	18,6
13/09/97 12:57	22,4	21/09/97 20:57	17,8	30/09/97 04:25	18,6
13/09/97 16:57	22,8	22/09/97 00:57	17,1	30/09/97 08:25	18,6
13/09/97 20:57	22,1	22/09/97 04:57	16,3	30/09/97 12:25	19,0
14/09/97 00:57	21,7	22/09/97 08:57	17,1	30/09/97 16:25	19,4
14/09/97 04:57	21,7	22/09/97 12:57	19,0	30/09/97 20:25	19,0
14/09/97 08:57	21,7	22/09/97 16:57	19,4	01/10/97 00:25	18,6
14/09/97 12:57	22,1	22/09/97 20:57	19,0	01/10/97 04:25	18,2
14/09/97 16:57	22,4	23/09/97 00:57	18,6	01/10/97 08:25	17,8
14/09/97 20:57	21,7	23/09/97 04:57	18,6	01/10/97 12:25	18,2
15/09/97 00:57	21,3	23/09/97 08:57	18,6	01/10/97 16:25	17,8
15/09/97 04:57	21,3	23/09/97 12:57	19,4	01/10/97 20:25	17,1
15/09/97 08:57	20,9	23/09/97 16:57	19,8	02/10/97 00:25	16,7
15/09/97 12:57	21,3	23/09/97 20:57	19,4	02/10/97 04:25	16,3
15/09/97 16:57	21,7	24/09/97 00:57	18,6	02/10/97 08:25	16,3
15/09/97 20:57	20,9	24/09/97 04:57	17,8	02/10/97 12:25	16,7
16/09/97 00:57	20,5	24/09/97 08:57	17,4	02/10/97 16:25	17,4
16/09/97 04:57	20,2	24/09/97 12:57	18,2	02/10/97 20:25	17,1
16/09/97 08:57	20,2	24/09/97 16:57	18,2	03/10/97 00:25	16,7
16/09/97 12:57	20,5	24/09/97 20:57	17,8	03/10/97 04:25	17,1
16/09/97 16:57	20,5	25/09/97 00:57	17,8	03/10/97 08:25	17,1
16/09/97 20:57	20,2	25/09/97 04:57	17,8	03/10/97 12:25	17,4
17/09/97 00:57	19,8	25/09/97 08:57	17,8	03/10/97 16:25	18,2
17/09/97 04:57	19,4	25/09/97 12:57	19,0	03/10/97 20:25	17,1
17/09/97 08:57	19,4	25/09/97 16:25	19,8	04/10/97 00:25	16,7
17/09/97 12:57	20,2	25/09/97 20:25	19,0	04/10/97 04:25	15,9
17/09/97 16:57	20,5	26/09/97 00:25	18,2	04/10/97 08:25	15,9
17/09/97 20:57	19,8	26/09/97 04:25	17,8	04/10/97 12:25	16,7
18/09/97 00:57	19,8	26/09/97 08:25	17,1	04/10/97 16:25	17,4
18/09/97 04:57	19,8	26/09/97 12:25	17,8	04/10/97 20:25	17,1
18/09/97 08:57	20,2	26/09/97 16:25	18,2	05/10/97 00:25	16,7
18/09/97 12:57	20,9	26/09/97 20:25	17,8	05/10/97 04:25	17,1
18/09/97 16:57	22,1	27/09/97 00:25	17,4	05/10/97 08:25	17,1
18/09/97 20:57	20,9	27/09/97 04:25	17,1	05/10/97 12:25	17,1
19/09/97 00:57	20,2	27/09/97 08:25	16,7	05/10/97 16:25	18,2
19/09/97 04:57	20,2	27/09/97 12:25	17,8	05/10/97 20:25	17,8
19/09/97 08:57	19,8	27/09/97 16:25	18,6	06/10/97 00:25	17,1
19/09/97 12:57	20,9	27/09/97 20:25	17,8	06/10/97 04:25	17,1
19/09/97 16:57	21,3	28/09/97 00:25	17,4	06/10/97 08:25	17,1
19/09/97 20:57	21,3	28/09/97 04:25	16,7	06/10/97 12:25	18,2
20/09/97 00:57	21,3	28/09/97 08:25	16,7	06/10/97 16:25	19,4
20/09/97 04:57	20,9	28/09/97 12:25	18,2	06/10/97 20:25	18,6
20/09/97 08:57	20,2	28/09/97 16:25	19,4	07/10/97 00:25	17,8
20/09/97 12:57	20,2	28/09/97 20:25	18,2	07/10/97 04:25	17,4
20/09/97 16:57	19,4	29/09/97 00:25	17,8	07/10/97 08:25	17,1
20/09/97 20:57	19,0	29/09/97 04:25	17,1	07/10/97 12:25	18,6
21/09/97 00:57	18,6	29/09/97 08:25	17,4	07/10/97 16:25	19,0
21/09/97 04:57	18,2	29/09/97 12:25	17,4	07/10/97 20:25	17,8
21/09/97 08:57	17,8	29/09/97 16:25	18,2	08/10/97 00:25	16,7
21/09/97 12:57	19,0	29/09/97 20:25	18,6	08/10/97 04:25	15,9

date et heure	température (°C)	date et heure	température (°C)	date et heure	température (°C)
08/10/97 08:25	15,6	16/10/97 16:25	16,7	25/10/97 0:25	21,7
08/10/97 12:25	17,4	16/10/97 20:25	16,3	25/10/97 4:25	21,7
08/10/97 16:25	18,2	17/10/97 00:25	15,9	25/10/97 8:25	21,7
08/10/97 20:25	17,8	17/10/97 04:25	15,6	25/10/97 12:25	22,8
09/10/97 00:25	17,8	17/10/97 08:25	15,6	25/10/97 16:25	23,2
09/10/97 04:25	17,8	17/10/97 12:25	16,3	25/10/97 20:25	22,1
09/10/97 08:25	17,8	17/10/97 16:25	17,1	26/10/97 0:25	21,7
09/10/97 12:25	19,4	17/10/97 20:25	16,3	26/10/97 4:25	21,7
09/10/97 16:25	19,8	18/10/97 00:25	15,6	26/10/97 8:25	21,3
09/10/97 20:25	18,6	18/10/97 04:25	15,2	26/10/97 12:25	22,8
10/10/97 00:25	18,2	18/10/97 08:25	14,8	26/10/97 16:25	23,2
10/10/97 04:25	17,8	18/10/97 12:25	15,9	26/10/97 20:25	22,1
10/10/97 08:25	18,2	18/10/97 16:25	16,7	27/10/97 0:25	22,1
10/10/97 12:25	19,0	18/10/97 20:25	15,9	27/10/97 4:25	20,9
10/10/97 16:25	19,0	19/10/97 00:25	15,2	27/10/97 8:25	19
10/10/97 20:25	17,8	19/10/97 04:25	14,8	27/10/97 12:25	20,5
11/10/97 00:25	17,1	19/10/97 08:25	14,8	27/10/97 16:25	20,5
11/10/97 04:25	16,3	19/10/97 12:25	16,3	27/10/97 20:25	20,5
11/10/97 08:25	15,9	19/10/97 16:25	17,1	28/10/97 0:25	20,5
11/10/97 12:25	17,1	19/10/97 20:25	15,6	28/10/97 4:25	20,5
11/10/97 16:25	17,4	20/10/97 00:25	15,6	28/10/97 8:25	21,3
11/10/97 20:25	16,7	20/10/97 04:25	15,2	28/10/97 12:25	22,4
12/10/97 00:25	16,3	20/10/97 08:25	15,2	28/10/97 16:25	23,2
12/10/97 04:25	15,9	20/10/97 12:25	19,4	28/10/97 20:25	23,2
12/10/97 08:25	15,9	20/10/97 16:25	22,4	29/10/97 0:25	22,8
12/10/97 12:25	17,1	20/10/97 20:25	22,8	29/10/97 4:25	22,8
12/10/97 16:25	17,4	21/10/97 00:25	22,8	29/10/97 8:25	22,8
12/10/97 20:25	17,1	21/10/97 04:25	22,8	29/10/97 12:25	21,3
13/10/97 00:25	16,7	21/10/97 08:25	22,4	29/10/97 16:25	20,2
13/10/97 04:25	16,7	21/10/97 12:25	22,4	29/10/97 20:25	20,5
13/10/97 08:25	16,3	21/10/97 16:25	22,4	30/10/97 0:25	21,7
13/10/97 12:25	17,1	21/10/97 20:25	21,7	30/10/97 4:25	22,1
13/10/97 16:25	17,4	22/10/97 00:25	22,4	30/10/97 8:25	22,1
13/10/97 20:25	17,1	22/10/97 04:25	22,4	30/10/97 12:25	21,7
14/10/97 00:25	16,3	22/10/97 08:25	22,4	30/10/97 16:25	20,2
14/10/97 04:25	16,3	22/10/97 12:25	21,3	30/10/97 20:25	19,4
14/10/97 08:25	16,3	22/10/97 16:25	20,5	31/10/97 0:25	21,7
14/10/97 12:25	17,1	22/10/97 20:25	21,3	31/10/97 4:25	21,3
14/10/97 16:25	18,6	23/10/97 00:25	21,3	31/10/97 8:25	21,7
14/10/97 20:25	17,8	23/10/97 04:25	21,3	31/10/97 12:25	22,4
15/10/97 00:25	17,1	23/10/97 08:25	21,3	31/10/97 16:25	22,4
15/10/97 04:25	17,1	23/10/97 12:25	20,5	31/10/97 20:25	22,4
15/10/97 08:25	17,1	23/10/97 16:25	22,1	1/11/97 0:25	22,1
15/10/97 12:25	17,4	23/10/97 20:25	22,4	1/11/97 4:25	22,1
15/10/97 16:25	17,1	24/10/97 00:25	22,4	1/11/97 8:25	22,1
15/10/97 20:25	17,1	24/10/97 04:25	22,4	1/11/97 12:25	22,8
16/10/97 00:25	16,7	24/10/97 08:25	22,1	1/11/97 16:25	20,9
16/10/97 04:25	16,7	24/10/97 12:25	22,1	1/11/97 20:25	19,4
16/10/97 08:25	16,3	24/10/97 16:25	22,8	2/11/97 0:25	20,9
16/10/97 12:25	16,3	24/10/97 20:25	21,7	2/11/97 4:25	21,3

date et heure	température (°C)	date et heure	température (°C)	date et heure	température (°C)
2/11/97 8:25	21,7	10/11/97 16:25	22,1	19/11/97 0:25	18,2
2/11/97 12:25	22,4	10/11/97 20:25	21,7	19/11/97 4:25	17,4
2/11/97 16:25	22,4	11/11/97 0:25	22,1	19/11/97 8:25	17,1
2/11/97 20:25	20,2	11/11/97 4:25	22,1	19/11/97 12:25	17,1
3/11/97 0:25	19,4	11/11/97 8:25	22,1	19/11/97 16:25	17,8
3/11/97 4:25	21,3	11/11/97 12:25	22,8	19/11/97 20:25	17,4
3/11/97 8:25	22,1	11/11/97 16:25	23,2	20/11/97 0:25	17,4
3/11/97 12:25	23,6	11/11/97 20:25	22,8	20/11/97 4:25	17,1
3/11/97 16:25	21,7	12/11/97 0:25	22,4	20/11/97 8:25	17,1
3/11/97 20:25	19,8	12/11/97 4:25	21,7	20/11/97 12:25	17,1
4/11/97 0:25	20,9	12/11/97 8:25	21,3	20/11/97 16:25	17,4
4/11/97 4:25	21,3	12/11/97 12:25	22,1	20/11/97 20:25	17,1
4/11/97 8:25	20,9	12/11/97 16:25	22,8	21/11/97 0:25	17,1
4/11/97 12:25	22,4	12/11/97 20:25	22,1	21/11/97 4:25	17,4
4/11/97 16:25	22,8	13/11/97 0:25	21,3	21/11/97 8:25	17,4
4/11/97 20:25	22,1	13/11/97 4:25	20,9	21/11/97 12:25	17,4
5/11/97 0:25	22,4	13/11/97 8:25	20,5	21/11/97 16:25	17,4
5/11/97 4:25	22,8	13/11/97 12:25	20,9	21/11/97 20:25	17,1
5/11/97 8:25	22,4	13/11/97 16:25	19	22/11/97 0:25	17,1
5/11/97 12:25	23,6	13/11/97 20:25	19,4	22/11/97 4:25	16,7
5/11/97 16:25	21,7	14/11/97 0:25	19,4	22/11/97 8:25	16,3
5/11/97 20:25	20,2	14/11/97 4:25	19,4	22/11/97 12:25	17,4
6/11/97 0:25	21,3	14/11/97 8:25	19,4	22/11/97 16:25	17,1
6/11/97 4:25	21,7	14/11/97 12:25	18,6	22/11/97 20:25	15,9
6/11/97 8:25	21,7	14/11/97 16:25	18,6	23/11/97 0:25	15,6
6/11/97 12:25	22,8	14/11/97 20:25	19,8	23/11/97 4:25	15,6
6/11/97 16:25	23,2	15/11/97 0:25	20,5	23/11/97 8:25	15,2
6/11/97 20:25	22,4	15/11/97 4:25	20,9	23/11/97 12:25	15,6
7/11/97 0:25	22,4	15/11/97 8:25	21,3	23/11/97 16:25	15,6
7/11/97 4:25	22,1	15/11/97 12:25	22,4	23/11/97 20:25	15,6
7/11/97 8:25	22,1	15/11/97 16:25	22,1	24/11/97 0:25	15,9
7/11/97 12:25	22,4	15/11/97 20:25	21,7	24/11/97 4:25	16,3
7/11/97 16:25	23,2	16/11/97 0:25	21,3	24/11/97 8:25	16,3
7/11/97 20:25	22,4	16/11/97 4:25	21,3	24/11/97 12:25	15,6
8/11/97 0:25	21,7	16/11/97 8:25	20,9	24/11/97 16:25	16,3
8/11/97 4:25	21,3	16/11/97 12:25	21,3	24/11/97 20:25	16,3
8/11/97 8:25	21,3	16/11/97 16:25	21,3	25/11/97 0:25	16,3
8/11/97 12:25	22,1	16/11/97 20:25	21,3	25/11/97 4:25	15,9
8/11/97 16:25	22,8	17/11/97 0:25	20,9	25/11/97 8:25	15,9
8/11/97 20:25	22,1	17/11/97 4:25	20,9	25/11/97 12:25	16,3
9/11/97 0:25	21,7	17/11/97 8:25	20,9	25/11/97 16:25	16,7
9/11/97 4:25	21,7	17/11/97 12:25	21,7	25/11/97 20:25	16,7
9/11/97 8:25	21,7	17/11/97 16:25	21,7	26/11/97 0:25	16,3
9/11/97 12:25	21,3	17/11/97 20:25	20,9	26/11/97 4:25	16,3
9/11/97 16:25	21,3	18/11/97 0:25	20,5	26/11/97 8:25	16,3
9/11/97 20:25	20,9	18/11/97 4:25	20,2	26/11/97 12:25	16,3
10/11/97 0:25	21,3	18/11/97 8:25	20,2	26/11/97 16:25	15,9
10/11/97 4:25	21,3	18/11/97 12:25	20,9	26/11/97 20:25	15,6
10/11/97 8:25	21,3	18/11/97 16:25	20,9	27/11/97 0:25	14,8
10/11/97 12:25	21,7	18/11/97 20:25	19	27/11/97 4:25	14,4

date et heure	température (°C)	date et heure	température (°C)
27/11/97 8:25	14,8	5/12/97 16:25	14,8
27/11/97 12:25	15,6	5/12/97 20:25	14,8
27/11/97 16:25	16,3	6/12/97 0:25	14,4
27/11/97 20:25	15,9	6/12/97 4:25	14,4
28/11/97 0:25	15,9	6/12/97 8:25	14,4
28/11/97 4:25	15,2	6/12/97 12:25	14,4
28/11/97 8:25	15,2	6/12/97 16:25	14,8
28/11/97 12:25	14,8	6/12/97 20:25	14,8
28/11/97 16:25	15,9	7/12/97 0:25	14,8
28/11/97 20:25	15,6	7/12/97 4:25	14,8
29/11/97 0:25	15,6	7/12/97 8:25	14,8
29/11/97 4:25	15,6	7/12/97 12:25	15,2
29/11/97 8:25	15,6	7/12/97 16:25	15,2
29/11/97 12:25	15,6	7/12/97 20:25	14,8
29/11/97 16:25	14,8	8/12/97 0:25	14,8
29/11/97 20:25	16,3	8/12/97 4:25	14,8
30/11/97 0:25	15,6	8/12/97 8:25	14,4
30/11/97 4:25	15,2	8/12/97 12:25	14,8
30/11/97 8:25	14,8	8/12/97 16:25	15,2
30/11/97 12:25	14,8	8/12/97 20:25	15,2
30/11/97 16:25	15,2	9/12/97 0:25	14,8
30/11/97 20:25	14,8	9/12/97 4:25	14,4
1/12/97 0:25	14,8	9/12/97 8:25	14,4
1/12/97 4:25	14,8	9/12/97 12:25	15,2
1/12/97 8:25	14,8	9/12/97 16:25	19
1/12/97 12:25	14,8	9/12/97 20:25	17,8
1/12/97 16:25	15,6	10/12/97 0:25	16,7
1/12/97 20:25	17,1	10/12/97 4:25	15,9
2/12/97 0:25	16,7	10/12/97 8:25	17,8
2/12/97 4:25	16,3		
2/12/97 8:25	16,3		
2/12/97 12:25	16,3		
2/12/97 16:25	15,9		
2/12/97 20:25	15,6		
3/12/97 0:25	15,2		
3/12/97 4:25	15,2		
3/12/97 8:25	14,8		
3/12/97 12:25	15,9		
3/12/97 16:25	16,3		
3/12/97 20:25	15,9		
4/12/97 0:25	15,9		
4/12/97 4:25	15,9		
4/12/97 8:25	15,9		
4/12/97 12:25	17,1		
4/12/97 16:25	17,1		
4/12/97 20:25	16,3		
5/12/97 0:25	15,6		
5/12/97 4:25	15,2		
5/12/97 8:25	14,8		
5/12/97 12:25	14,8		

Annexe B:

Évolution du retrait libre
(tableau complet et tableau résumé)

Mesure de retrait libre

Mélange : 40-X-X

Date de gâchage : 30 juin 1997

Côté coffrage

Jour, date, et heure	Mesure de la déformation libre									
		retrait # 1	retrait #2	retrait #3	retrait #4	moyenne verticale	retrait #5	retrait #6	retrait #7	moyenne horizontale
Initial	L=	7,9559	8,0101	7,9997	7,9653		7,9928	8,023	7,9448	
03-jui	d=	0	0	0	0		0	0	0	
16:30	e=	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	L=	7,9558	8,01	7,9993	7,9654		7,9924	8,0229	7,9448	
04-jui	d=	-1E-04	-1E-04	-0,0004	1E-04		-0,0004	-1E-04	0	
16:00	e=	1,25693E-05	1,24842E-05	5,00019E-05	-1,25545E-05	15,6	5,0045E-05	1,24642E-05	0	20,8
3	L=	7,9557	8,0098	7,9991	7,9651		7,9922	8,0227	7,9446	
06-jui	d=	-0,0002	-0,0003	-0,0006	-0,0002		-0,0006	-0,0003	-0,0002	
12:45	e=	2,51386E-05	3,74527E-05	7,50028E-05	2,51089E-05	40,7	7,50676E-05	3,73925E-05	2,51737E-05	45,9
7	L=	7,9552	8,0096	7,9986	7,9646		7,9916	8,0223	7,9443	
10-jui	d=	-0,0007	-0,0005	-0,0011	-0,0007		-0,0012	-0,0007	-0,0005	
15:30	e=	8,7985E-05	6,24212E-05	0,000137505	8,78812E-05	93,9	0,000150135	8,72492E-05	6,29342E-05	100,1
14	L=	7,9548	8,0091	7,9981	7,9641		7,9914	8,0219	7,944	
17-jui	d=	-0,0011	-0,001	-0,0016	-0,0012		-0,0014	-0,0011	-0,0008	
11:30	e=	0,000138262	0,000124842	0,000200008	0,000150653	153,4	0,000175158	0,000137106	0,000100695	137,7
21	L=	7,9544	8,0089	7,998	7,9637		7,9911	8,0216	7,9436	
24-jui	d=	-0,0015	-0,0012	-0,0017	-0,0016		-0,0017	-0,0014	-0,0012	
14:15	e=	0,000188539	0,000149811	0,000212508	0,000200871	187,9	0,000212691	0,000174498	0,000151042	179,4
28	L=	7,9543	8,0087	7,9978	7,9634		7,9911	8,0216	7,9435	
31-jui	d=	-0,0016	-0,0014	-0,0019	-0,0019		-0,0017	-0,0014	-0,0013	
13:15	e=	0,000201109	0,000174779	0,000237509	0,000238535	213,0	0,000212691	0,000174498	0,000163629	183,6
42	L=	7,9539	8,0083	7,9973	7,9632		7,9907	8,0211	7,943	
14-aout	d=	-0,002	-0,0018	-0,0024	-0,0021		-0,0021	-0,0019	-0,0018	
09:30	e=	0,000251386	0,000224716	0,000300011	0,000263644	259,9	0,000262736	0,000236819	0,000226563	242,0
56	L=	7,9537	8,0081	7,9971	7,963		7,9902	8,0208	7,9429	
28-aout	d=	-0,0022	-0,002	-0,0026	-0,0023		-0,0026	-0,0022	-0,0019	
09:00	e=	0,000276524	0,000249685	0,000325012	0,000288752	285,0	0,000325293	0,000274212	0,00023915	279,6
98	L=	7,953	8,0076	7,9965	7,9621		7,9897	8,0201	7,9423	
09-oct	d=	-0,0029	-0,0025	-0,0032	-0,0032		-0,0031	-0,0029	-0,0025	
13:15	e=	0,000364509	0,000312106	0,000400015	0,000401743	369,6	0,000387849	0,000361461	0,000314671	354,7

Mesure de retrait libre

Mélange : 40-X-X

Date de gâchage : 30 juin 1997

Côté truelle

Jour, date, et heure	Mesure de la déformation libre											moyenne horizontale
	retrait #1	retrait #2	retrait #3	retrait #4	moyenne verticale	retrait #5	retrait #6	retrait #7				
Initial	L= 8,016	7,995	7,9935	8,009		8,026	7,9762	7,9547				
03-jui 16:30	d= 0	0	0	0		0	0	0			0	
1	L= 8,0158	7,9944	7,9938	8,0088		8,0263	7,9763	7,955				
04-jui	d= -0,0002	-0,0006	0,0003	-0,0002		0,0003	1E-04	0,0003				
16:00	e= 2,49501E-05	7,50469E-05	-3,75305E-05	2,49719E-05	21,9	-3,73785E-05	-1,25373E-05	-3,77136E-05			-29,2	
3	L= 8,0152	7,9941	7,9931	8,0082		8,0258	7,9759	7,9549				
06-jui	d= -0,0008	-0,0009	-0,0004	-0,0008		-0,0002	-0,0003	0,0002				
12:45	e= 9,98004E-05	0,00011257	5,00407E-05	9,98876E-05	90,6	2,4919E-05	3,76119E-05	-2,51424E-05			12,5	
7	L= 8,0147	7,9937	7,9925	8,0078		8,0252	7,9753	7,9542				
10-jui	d= -0,0013	-0,0013	-0,001	-0,0012		-0,0008	-0,0009	-0,0005				
15:30	e= 0,000162176	0,000162602	0,000125102	0,000149831	149,9	9,96761E-05	0,000112836	6,28559E-05			91,8	
14	L= 8,0143	7,9931	7,992	8,0071		8,0247	7,9749	7,9537				
17-jui	d= -0,0017	-0,0019	-0,0015	-0,0019		-0,0013	-0,0013	-0,001				
11:30	e= 0,000212076	0,000237649	0,000187652	0,000237233	218,7	0,000161974	0,000162985	0,000125712			150,2	
21	L= 8,0139	7,9927	7,9917	8,0071		8,0245	7,9745	7,9535				
24-jui	d= -0,0021	-0,0023	-0,0018	-0,0019		-0,0015	-0,0017	-0,0012				
14:15	e= 0,000261976	0,00028768	0,000225183	0,000237233	253,0	0,000186893	0,000213134	0,000150854			183,6	
28	L= 8,014	7,9928	7,9917	8,0069		8,0244	7,9745	7,9535				
31-jui	d= -0,002	-0,0022	-0,0018	-0,0021		-0,0016	-0,0017	-0,0012				
13:15	e= 0,000249501	0,000275172	0,000225183	0,00022205	253,0	0,000199352	0,000213134	0,000150854			187,8	
42	L= 8,0134	7,9922	7,9911	8,0063		8,024	7,9741	7,9531				
14-août	d= -0,0026	-0,0028	-0,0024	-0,0027		-0,002	-0,0021	-0,0016				
09:30	e= 0,000324351	0,000350219	0,000300244	0,000337121	328,0	0,00024919	0,000263283	0,000201139			237,9	
56	L= 8,0133	7,9922	7,9912	8,0063		8,0238	7,9738	7,9528				
28-août	d= -0,0027	-0,0028	-0,0023	-0,0027		-0,0022	-0,0024	-0,0019				
09:00	e= 0,000336826	0,000350219	0,000287734	0,000337121	328,0	0,000274109	0,000300895	0,000238853			271,3	
98	L= 8,0126	7,9916	7,9907	8,0058		8,0233	7,9732	7,9523				
09-oct	d= -0,0034	-0,0034	-0,0028	-0,0032		-0,0027	-0,003	-0,0024				
13:15	e= 0,000424152	0,000425266	0,000350285	0,000399551	399,8	0,000336407	0,000376119	0,000301708			338,1	

Mesure de retrait libre

Mélange : 40-T-40

Date de gâchage : 7 juillet 1997

Côté coffrage

Jour, date, et heure	Distance entre deux plots									
		retrait # 1	retrait #2	retrait #3	retrait #4	moyenne verticale	retrait #5	retrait #6	retrait #7	moyenne horizontale
Initial	L=	7,9918	8,0529	8,0114	8,0053		7,9751	8,014	8	
10-jui	d=	0	0	0	0		0	0	0	
15:00	e=	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	L=	7,9915	8,0527	8,0111	8,0049		7,9748	8,0137	7,9995	
11-jui	d=	-0,0003	-0,0002	-0,0003	-0,0004		-0,0003	-0,0003	-0,0005	
16:00	e=	3,75385E-05	2,48358E-05	3,74466E-05	4,99669E-05	37,4	3,76171E-05	3,74345E-05	6,25E-05	45,9
3	L=	7,991	8,0524	8,011	8,0044		7,9745	8,0132	7,999	
13-jui	d=	-0,0008	-0,0005	-0,0004	-0,0009		-0,0006	-0,0008	-0,001	
12:30	e=	0,000100103	6,20894E-05	4,99289E-05	0,000112426	81,1	7,52342E-05	9,98253E-05	0,000125	100,0
7	L=	7,9907	8,052	8,0106	8,0042		7,9742	8,013	7,9986	
17-jui	d=	-0,0011	-0,0009	-0,0008	-0,0011		-0,0009	-0,001	-0,0014	
11:40	e=	0,000137641	0,000111761	9,98577E-05	0,000137409	121,7	0,000112851	0,000124782	0,000175	137,5
14	L=	7,9902	8,0516	8,0103	8,0037		7,9736	8,0125	7,9982	
24-jui	d=	-0,0016	-0,0013	-0,0011	-0,0016		-0,0015	-0,0015	-0,0018	
14:30	e=	0,000200205	0,000161433	0,000137304	0,000199868	174,7	0,000188085	0,000187172	0,000225	200,1
21	L=	7,9902	8,0516	8,0101	8,0037		7,9736	8,0126	7,998	
31-jui	d=	-0,0016	-0,0013	-0,0013	-0,0016		-0,0015	-0,0014	-0,002	
13:30	e=	0,000200205	0,000161433	0,000162269	0,000199868	180,9	0,000188085	0,000174694	0,00025	204,3
28	L=	7,9896	8,0512	8,0097	8,0033		7,9732	8,0122	7,9976	
7-aout	d=	-0,0022	-0,0017	-0,0017	-0,002		-0,0019	-0,0018	-0,0024	
14:30	e=	0,000275282	0,000211104	0,000212198	0,000249834	237,1	0,000238242	0,000224607	0,0003	254,3
42	L=	7,9894	8,0509	8,0094	8,0028		7,9727	8,0117	7,9972	
21-aout	d=	-0,0024	-0,002	-0,002	-0,0025		-0,0024	-0,0023	-0,0028	
10:45	e=	0,000300308	0,000248358	0,000249644	0,000312293	277,7	0,000300937	0,000286998	0,00035	312,6
56	L=	7,9891	8,0506	8,0092	8,0026		7,9725	8,0116	7,997	
04-sep	d=	-0,0027	-0,0023	-0,0022	-0,0027		-0,0026	-0,0024	-0,003	
09:45	e=	0,000337846	0,000285611	0,000274609	0,000337277	308,8	0,000326015	0,000299476	0,000375	333,5
98	L=	7,9884	8,05	8,0084	8,0018		7,9717	8,0108	7,9962	
16-oct	d=	-0,0034	-0,0029	-0,003	-0,0035		-0,0034	-0,0032	-0,0038	
09:00	e=	0,000425436	0,000360119	0,000374466	0,00043721	399,3	0,000426327	0,000399301	0,000475	433,5

Mesure de retrait libre

Mélange : 40-T-40

Date de gâchage : 7 juillet 1997

Côté truelle

Jour, date, et heure	Distance entre deux plots										moyenne horizontale
	retrait # 1	retrait #2	retrait #3	retrait #4	moyenne verticale	retrait #5	retrait #6	retrait #7			
Initial	L= 8,0317	8,0234	7,9844	8,0137		7,9475	8,0008	7,9757			
10-jui	d= 0	0	0	0		0	0	0			
15:00	e= 0	0	0	0		0	0	0			0
1	L= 8,0311	8,0225	7,984	8,0133		7,9473	8,0008	7,9755			
11-jui	d= -0,0006	-0,0009	-0,0004	-0,0004		-0,0002	0	-0,0002			
16:00	e= 7,4704E-05	0,000112172	5,00977E-05	4,99145E-05	71,7	2,51651E-05	0	2,50762E-05			16,7
3	L= 8,0308	8,0221	7,9831	8,0126		7,9467	8,0001	7,9747			
13-jui	d= -0,0009	-0,0013	-0,0013	-0,0011		-0,0008	-0,0007	-0,001			
12:30	e= 0,000112056	0,000162026	0,000162817	0,000137265	143,5	0,000100661	8,74913E-05	0,000125381			104,5
7	L= 8,0299	8,0214	7,9824	8,0121		7,9462	7,9994	7,9741			
17-jui	d= -0,0018	-0,002	-0,002	-0,0016		-0,0013	-0,0014	-0,0016			
11:40	e= 0,000224112	0,000249271	0,000250488	0,000199658	230,9	0,000163573	0,000174983	0,000200609			179,7
14	L= 8,0296	8,0212	7,9822	8,0119		7,9457	7,9992	7,9738			
24-jui	d= -0,0021	-0,0022	-0,0022	-0,0018		-0,0018	-0,0016	-0,0019			
14:30	e= 0,000261464	0,000274198	0,000275537	0,000224615	259,0	0,000226486	0,000199998	0,000238224			221,6
21	L= 8,0291	8,0209	7,9819	8,0116		7,9455	7,9989	7,9737			
31-jui	d= -0,0026	-0,0025	-0,0025	-0,0021		-0,002	-0,0019	-0,002			
13:30	e= 0,000323717	0,000311589	0,000313111	0,000262051	302,6	0,000251651	0,000237476	0,000250762			246,6
28	L= 8,0287	8,0205	7,9815	8,0111		7,945	7,9985	7,9733			
7-août	d= -0,003	-0,0029	-0,0029	-0,0026		-0,0025	-0,0023	-0,0024			
14:30	e= 0,00037352	0,000361443	0,000363208	0,000324444	355,7	0,000314564	0,000287471	0,000300914			301,0
42	L= 8,0282	8,02	7,981	8,0107		7,9446	7,9982	7,9728			
21-août	d= -0,0035	-0,0034	-0,0034	-0,003		-0,0029	-0,0026	-0,0029			
10:45	e= 0,000435773	0,000423761	0,00042583	0,000374359	414,9	0,000364895	0,000324968	0,000363604			351,2
56	L= 8,028	8,0198	7,9807	8,0105		7,9442	7,9979	7,9726			
04-sep	d= -0,0037	-0,0036	-0,0037	-0,0032		-0,0033	-0,0029	-0,0031			
09:45	e= 0,000460675	0,000448688	0,000463404	0,000399316	443,0	0,000415225	0,000362464	0,000388681			388,8
98	L= 8,0274	8,0192	7,98	8,0099		7,9434	7,9971	7,9719			
16-oct.	d= -0,0043	-0,0042	-0,0044	-0,0038		-0,0041	-0,0037	-0,0038			
09:00	e= 0,000535379	0,000523469	0,000551075	0,000474188	521,0	0,000515885	0,000462454	0,000476447			484,9

Mesure de retrait libre

Mélange : 40-T-60

Date de gâchage : 8 juillet 1997

Côté coffrage

Jour, date, et heure	Distance entre deux plots									
		retrait # 1	retrait #2	retrait #3	retrait #4	moyenne verticale	retrait #5	retrait #6	retrait #7	moyenne horizontale
Initial	L=	8,0026	8,0035	8,0027	7,9933		7,9726	8,0266	8,0064	
11-jui	d=	0	0	0	0		0	0	0	
15:30	e=	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	L=	8,0025	8,0038	8,0025	7,9933		7,9727	8,0267	8,0063	
12-jui	d=	-1E-04	0,0003	-0,0002	0		1E-04	1E-04	-1E-04	
13:45	e=	1,24959E-05	-3,74836E-05	2,49916E-05	0	0,0	-1,2543E-05	-1,24586E-05	1,249E-05	-4,2
3	L=	8,0026	8,0038	8,0027	7,9934		7,9727	8,0267	8,0065	
14-jui	d=	0	0,0003	0	0,0001		1E-04	1E-04	0,0001	
13:45	e=	0	-3,74836E-05	0	-1,25105E-05	-12,5	-1,2543E-05	-1,24586E-05	-1,249E-05	-12,5
7	L=	8,0018	8,0028	8,002	7,9929		7,972	8,0263	8,006	
18-jui	d=	-0,0008	-0,0007	-0,0007	-0,0004		-0,0006	-0,0003	-0,0004	
12:30	e=	9,99675E-05	8,74617E-05	8,74705E-05	5,00419E-05	81,2	7,52578E-05	3,73757E-05	4,996E-05	54,2
14	L=	8,0018	8,0028	8,0019	7,9925		7,9718	8,0259	8,0058	
25-jui	d=	-0,0008	-0,0007	-0,0008	-0,0008		-0,0008	-0,0007	-0,0006	
11:45	e=	9,99675E-05	8,74617E-05	9,99663E-05	0,000100084	96,9	0,000100344	8,721E-05	7,494E-05	87,5
21	L=	8,0013	8,0023	8,0014	7,9921		7,9713	8,0256	8,0053	
1-aout	d=	-0,0013	-0,0012	-0,0013	-0,0012		-0,0013	-0,001	-0,0011	
09:30	e=	0,000162447	0,000149934	0,000162445	0,000150126	156,2	0,000163058	0,000124586	0,00013739	141,7
28	L=	8,0011	8,0021	8,0013	7,992		7,9712	8,0254	8,005	
8-aout	d=	-0,0015	-0,0014	-0,0014	-0,0013		-0,0014	-0,0012	-0,0014	
11:00	e=	0,000187439	0,000174923	0,000174941	0,000162636	175,0	0,000175601	0,000149503	0,00017486	166,7
42	L=	8,0005	8,0015	8,0009	7,9916		7,9708	8,0251	8,0047	
22-aout	d=	-0,0021	-0,002	-0,0018	-0,0017		-0,0018	-0,0015	-0,0017	
09:30	e=	0,000262415	0,000249891	0,000224924	0,000212678	237,5	0,000225773	0,000186879	0,00021233	208,3
56	L=	8,0004	8,0015	8,0007	7,9913		7,9703	8,0247	8,0042	
05-sep	d=	-0,0022	-0,002	-0,002	-0,002		-0,0023	-0,0019	-0,0022	
08:45	e=	0,000274911	0,000249891	0,000249916	0,00025021	256,2	0,000288488	0,000236713	0,00027478	266,7
98	L=	7,9996	8,0007	8	7,9903		7,9696	8,0239	8,0033	
17-oct	d=	-0,003	-0,0028	-0,0027	-0,003		-0,003	-0,0027	-0,0031	
14:00	e=	0,000374878	0,000349847	0,000337386	0,000375314	359,4	0,000376289	0,000336382	0,00038719	366,6

Mesure de retrait libre

Mélange : 40-T-60

Date de gâchage : 8 juillet 1997

Côté truelle

Jour, date, et heure	Distance entre deux plots										
	retrait #1	retrait #2	retrait #3	retrait #4	moyenne verticale	retrait #5	retrait #6	retrait #7	moyenne horizontale		
Initial	L= 8,0074	7,998	8,0189	7,9796		8,0323	8,02	8,0074			
11-jui	d= 0	0	0	0		0	0	0			
15:30	e= 0	0	0	0		0	0	0			
1	L= 8,0068	7,9974	8,0184	7,9787		8,0319	8,0196	8,007			
12-jui	d= -0,0006	-0,0006	-0,0005	-0,0009		-0,0004	-0,0004	-0,0004			
13:45	e= 7,49307E-05	7,50188E-05	6,23527E-05	0,000112788	81,3	4,97989E-05	4,98753E-05	4,99538E-05	49,9		
3	L= 8,0062	7,9968	8,0179	7,9784		8,0316	8,0192	8,0067			
14-jui	d= -0,0012	-0,0012	-0,001	-0,0012		-0,0007	-0,0008	-0,0007			
13:45	e= 0,000149861	0,000150038	0,000124705	0,000150383	143,7	8,71481E-05	9,97506E-05	8,74191E-05	91,4		
7	L= 8,0053	7,9962	8,0173	7,9777		8,0308	8,0188	8,0062			
18-jui	d= -0,0021	-0,0018	-0,0016	-0,0019		-0,0015	-0,0012	-0,0012			
12:30	e= 0,000262257	0,000225056	0,000199529	0,000238107	231,2	0,000186746	0,000149626	0,000149861	162,1		
14	L= 8,0049	7,9956	8,0168	7,9773		8,0304	8,0182	8,0058			
25-jui	d= -0,0025	-0,0024	-0,0021	-0,0023		-0,0019	-0,0018	-0,0016			
11:45	e= 0,000312211	0,000300075	0,000261881	0,000288235	290,6	0,000236545	0,000224439	0,000199815	220,3		
21	L= 8,0049	7,9955	8,0168	7,977		8,0302	8,018	8,0053			
1-aout	d= -0,0025	-0,0025	-0,0021	-0,0026		-0,0021	-0,002	-0,0021			
09:30	e= 0,000312211	0,000312578	0,000261881	0,000325831	303,1	0,000261444	0,000249377	0,000262257	257,7		
28	L= 8,0046	7,9954	8,0166	7,9767		8,0301	8,0178	8,005			
8-aout	d= -0,0028	-0,0026	-0,0023	-0,0029		-0,0022	-0,0022	-0,0024			
11:00	e= 0,000349677	0,000325081	0,000286822	0,000363427	331,3	0,000273894	0,000274314	0,000299723	282,6		
42	L= 8,004	7,9948	8,016	7,9761		8,0294	8,0175	8,0046			
22-aout	d= -0,0034	-0,0032	-0,0029	-0,0035		-0,0029	-0,0025	-0,0028			
09:30	e= 0,000424607	0,0004001	0,000361646	0,000438618	406,2	0,000361042	0,000311721	0,000349677	340,8		
56	L= 8,0039	7,9944	8,0158	7,9759		8,0288	8,017	8,0043			
05-sep	d= -0,0035	-0,0036	-0,0031	-0,0037		-0,0035	-0,003	-0,0031			
08:45	e= 0,000437096	0,000450113	0,000386587	0,000463682	434,4	0,000435741	0,000374065	0,000387142	399,0		
98	L= 8,003	7,9938	8,0152	7,9752		8,0281	8,016	8,0034			
17-oct	d= -0,0044	-0,0042	-0,0037	-0,0044		-0,0042	-0,004	-0,004			
14:00	e= 0,000549492	0,000525131	0,00046141	0,000551406	521,9	0,000522889	0,000498753	0,000499538	507,1		

Mesure de retrait libre

Mélange : 40-T-100

Date de gâchage : 14 juillet 1997

Côté coffrage

Jour, date, et heure	Distance entre deux plots										moyenne horizontale
	retrait # 1	retrait #2	retrait #3	retrait #4	moyenne verticale	retrait #5	retrait #6	retrait #7			
Initial	L= 8,0262	7,995	8,0146	7,9919		8,034	7,9958	8,0004			
17-jui	d= 0	0	0	0		0	0	0			
15:00	e= 0	0	0	0		0	0	0			0
1	L= 8,0265	7,995	8,0143	7,992		8,038	7,9957	8			
18-jui	d= 0,0003	0	-0,0003	1E-04		-0,0002	-1E-04	-0,0004			
12:30	e= -3,73776E-05	0	3,74317E-05	-1,25127E-05		2,48942E-05	1,25066E-05	4,99975E-05			29,1
3	L= 8,0259	7,9942	8,0138	7,9917		8,0336	7,9955	7,9997			
20-jui	d= -0,0003	-0,0008	-0,0008	-0,0002		-0,0004	-0,0003	-0,0007			
10:45	e= 3,73776E-05	0,000100063	9,98178E-05	2,50253E-05		4,97884E-05	3,75197E-05	8,74956E-05			58,3
7	L= 8,026	7,9941	8,0137	7,9914		8,0332	7,995	7,9992			
24-jui	d= -0,0002	-0,0009	-0,0009	-0,0005		-0,0008	-0,0008	-0,0012			
13:45	e= 2,49184E-05	0,00011257	0,000112295	6,25633E-05		9,95768E-05	0,000100053	0,000149993			116,5
14	L= 8,0254	7,9939	8,0133	7,9911		8,0329	7,9946	7,9988			
31-jui	d= -0,0008	-0,0011	-0,0013	-0,0008		-0,0011	-0,0012	-0,0016			
13:00	e= 9,96736E-05	0,000137586	0,000162204	0,000100101		0,000136918	0,000150079	0,00019999			162,3
21	L= 8,025	7,9933	8,0129	7,9908		8,0324	7,994	7,9983			
7-août	d= -0,0012	-0,0017	-0,0017	-0,0011		-0,0016	-0,0018	-0,0021			
14:15	e= 0,00014951	0,000212633	0,000212113	0,000137639		0,000199154	0,000225118	0,000262487			228,9
28	L= 8,0247	7,9932	8,0126	7,9905		8,0323	7,9939	7,9981			
14-août	d= -0,0015	-0,0018	-0,002	-0,0014		-0,0017	-0,0019	-0,0023			
09:45	e= 0,000186888	0,000225141	0,000249545	0,000175177		0,000211601	0,000237625	0,000287486			245,6
42	L= 8,0245	7,9928	8,0125	7,9902		8,032	7,9937	7,9979			
28-août	d= -0,0017	-0,0022	-0,0021	-0,0017		-0,002	-0,0021	-0,0025			
08:45	e= 0,000211806	0,000275172	0,000262022	0,000212715		0,000248942	0,000262638	0,000312484			274,7
56	L= 8,0244	7,9928	8,0122	7,99		8,0318	7,9936	7,9979			
11-sep	d= -0,0018	-0,0022	-0,0024	-0,0019		-0,0022	-0,0022	-0,0025			
08:45	e= 0,000224266	0,000275172	0,000299453	0,000237741		0,000273836	0,000275144	0,000312484			287,2
98	L= 8,0234	7,9921	8,0113	7,9891		8,0312	7,9928	7,9972			
23-oct	d= -0,0028	-0,0029	-0,0033	-0,0028		-0,0028	-0,003	-0,0032			
11:15	e= 0,000348857	0,000362727	0,000411749	0,000350355		0,000348519	0,000375197	0,00039998			374,6

Mesure de retrait libre

Mélange : 40-T-100

Date de gâchage : 14 juillet 1997

Côté truelle

Jour, date, et heure	Distance entre deux plots										moyenne horizontale
	retrait # 1	retrait #2	retrait #3	retrait #4	moyenne verticale	retrait #5	retrait #6	retrait #7			
Initial	7,9841	8,0476	8,02	7,9394		8,038	7,9797	7,9967			
17-jui	0	0	0	0		0	0	0			
15:00	0	0	0	0		0	0	0			0
1	7,9828	8,0469	8,019	7,9389		8,037	7,9788	7,9959			
18-jui	-0,0013	-0,0007	-0,001	-0,0005		-0,001	-0,0009	-0,0008			
12:30	0,000162824	8,69825E-05	0,000124688	6,29771E-05	109,4	0,000124409	0,000112786	0,000100041			112,4
3	7,9829	8,0465	8,0186	7,9385		8,0365	7,9786	7,9957			
20-jui	-0,0012	-0,0011	-0,0014	-0,0009		-0,0015	-0,0011	-0,001			
10:45	0,000150299	0,000136687	0,000174564	0,000113359	143,7	0,000186614	0,00013785	0,000125052			149,8
7	7,9823	8,0459	8,0179	7,938		8,0363	7,978	7,995			
24-jui	-0,0018	-0,0017	-0,0021	-0,0014		-0,0017	-0,0017	-0,0017			
13:45	0,000225448	0,000211243	0,000261845	0,000176336	218,7	0,000211495	0,000213041	0,000212588			212,4
14	7,9819	8,0455	8,0173	7,9375		8,036	7,9778	7,9948			
31-jui	-0,0022	-0,0021	-0,0027	-0,0019		-0,002	-0,0019	-0,0019			
13:00	0,000275548	0,000260947	0,000336658	0,000239313	278,1	0,000248818	0,000238104	0,000237598			241,5
21	7,9815	8,0452	8,0171	7,9374		8,0356	7,9774	7,9943			
7-août	-0,0026	-0,0024	-0,0029	-0,002		-0,0024	-0,0023	-0,0024			
14:15	0,000325647	0,000298226	0,000361596	0,000251908	309,3	0,000298582	0,000288231	0,000300124			295,6
28	7,9813	8,0451	8,017	7,9371		8,0354	7,9773	7,9942			
14-août	-0,0028	-0,0025	-0,003	-0,0023		-0,0026	-0,0024	-0,0025			
09:45	0,000350697	0,000310652	0,000374065	0,000289694	331,3	0,000323464	0,000300763	0,000312629			312,3
42	7,981	8,0446	8,0166	7,9368		8,035	7,9768	7,9937			
28-août	-0,0031	-0,003	-0,0034	-0,0026		-0,003	-0,0029	-0,003			
08:45	0,000388272	0,000372782	0,00042394	0,000327481	378,1	0,000373227	0,000363422	0,000375155			370,6
56	7,9808	8,0445	8,0163	7,9366		8,0346	7,9764	7,9934			
11-sep	-0,0033	-0,0031	-0,0037	-0,0028		-0,0034	-0,0033	-0,0033			
08:45	0,000413321	0,000385208	0,000461347	0,000352671	403,1	0,000422991	0,000413549	0,00041267			416,4
98	7,98	8,0439	8,0158	7,936		8,0342	7,976	7,993			
23-oct	-0,0041	-0,0037	-0,0042	-0,0034		-0,0038	-0,0037	-0,0037			
11:15	0,000513521	0,000459764	0,000523691	0,000428244	481,3	0,000472754	0,000463677	0,000462691			466,4

Mesure de retrait libre

Mélange : 40-D-100

Date de gâchage : 22 septembre 1997

Côté coffrage

Jour, date, et heure	Distance entre deux plots									
		retrait # 1	retrait #2	retrait #3	retrait #4	moyenne verticale	retrait #5	retrait #6	retrait #7	moyenne horizontale
Initial	L=	8,05	7,9792	7,9639	7,992		7,9888	8,0439	8,0179	
25-sep	d=	0	0	0	0		0	0	0	
17:30	e=	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	L=	8,0497	7,9789	7,9636	7,9917		7,9884	8,0437	8,0176	
26-sep	d=	-0,0003	-0,0003	-0,0003	-0,0003		-0,0004	-0,0002	-0,0003	
15:00	e=	3,72671E-05	3,75978E-05	3,767E-05	3,75375E-05	37,5	5,00701E-05	2,48636E-05	3,74163E-05	37,4
3	L=	8,0496	7,9786	7,9632	7,9914		7,9878	8,0432	8,0173	
28-sep	d=	-0,0004	-0,0006	-0,0007	-0,0006		-0,001	-0,0007	-0,0006	
12:15	e=	4,96894E-05	7,51955E-05	8,78966E-05	7,50751E-05	72,0	0,000125175	8,70225E-05	7,48326E-05	95,7
7	L=	8,0489	7,9778	7,9622	7,9908		7,9871	8,0429	8,0168	
02-oct	d=	-0,0011	-0,0014	-0,0017	-0,0012		-0,0017	-0,001	-0,0011	
14:00	e=	0,000136646	0,000175456	0,000213463	0,00015015	168,9	0,000212798	0,000124318	0,000137193	158,1
14	L=	8,0484	7,9773	7,9618	7,9903		7,9866	8,0422	8,0163	
09-oct	d=	-0,0016	-0,0019	-0,0021	-0,0017		-0,0022	-0,0017	-0,0016	
13:00	e=	0,000198758	0,000238119	0,00026369	0,000212713	228,3	0,000275386	0,00021134	0,000199553	228,8
21	L=	8,0481	7,9769	7,9613	7,9899		7,9864	8,042	8,0161	
16-oct	d=	-0,0019	-0,0023	-0,0026	-0,0021		-0,0024	-0,0019	-0,0018	
08:45	e=	0,000236025	0,000288249	0,000326473	0,000262763	278,4	0,000300421	0,000236204	0,000224498	253,7
28	L=	8,0477	7,9767	7,961	7,9895		7,986	8,0416	8,0158	
23-oct	d=	-0,0023	-0,0025	-0,0029	-0,0025		-0,0028	-0,0023	-0,0021	
11:00	e=	0,000285714	0,000313315	0,000364143	0,000312813	319,0	0,000350491	0,000285931	0,000261914	299,4
42	L=	8,0474	7,9764	7,9606	7,9893		7,9859	8,0415	8,0158	
06-nov	d=	-0,0026	-0,0028	-0,0033	-0,0027		-0,0029	-0,0024	-0,0021	
08:15	e=	0,000322981	0,000350912	0,00041437	0,000337838	356,5	0,000363008	0,000298363	0,000261914	307,8
56	L=	8,0465	7,9756	7,9599	7,9888		7,9849	8,0392	8,0151	
20-nov	d=	-0,0035	-0,0036	-0,004	-0,0032		-0,0039	-0,0047	-0,0028	
08:30	e=	0,000434783	0,000451173	0,000502266	0,0004004	447,2	0,000488183	0,000584294	0,000349219	473,9
98	L=	8,0457	7,9749	7,9591	7,9878		7,9843	8,0385	8,0144	
01-jan	d=	-0,0043	-0,0043	-0,0048	-0,0042		-0,0045	-0,0054	-0,0035	
12:30	e=	0,000534161	0,000538901	0,00060272	0,000525526	550,3	0,000563289	0,000671316	0,000436523	557,0

Mesure de retrait libre

Mélange : 40-D-100

Date de gâchage : 22 septembre 1997

Côté truelle

Jour, date, et heure	Distance entre deux plots									
		retrait #1	retrait #2	retrait #3	retrait #4	moyenne verticale	retrait #5	retrait #6	retrait #7	moyenne horizontale
Initial	L=	8,0213	7,9796	8,0022	7,972		7,9855	7,9766	7,9789	
25-sep	d=	0	0	0	0		0	0	0	
17:30	e=	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	L=	8,0204	7,9792	8,0016	7,971		7,9853	7,9762	7,9788	
26-sep	d=	-0,0009	-0,0004	-0,0006	-0,001		-0,0002	-0,0004	-0,0001	
15:00	e=	0,000112201	5,01278E-05	7,49794E-05	0,000125439	90,7	2,50454E-05	5,01467E-05	1,25331E-05	29,2
3	L=	8,0199	7,9787	8,0011	7,9708		7,9845	7,9755	7,9777	
28-sep	d=	-0,0014	-0,0009	-0,0011	-0,0012		-0,001	-0,0011	-0,0012	
12:15	e=	0,000174535	0,000112788	0,000137462	0,000150527	143,8	0,000125227	0,000137903	0,000150397	137,8
7	L=	8,0193	7,9781	8,0003	7,97		7,9838	7,9748	7,9771	
02-oct	d=	-0,002	-0,0015	-0,0019	-0,002		-0,0017	-0,0018	-0,0018	
14:00	e=	0,000249336	0,000187979	0,000237435	0,000250878	231,4	0,000212886	0,00022566	0,000225595	221,4
14	L=	8,019	7,9776	7,9998	7,9696		7,9831	7,9742	7,9764	
09-oct	d=	-0,0023	-0,002	-0,0024	-0,0024		-0,0024	-0,0024	-0,0025	
13:00	e=	0,000286737	0,000250639	0,000299918	0,000301054	284,6	0,000300545	0,00030088	0,000313326	304,9
21	L=	8,0183	7,977	7,9993	7,9692		7,9827	7,9739	7,976	
16-oct	d=	-0,003	-0,0026	-0,0029	-0,0028		-0,0028	-0,0027	-0,0029	
08:45	e=	0,000374004	0,000325831	0,0003624	0,000351229	353,4	0,000350636	0,00033849	0,000363459	350,9
28	L=	8,0182	7,9767	7,999	7,9689		7,9824	7,9734	7,9756	
23-oct	d=	-0,0031	-0,0029	-0,0032	-0,0031		-0,0031	-0,0032	-0,0033	
11:00	e=	0,000386471	0,000363427	0,00039989	0,000388861	384,7	0,000388204	0,000401173	0,000413591	401,0
42	L=	8,0176	7,9762	7,9985	7,9686		7,9816	7,9731	7,9752	
06-nov	d=	-0,0037	-0,0034	-0,0037	-0,0034		-0,0039	-0,0035	-0,0037	
08:15	e=	0,000461272	0,000426087	0,000462373	0,000426493	444,1	0,000488385	0,000438783	0,000463723	463,6
56	L=	8,0171	7,9756	7,998	7,968		7,981	7,9723	7,9745	
20-nov	d=	-0,0042	-0,004	-0,0042	-0,004		-0,0045	-0,0043	-0,0044	
08:30	e=	0,000523606	0,000501278	0,000524856	0,000501756	512,9	0,000563521	0,000539077	0,000551454	551,4
98	L=	8,0164	7,9751	7,9973	7,9674		7,9804	7,9717	7,9737	
01-jan	d=	-0,0049	-0,0045	-0,0049	-0,0046		-0,0051	-0,0049	-0,0052	
12:30	e=	0,000610874	0,000563938	0,000612332	0,00057702	591,0	0,000638658	0,000614297	0,000651719	634,9

Mesure de retrait libre

Mélange : 60-T-100

Date de gâchage : 23 septembre 1997

Côté coffrage

Jour, date, et heure	Distance entre deux plots											moyenne horizontale
	retrait #1	retrait #2	retrait #3	retrait #4	moyenne verticale	retrait #5	retrait #6	retrait #7				
Initial	L= 7,9907	8,0256	7,9934	8,0313		7,9787	8,0046	7,9938				
26-sep	d= 0	0	0	0		0	0	0				
15:30	e= 0	0	0	0		0	0	0				0
1	L= 7,9905	8,0254	7,9933	8,0311		7,9787	8,0043	7,9939				
27-sep	d= -0,0002	-0,0002	-0,0001	-0,0002		0	-0,0003	1E-04				
09:30	e= 2,50291E-05	2,49203E-05	1,25103E-05	2,49026E-05	21,8	0	3,74784E-05	-1,25097E-05				8,3
3	L= 7,9902	8,0252	7,9931	8,0311		7,9788	8,0042	7,9939				
29-sep	d= -0,0005	-0,0004	-0,0003	-0,0002		1E-04	-0,0004	1E-04				
08:30	e= 6,25727E-05	4,98405E-05	3,7531E-05	2,49026E-05	43,7	-1,25334E-05	4,99713E-05	-1,25097E-05				8,3
7	L= 7,99	8,0248	7,9925	8,0309		7,9784	8,0038	7,9934				
03-oct	d= -0,0007	-0,0008	-0,0009	-0,0004		-0,0003	-0,0008	-0,0004				
08:30	e= 8,76018E-05	9,9681E-05	0,000112593	4,98051E-05	87,4	3,76001E-05	9,99425E-05	5,00388E-05				62,5
14	L= 7,9894	8,0242	7,9918	8,0302		7,978	8,0031	7,9929				
10-oct	d= -0,0013	-0,0014	-0,0016	-0,0011		-0,0007	-0,0015	-0,0009				
09:15	e= 0,000162689	0,000174442	0,000200165	0,000136964	168,6	8,77336E-05	0,000187392	0,000112587				129,2
21	L= 7,9888	8,0237	7,9913	8,03		7,9775	8,0027	7,9922				
17-oct	d= -0,0019	-0,0019	-0,0021	-0,0013		-0,0012	-0,0019	-0,0016				
13:45	e= 0,000237776	0,000236742	0,000262717	0,000161867	224,8	0,0001504	0,000237364	0,000200155				196,0
28	L= 7,9887	8,0234	7,9912	8,0296		7,9773	8,0024	7,9922				
24-oct	d= -0,002	-0,0022	-0,0022	-0,0017		-0,0014	-0,0022	-0,0016				
09:00	e= 0,000250291	0,000274123	0,000275227	0,000211672	252,8	0,000175467	0,000274842	0,000200155				216,8
42	L= 7,9883	8,023	7,9908	8,0291		7,9769	8,002	7,9918				
07-nov	d= -0,0024	-0,0026	-0,0026	-0,0022		-0,0018	-0,0026	-0,002				
09:15	e= 0,000300349	0,000323963	0,000325268	0,000273928	305,9	0,000225601	0,000324813	0,000250194				266,9
56	L= 7,9875	8,0223	7,9901	8,0283		7,9761	8,0013	7,991				
21-nov	d= -0,0032	-0,0033	-0,0033	-0,003		-0,0026	-0,0033	-0,0028				
10:30	e= 0,000400466	0,000411184	0,000412841	0,000373539	399,5	0,000325868	0,000412263	0,000350271				362,8
98	L= 7,9867	8,0214	7,9894	8,0275		7,9755	8,0006	7,9903				
02-jan	d= -0,004	-0,0042	-0,004	-0,0038		-0,0032	-0,004	-0,0035				
12:30	e= 0,000500582	0,000523325	0,000500413	0,000473149	499,4	0,000401068	0,000499713	0,000437839				446,2

Mesure de retrait libre

Mélange : 60-T-100

Date de gâchage : 23 septembre 1997

Côté truelle

Jour, date, et heure	Distance entre deux plots											moyenne horizontale
	retrait #1	retrait #2	retrait #3	retrait #4	moyenne verticale	retrait #5	retrait #6	retrait #7				
Initial	8,0303	7,99	7,9857	8,0047		8,0057	7,9762	8,0327				
26-sep 15:30	0	0	0	0		0	0	0				0
1	8,03	7,9897	7,9853	8,0045		8,0056	7,9761	8,0323				
27-sep	-0,0003	-0,0003	-0,0004	-0,0002		-1E-04	-0,0001	-0,0004				
09:30	3,73585E-05	3,75469E-05	5,00895E-05	2,49853E-05	37,5	1,24911E-05	1,25373E-05	4,97965E-05				24,9
3	8,0296	7,9892	7,985	8,0042		8,005	7,9756	8,0319				
29-sep	-0,0007	-0,0008	-0,0007	-0,0005		-0,0007	-0,0006	-0,0008				
08:30	8,71698E-05	0,000100125	8,76567E-05	6,24633E-05	84,4	8,74377E-05	7,52238E-05	9,95929E-05				87,4
7	8,0291	7,9889	7,9844	8,0035		8,0045	7,975	8,0314				
03-oct	-0,0012	-0,0011	-0,0013	-0,0012		-0,0012	-0,0012	-0,0013				
08:30	0,000149434	0,000137672	0,000162791	0,000149912	150,0	0,000149893	0,000150448	0,000161838				154,1
14	8,0286	7,9885	7,9843	8,0033		8,0038	7,9743	8,0309				
10-oct	-0,0017	-0,0015	-0,0014	-0,0014		-0,0019	-0,0019	-0,0018				
09:15	0,000211698	0,000187735	0,000175313	0,000174897	187,4	0,000237331	0,000238209	0,000224084				233,2
21	8,028	7,9875	7,9834	8,0023		8,003	7,9738	8,0302				
17-oct	-0,0023	-0,0025	-0,0023	-0,0024		-0,0027	-0,0024	-0,0025				
13:45	0,000286415	0,000312891	0,000288015	0,000299824	296,8	0,00033726	0,000300895	0,000311228				316,5
28	8,0279	7,9871	7,9833	8,0023		8,0029	7,9736	8,0298				
24-oct	-0,0024	-0,0029	-0,0024	-0,0024		-0,0028	-0,0026	-0,0029				
09:00	0,000298868	0,000362954	0,000300537	0,000299824	315,5	0,000349751	0,00032597	0,000361024				345,6
42	8,0275	7,9868	7,9827	8,002		8,0023	7,9733	8,0294				
07-nov	-0,0028	-0,0032	-0,003	-0,0027		-0,0034	-0,0029	-0,0033				
09:15	0,000348679	0,000400501	0,000375672	0,000337302	365,5	0,000424697	0,000363582	0,000410821				399,7
56	8,0265	7,9861	7,9821	8,0012		8,0014	7,9723	8,0282				
21-nov	-0,0038	-0,0039	-0,0036	-0,0035		-0,0043	-0,0039	-0,0045				
10:30	0,000473208	0,00048811	0,000450806	0,000437243	462,3	0,000537117	0,000488955	0,00056021				528,8
98	8,0257	7,9855	7,9813	8		8,0008	7,9717	8,0268				
02-jan	-0,0046	-0,0045	-0,0044	-0,0047		-0,0049	-0,0045	-0,0059				
12:30	0,00057283	0,000563204	0,000550985	0,000587155	568,5	0,000612064	0,000564178	0,000734498				636,9

Mesure de retrait libre

Mélange : 80-D-100

Date de gâchage : 11 novembre 1997

Côté coffrage

Jour, date, et heure	Distance entre deux plots									
		retrait # 1	retrait #2	retrait #3	retrait #4	moyenne verticale	retrait #5	retrait #6	retrait #7	moyenne horizontale
Initial	L=	7,9986	7,9897	8,0355	8,0083		7,9806	8,0007	7,9859	
14-nov	d=	0	0	0	0		0	0	0	
16:00	e=	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	L=	7,9984	7,9896	8,0353	8,0084		7,9804	8,0003	7,9854	
15-nov	d=	-0,0002	-1E-04	-0,0002	1E-04		-0,0002	-0,0004	-0,0005	
11:00	e=	2,50044E-05	1,25161E-05	2,48896E-05	-1,2487E-05	12,5	2,50608E-05	4,99956E-05	6,26104E-05	45,9
3	L=	7,9981	7,9893	8,035	8,0081		7,9802	8	7,9851	
17-nov	d=	-0,0005	-0,0004	-0,0005	-0,0002		-0,0004	-0,0007	-0,0008	
09:15	e=	6,25109E-05	5,00645E-05	6,22239E-05	2,49741E-05	49,9	5,01215E-05	8,74923E-05	0,000100177	79,3
7	L=	7,9978	7,9891	8,0345	8,0079		7,9798	7,9996	7,9849	
21-nov	d=	-0,0008	-0,0006	-0,001	-0,0004		-0,0008	-0,0011	-0,001	
10:30	e=	0,000100018	7,50967E-05	0,000124448	4,99482E-05	87,4	0,000100243	0,000137488	0,000125221	121,0
14	L=	7,9971	7,9886	8,034	8,0073		7,9792	7,9991	7,9845	
28-nov	d=	-0,0015	-0,0011	-0,0015	-0,001		-0,0014	-0,0016	-0,0014	
15:00	e=	0,000187533	0,000137677	0,000186672	0,00012487	159,2	0,000175425	0,000199983	0,000175309	183,6
21	L=	7,9967	7,9883	8,0336	8,0069		7,9787	7,9987	7,984	
05-déc	d=	-0,0019	-0,0014	-0,0019	-0,0014		-0,0019	-0,002	-0,0019	
17:00	e=	0,000237542	0,000175226	0,000236451	0,000174819	206,0	0,000238077	0,000249978	0,000237919	242,0
28	L=	7,9963	7,9879	8,0332	8,0065		7,9783	7,9982	7,9836	
12-déc	d=	-0,0023	-0,0018	-0,0023	-0,0018		-0,0023	-0,0025	-0,0023	
14:00	e=	0,00028755	0,00022529	0,00028623	0,000224767	256,0	0,000288199	0,000312473	0,000288008	296,2
42	L=	7,9959	7,9878	8,0331	8,0064		7,9781	7,998	7,9834	
26-déc	d=	-0,0027	-0,0019	-0,0024	-0,0019		-0,0025	-0,0027	-0,0025	
13:15	e=	0,000337559	0,000237806	0,000298675	0,000237254	277,8	0,00031326	0,00033747	0,000313052	321,3
57	L=	7,9953	7,9872	8,0325	8,0058		7,9772	7,9974	7,9829	
10-jan	d=	-0,0033	-0,0025	-0,003	-0,0025		-0,0034	-0,0033	-0,003	
11:00	e=	0,000412572	0,000312903	0,000373343	0,000312176	352,7	0,000426033	0,000412464	0,000375662	404,7
98	L=									
20-fév	d=	-7,9986	-7,9897	-8,0355	-8,0083		-7,9806	-8,0007	-7,9859	
	e=	1	1	1	1	1000000,0	1	1	1	1000000,0

Mesure de retrait libre

Mélange : 80-D-100

Date de gâchage : 11 novembre 1997

Côté truelle

Jour, date, et heure	Distance entre deux plots										moyenne horizontale
	retrait # 1	retrait #2	retrait #3	retrait #4	moyenne verticale	retrait #5	retrait #6	retrait #7			
Initial	7,9238	8,0047	7,9883	7,9939		7,9981	8,0295	7,9903			
14-nov	0	0	0	0		0	0	0			
16:00	0	0	0	0		0	0	0			0
1	7,9238	8,0043	7,9881	7,9939		7,9979	8,0294	7,9901			
15-nov	0	-0,0004	-0,0002	0		-0,0002	-1E-04	-0,0002			
11:00	0	4,99706E-05	2,50366E-05	0	18,8	2,50059E-05	1,24541E-05	2,50303E-05			20,8
3	7,9236	8,0041	7,9878	7,9936		7,9978	8,0293	7,9898			
17-nov	-0,0002	-0,0006	-0,0005	-0,0003		-0,0003	-0,0002	-0,0005			
09:15	2,52404E-05	7,4956E-05	6,25915E-05	3,75286E-05	50,1	3,75089E-05	2,49082E-05	6,25759E-05			41,7
7	7,9232	8,0037	7,9876	7,9933		7,9974	8,029	7,9895			
21-nov	-0,0006	-0,001	-0,0007	-0,0006		-0,0007	-0,0005	-0,0008			
10:30	7,57212E-05	0,000124927	8,76282E-05	7,50572E-05	90,8	8,75208E-05	6,22704E-05	0,000100121			83,3
14	7,9224	8,003	7,9868	7,9925		7,9969	8,0283	7,9889			
28-nov	-0,0014	-0,0017	-0,0015	-0,0014		-0,0012	-0,0012	-0,0014			
15:00	0,000176683	0,000212375	0,00018775	0,000175134	188,0	0,000150036	0,000149449	0,000175212			158,2
21	7,9221	8,0029	7,9864	7,9922		7,9966	8,028	7,9886			
05-déc	-0,0017	-0,0018	-0,0019	-0,0017		-0,0015	-0,0015	-0,0017			
17:00	0,000214544	0,000224868	0,000237848	0,000212662	222,5	0,000187545	0,000186811	0,000212758			195,7
28	7,9218	8,0025	7,986	7,992		7,996	8,0274	7,988			
12-déc	-0,002	-0,0022	-0,0023	-0,0019		-0,0021	-0,0021	-0,0023			
14:00	0,000252404	0,000274839	0,000287921	0,000237681	263,2	0,000262562	0,000261536	0,000287849			270,6
42	7,9214	8,002	7,9857	7,9914		7,9958	8,0271	7,9877			
26-déc	-0,0024	-0,0027	-0,0026	-0,0025		-0,0023	-0,0024	-0,0026			
13:15	0,000302885	0,000337302	0,000325476	0,000312738	319,6	0,000287568	0,000298898	0,000325395			304,0
57	7,9209	8,0015	7,985	7,9908		7,9953	8,0267	7,9871			
10-jan	-0,0029	-0,0032	-0,0033	-0,0031		-0,0028	-0,0028	-0,0032			
11:00	0,000365986	0,000399765	0,000413104	0,000387796	391,7	0,000350083	0,000348714	0,000400486			366,4
98											
20-fév	-7,9238	-8,0047	-7,9883	-7,9939	1000000,0	-7,9981	-8,0295	-7,9903			
e=	1	1	1	1	1000000,0	1	1	1			1000000,0

mélange 40-X-X

temps (jour)	déformation ($\mu\text{m}/\text{m}$)	température ($^{\circ}\text{C}$)	delta T ($^{\circ}\text{C}$)	retrait corr. ($\mu\text{m}/\text{m}$)
0	0	23	0	0
1	9	24,4	1,4	16
3	50	24	1	55
7	111	25,2	2,2	122
14	168	25,2	2,2	179
21	204	25,5	2,5	217
28	213	24,7	1,7	222
42	271	21,7	-1,3	265
56	293	22,4	-0,6	290
98	368	19,7	-3,3	352

mélange 40-T-40

temps (jour)	déformation ($\mu\text{m}/\text{m}$)	température ($^{\circ}\text{C}$)	delta T ($^{\circ}\text{C}$)	retrait corr. ($\mu\text{m}/\text{m}$)	masse (kg)	perte de masse (%)
0	0	25,2	0	0	42,05	0,00
1	45	25,9	0,7	49	42,00	0,12
3	108	22,6	-2,6	95	42,00	0,12
7	169	25,3	0,1	170	41,95	0,24
14	214	25,6	0,4	216	41,90	0,36
21	235	24,8	-0,4	233	41,90	0,36
28	288	23,6	-1,6	280	41,90	0,36
42	340	22,4	-2,8	326	41,85	0,48
56	370	21,1	-4,1	350	41,85	0,48
98	460	16,3	-8,9	416	41,80	0,59

mélange 40-T-60

temps (jour)	déformation ($\mu\text{m}/\text{m}$)	température ($^{\circ}\text{C}$)	delta T ($^{\circ}\text{C}$)	retrait corr. ($\mu\text{m}/\text{m}$)	masse (kg)	perte de masse (%)
0	0	25,8	0	0	40,55	0,00
1	33	25,2	-0,6	30	40,50	0,12
3	54	26,3	0,5	57	40,50	0,12
7	136	24,8	-1	131	40,45	0,25
14	176	24	-1,8	167	40,40	0,37
21	217	22,8	-3	202	40,40	0,37
28	241	23,8	-2	231	40,35	0,49
42	302	20,9	-4,9	278	40,30	0,62
56	340	20,4	-5,4	313	40,30	0,62
98	439	16,9	-8,9	395	40,25	0,74

mélange 40-T-100

temps (jour)	déformation ($\mu\text{m}/\text{m}$)	température ($^{\circ}\text{C}$)	delta T ($^{\circ}\text{C}$)	retrait corr. ($\mu\text{m}/\text{m}$)	masse (kg)	perte de masse (%)
0	0	26,9	0	0	40,50	0,00
1	61	24,8	-2,1	51	40,45	0,12
3	104	21,9	-5	79	40,45	0,12
7	155	25,4	-1,5	148	40,40	0,25
14	202	24,4	-2,5	190	40,35	0,37
21	252	23,6	-3,3	236	40,35	0,37
28	274	21,9	-5	249	40,30	0,49
42	315	22,3	-4,6	292	40,30	0,49
56	340	21,2	-5,7	312	40,25	0,62
98	423	20,8	-6,1	393	40,20	0,74

mélange 40-D-100

temps (jour)	déformation ($\mu\text{m}/\text{m}$)	température ($^{\circ}\text{C}$)	delta T ($^{\circ}\text{C}$)	retrait corr. ($\mu\text{m}/\text{m}$)	masse (kg)	perte de masse (%)
0	0	19,8	0	0	39,95	0,00
1	51	18,2	-1,6	43	39,90	0,13
3	112	18,1	-1,7	104	39,90	0,13
7	196	17,3	-2,5	184	39,85	0,25
14	261	19,6	-0,2	260	39,85	0,25
21	310	16,3	-3,5	293	39,80	0,38
28	351	20,7	0,9	356	39,75	0,50
42	394	21,7	1,9	404	39,70	0,63
56	494	17,1	-2,7	481	39,70	0,63
98	581	18,5	-1,3	575	39,55	1,00

mélange 60-T-100

temps (jour)	déformation ($\mu\text{m}/\text{m}$)	température ($^{\circ}\text{C}$)	delta T ($^{\circ}\text{C}$)	retrait corr. ($\mu\text{m}/\text{m}$)	masse (kg)	perte de masse (%)
0	0	18,2	0	0	39,35	0,00
1	24	17,1	-1,1	19	39,25	0,25
3	57	17,4	-0,8	53	39,20	0,38
7	114	17,1	-1,1	109	39,10	0,64
14	179	18,5	0,3	181	39,05	0,76
21	259	16,8	-1,4	252	39,00	0,89
28	283	22,1	3,9	303	38,90	1,14
42	335	22,1	3,9	355	38,85	1,27
56	437	17,8	-0,4	435	38,80	1,40
98	537	18,5	0,3	539	38,60	1,91

Annexe C:

Calcul du module élastique du béton

MODULE ELASTIQUE EN COMPRESSION

Mélange 40-X-X

Essai à 28 jours (date de l'essai: 28/07/97)

Echantillon No 5

Longueur= 10 pouces

$\Phi =$ 152,55 mm
152,60 mm

Aire= 18283,3864 mm²

Charge (lbs)	Contrainte (MPa)	Lecture 1 (0.0001")	Lecture 2 (0.0001")	Delta L observé	Delta L réel	ϵ (10-6)
0	0,00	0	0	0	0	0,00
6000	1,46	6	6	0,0006	0,0003	30,00
12000	2,92	15	16	0,00155	0,000775	77,50
18000	4,38	25	25	0,0025	0,00125	125,00
24000	5,84	35	34	0,00345	0,001725	172,50
30000	7,30	46	44	0,0045	0,00225	225,00
36000	8,76	56	54	0,0055	0,00275	275,00
42000	10,22	66	64	0,0065	0,00325	325,00
48000	11,68	77	75	0,0076	0,0038	380,00
54000	13,14	87	85	0,0086	0,0043	430,00
60000	14,60	97	95	0,0096	0,0048	480,00
66000	16,06	107	104	0,01055	0,005275	527,50
72000	17,52	118	114	0,0116	0,0058	580,00
78000	18,98	128	124	0,0126	0,0063	630,00

Module élastique= 29009,5829 MPa

Echantillon No 6

Longueur= 10 pouces

$\Phi =$ 152,75 mm
153,30 mm

Aire= 18391,3944 mm²

Charge (lbs)	Contrainte (MPa)	Lecture 1 (0.0001")	Lecture 2 (0.0001")	Delta L observé	Delta L réel	ϵ (10-6)
0	0,00	0	0	0	0	0,00
6000	1,45	6	6	0,0006	0,0003	30,00
12000	2,90	14	15	0,00145	0,000725	72,50
18000	4,36	23	23	0,0023	0,00115	115,00
24000	5,81	32	32	0,0032	0,0016	160,00
30000	7,26	41	41	0,0041	0,00205	205,00
36000	8,71	51	51	0,0051	0,00255	255,00
42000	10,16	61	61	0,0061	0,00305	305,00
48000	11,61	71	72	0,00715	0,003575	357,50
54000	13,07	83	82	0,00825	0,004125	412,50
60000	14,52	95	92	0,00935	0,004675	467,50
66000	15,97	104	101	0,01025	0,005125	512,50
72000	17,42	115	111	0,0113	0,00565	565,00
78000	18,87	126	122	0,0124	0,0062	620,00

Module élastique= 29207,7483 MPa

MODULE ELASTIQUE EN COMPRESSION

Mélange 40-T-40

Essai à 28 jours (date de l'essai: 04/08/97)

Echantillon No 5

Longueur= 10 pouces

Φ = 152,15 mm
154,04 mm

Aire= 18408,2242 mm²

Charge (lbs)	Contrainte (MPa)	Lecture 1 (0.0001")	Lecture 2 (0.0001")	Delta L observé	Delta L réel	ϵ (10-6)
0	0,00	0	0	0	0	0,00
6000	1,45	5	8	0,00065	0,000325	32,50
12000	2,90	11	17	0,0014	0,0007	70,00
18000	4,35	21	26	0,00235	0,001175	117,50
24000	5,80	30	36	0,0033	0,00165	165,00
30000	7,25	40	46	0,0043	0,00215	215,00
36000	8,70	50	56	0,0053	0,00265	265,00
42000	10,15	59	66	0,00625	0,003125	312,50
48000	11,60	70	76	0,0073	0,00365	365,00
54000	13,05	80	85	0,00825	0,004125	412,50
60000	14,50	90	95	0,00925	0,004625	462,50
66000	15,95	100	104	0,0102	0,0051	510,00
72000	17,40	110	113	0,01115	0,005575	557,50
78000	18,85	121	123	0,0122	0,0061	610,00

Module élastique= 29782,7482 MPa

MODULE ELASTIQUE EN COMPRESSION

Mélange 40-T-60

Essai à 28 jours (date de l'essai: 05/08/97)

Echantillon No 5

Longueur= 10 pouces

Φ = 152,50 mm
152,42 mm

Aire= 18255,8354 mm²

Charge (lbs)	Contrainte (MPa)	Lecture 1 (0.0001")	Lecture 2 (0.0001")	Delta L observé	Delta L réel	ϵ (10-6)
0	0,00	0	0	0	0	0,00
6000	1,46	10	11	0,00105	0,000525	52,50
12000	2,92	20	21	0,00205	0,001025	102,50
18000	4,39	29	30	0,00295	0,001475	147,50
24000	5,85	39	40	0,00395	0,001975	197,50
30000	7,31	49	50	0,00495	0,002475	247,50
36000	8,77	59	60	0,00595	0,002975	297,50
42000	10,24	69	71	0,007	0,0035	350,00
48000	11,70	79	81	0,008	0,004	400,00
54000	13,16	89	91	0,009	0,0045	450,00
60000	14,62	99	101	0,01	0,005	500,00
66000	16,09	110	111	0,01105	0,005525	552,50
72000	17,55	121	121	0,0121	0,00605	605,00
78000	19,01	133	132	0,01325	0,006625	662,50

Module élastique= 28898,7813 MPa

Echantillon No 6

Longueur= 10 pouces

Φ = 152,39 mm
153,44 mm

Aire= 18364,9631 mm²

Charge (lbs)	Contrainte (MPa)	Lecture 1 (0.0001")	Lecture 2 (0.0001")	Delta L observé	Delta L réel	ϵ (10-6)
0	0,00	0	0	0	0	0,00
6000	1,45	9	8	0,00085	0,000425	42,50
12000	2,91	19	18	0,00185	0,000925	92,50
18000	4,36	30	29	0,00295	0,001475	147,50
24000	5,82	40	41	0,00405	0,002025	202,50
30000	7,27	50	53	0,00515	0,002575	257,50
36000	8,72	60	65	0,00625	0,003125	312,50
42000	10,18	70	76	0,0073	0,00365	365,00
48000	11,63	84	86	0,0085	0,00425	425,00
54000	13,08	95	96	0,00955	0,004775	477,50
60000	14,54	106	106	0,0106	0,0053	530,00
66000	15,99	118	116	0,0117	0,00585	585,00
72000	17,45	129	126	0,01275	0,006375	637,50
78000	18,90	141	137	0,0139	0,00695	695,00

Module élastique= 26656,7343 MPa

MODULE ELASTIQUE EN COMPRESSION

Mélange 40-T-100

Essai à 28 jours (date de l'essai: 11/08/97)

Echantillon No 5

Longueur= 10 pouces

$\Phi =$ 152,43 mm
152,71 mm

Aire= 18282,1881 mm²

Charge (lbs)	Contrainte (MPa)	Lecture 1 (0.0001")	Lecture 2 (0.0001")	Delta L observé	Delta L réel	ϵ (10-6)
0	0,00	0	0	0	0	0,00
6000	1,46	10	8	0,0009	0,00045	45,00
12000	2,92	19	16	0,00175	0,000875	87,50
18000	4,38	28	25	0,00265	0,001325	132,50
24000	5,84	37	35	0,0036	0,0018	180,00
30000	7,30	46	45	0,00455	0,002275	227,50
36000	8,76	56	54	0,0055	0,00275	275,00
42000	10,22	65	63	0,0064	0,0032	320,00
48000	11,68	74	73	0,00735	0,003675	367,50
54000	13,14	84	83	0,00835	0,004175	417,50
60000	14,60	94	93	0,00935	0,004675	467,50
66000	16,06	104	102	0,0103	0,00515	515,00
72000	17,52	115	112	0,01135	0,005675	567,50
78000	18,98	123	122	0,01225	0,006125	612,50

Module élastique= 30646,2437 MPa

Echantillon No 6

Longueur= 10 pouces

$\Phi =$ 152,47 mm
152,13 mm

Aire= 18217,5382 mm²

Charge (lbs)	Contrainte (MPa)	Lecture 1 (0.0001")	Lecture 2 (0.0001")	Delta L observé	Delta L réel	ϵ (10-6)
0	0,00	0	0	0	0	0,00
6000	1,47	8	8	0,0008	0,0004	40,00
12000	2,93	14	17	0,00155	0,000775	77,50
18000	4,40	25	27	0,0026	0,0013	130,00
24000	5,86	35	37	0,0036	0,0018	180,00
30000	7,33	45	47	0,0046	0,0023	230,00
36000	8,79	54	56	0,0055	0,00275	275,00
42000	10,26	64	65	0,00645	0,003225	322,50
48000	11,72	73	75	0,0074	0,0037	370,00
54000	13,19	84	85	0,00845	0,004225	422,50
60000	14,66	95	95	0,0095	0,00475	475,00
66000	16,12	105	105	0,0105	0,00525	525,00
72000	17,59	115	114	0,01145	0,005725	572,50
78000	19,05	127	124	0,01255	0,006275	627,50

Module élastique= 29806,0441 MPa

MODULE ELASTIQUE EN COMPRESSION

Mélange 40-D-100

Essai à 28 jours (date de l'essai: 20/10/97)

Echantillon No 5

Longueur= 10 pouces

Φ = 152,50 mm
152,85 mm

Aire= 18307,3607 mm²

Charge (lbs)	Contrainte (MPa)	Lecture 1 (0.0001")	Lecture 2 (0.0001")	Delta L observé	Delta L réel	ϵ (10-6)
0	0,00	0	0	0	0	0,00
6000	1,46	7	7	0,0007	0,00035	35,00
12000	2,92	18	18	0,0018	0,0009	90,00
18000	4,38	28	28	0,0028	0,0014	140,00
24000	5,83	40	38	0,0039	0,00195	195,00
30000	7,29	48	48	0,0048	0,0024	240,00
36000	8,75	59	58	0,00585	0,002925	292,50
42000	10,21	69	68	0,00685	0,003425	342,50
48000	11,67	80	78	0,0079	0,00395	395,00
54000	13,13	91	88	0,00895	0,004475	447,50
60000	14,58	102	99	0,01005	0,005025	502,50
66000	16,04	114	109	0,01115	0,005575	557,50
72000	17,50	125	119	0,0122	0,0061	610,00
78000	18,96	138	130	0,0134	0,0067	670,00

Module élastique= 27868,6081 MPa

Echantillon No 6

Longueur= 10 pouces

Φ = 152,45 mm
153,00 mm

Aire= 18319,3537 mm²

Charge (lbs)	Contrainte (MPa)	Lecture 1 (0.0001")	Lecture 2 (0.0001")	Delta L observé	Delta L réel	ϵ (10-6)
0	0,00	0	0	0	0	0,00
6000	1,46	10	9	0,00095	0,000475	47,50
12000	2,91	20	19	0,00195	0,000975	97,50
18000	4,37	31	30	0,00305	0,001525	152,50
24000	5,83	42	41	0,00415	0,002075	207,50
30000	7,29	53	51	0,0052	0,0026	260,00
36000	8,74	63	61	0,0062	0,0031	310,00
42000	10,20	74	71	0,00725	0,003625	362,50
48000	11,66	86	82	0,0084	0,0042	420,00
54000	13,12	97	92	0,00945	0,004725	472,50
60000	14,57	108	103	0,01055	0,005275	527,50
66000	16,03	119	113	0,0116	0,0058	580,00
72000	17,49	130	123	0,01265	0,006325	632,50
78000	18,95	142	135	0,01385	0,006925	692,50

Module élastique= 27201,4269 MPa

MODULE ELASTIQUE EN COMPRESSION

Mélange 60-T-100

Essai à 28 jours (date de l'essai: 21/10/97)

Echantillon No 5

Longueur= 10 pouces

Φ = 152,60 mm
152,65 mm

Aire= 18295,3716 mm²

Charge (lbs)	Contrainte (MPa)	Lecture 1 (0.0001")	Lecture 2 (0.0001")	Delta L observé	Delta L réel	ϵ (10-6)
0	0,00	0	0	0	0	0,00
5000	1,22	9	9	0,0009	0,00045	45,00
10000	2,43	19	19	0,0019	0,00095	95,00
15000	3,65	29	29	0,0029	0,00145	145,00
20000	4,86	39	39	0,0039	0,00195	195,00
25000	6,08	50	49	0,00495	0,002475	247,50
30000	7,30	60	60	0,006	0,003	300,00
35000	8,51	72	71	0,00715	0,003575	357,50
40000	9,73	84	82	0,0083	0,00415	415,00
45000	10,94	95	91	0,0093	0,00465	465,00
50000	12,16	105	100	0,01025	0,005125	512,50
55000	13,38	116	111	0,01135	0,005675	567,50
60000	14,59	129	121	0,0125	0,00625	625,00
65000	15,81			0	0	0,00

Module élastique= 23002,7413 MPa

Echantillon No 6

Longueur= 10 pouces

Φ = 152,40 mm
152,75 mm

Aire= 18283,3864 mm²

Charge (lbs)	Contrainte (MPa)	Lecture 1 (0.0001")	Lecture 2 (0.0001")	Delta L observé	Delta L réel	ϵ (10-6)
0	0,00	0	0	0	0	0,00
5000	1,22	8	8	0,0008	0,0004	40,00
10000	2,43	18	18	0,0018	0,0009	90,00
15000	3,65	28	28	0,0028	0,0014	140,00
20000	4,87	38	38	0,0038	0,0019	190,00
25000	6,08	48	48	0,0048	0,0024	240,00
30000	7,30	57	57	0,0057	0,00285	285,00
35000	8,52	67	68	0,00675	0,003375	337,50
40000	9,74	78	77	0,00775	0,003875	387,50
45000	10,95	88	87	0,00875	0,004375	437,50
50000	12,17	99	96	0,00975	0,004875	487,50
55000	13,39	109	16	0,00625	0,003125	312,50
60000	14,60	121	116	0,01185	0,005925	592,50
65000	15,82			0	0	0,00

Module élastique= 24689,4627 MPa

MODULE ELASTIQUE EN COMPRESSION

Mélange 80-D-100

Essai à 3 jours (date de l'essai: 14/11/97)

Echantillon No 2

Longueur= 10 pouces

Φ = 152,20 mm
152,65 mm

Aire= 18247,4545 mm²

Charge (lbs)	Contrainte (MPa)	Lecture 1 (0.0001")	Lecture 2 (0.0001")	Delta L observé	Delta L réel	ϵ (10-6)
0	0,00	0	0	0	0	0,00
1500	0,37	3	3	0,0003	0,00015	15,00
3000	0,73	8	9	0,00085	0,000425	42,50
4500	1,10	13	14	0,00135	0,000675	67,50
6000	1,46	19	20	0,00195	0,000975	97,50
7500	1,83	24	25	0,00245	0,001225	122,50
9000	2,19	30	31	0,00305	0,001525	152,50
10500	2,56	35	35	0,0035	0,00175	175,00
12000	2,93	41	41	0,0041	0,00205	205,00
13500	3,29	46	45	0,00455	0,002275	227,50
15000	3,66	52	51	0,00515	0,002575	257,50
16500	4,02	59	56	0,00575	0,002875	287,50
18000	4,39	66	62	0,0064	0,0032	320,00
19500	4,76	73	68	0,00705	0,003525	352,50

Module élastique= 13206,2866 MPa

Echantillon No 3

Longueur= 10 pouces

Φ = 152,30 mm
152,45 mm

Aire= 18235,485 mm²

Charge (lbs)	Contrainte (MPa)	Lecture 1 (0.0001")	Lecture 2 (0.0001")	Delta L observé	Delta L réel	ϵ (10-6)
0	0,00	0	0	0	0	0,00
1500	0,37	2	2	0,0002	0,0001	10,00
3000	0,73	7	6	0,00065	0,000325	32,50
4500	1,10	10	11	0,00105	0,000525	52,50
6000	1,46	15	15	0,0015	0,00075	75,00
7500	1,83	19	19	0,0019	0,00095	95,00
9000	2,20	24	24	0,0024	0,0012	120,00
10500	2,56	29	28	0,00285	0,001425	142,50
12000	2,93	33	33	0,0033	0,00165	165,00
13500	3,29	38	38	0,0038	0,0019	190,00
15000	3,66	44	44	0,0044	0,0022	220,00
16500	4,03	49	48	0,00485	0,002425	242,50
18000	4,39	56	54	0,0055	0,00275	275,00
19500	4,76	61	58	0,00595	0,002975	297,50

Module élastique= 15210,3387 MPa

MODULE ELASTIQUE EN COMPRESSION

Mélange 80-D-100

Essai à 28 jours (date de l'essai: 09/12/97)

Echantillon No 5

Longueur= 10 pouces

$\Phi =$ 152,40 mm
152,50 mm

Aire= 18253,4407 mm²

Charge (lbs)	Contrainte (MPa)	Lecture 1 (0.0001")	Lecture 2 (0.0001")	Delta L observé	Delta L réel	ϵ (10-6)
0	0,00	0	0	0	0	0,00
2500	0,61	7	7	0,0007	0,00035	35,00
5000	1,22	13	12	0,00125	0,000625	62,50
7500	1,83	18	17	0,00175	0,000875	87,50
10000	2,44	24	23	0,00235	0,001175	117,50
12500	3,05	30	30	0,003	0,0015	150,00
15000	3,66	35	35	0,0035	0,00175	175,00
17500	4,27	42	42	0,0042	0,0021	210,00
20000	4,88	49	48	0,00485	0,002425	242,50
22500	5,48	55	55	0,0055	0,00275	275,00
25000	6,09	63	61	0,0062	0,0031	310,00
27500	6,70	70	67	0,00685	0,003425	342,50
30000	7,31	77	74	0,00755	0,003775	377,50
32500	7,92	84	81	0,00825	0,004125	412,50

Module élastique= 19237,346 MPa

Echantillon No 6

Longueur= 10 pouces

$\Phi =$ 152,50 mm
152,40 mm

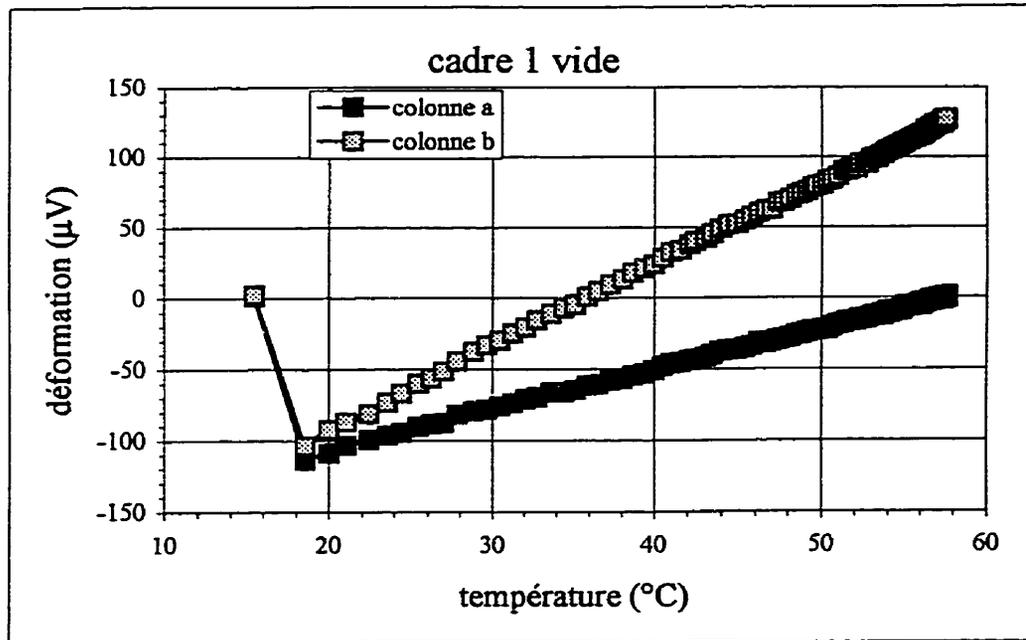
Aire= 18253,4407 mm²

Charge (lbs)	Contrainte (MPa)	Lecture 1 (0.0001")	Lecture 2 (0.0001")	Delta L observé	Delta L réel	ϵ (10-6)
0	0,00	0	0	0	0	0,00
2500	0,61	8	8	0,0008	0,0004	40,00
5000	1,22	14	13	0,00135	0,000675	67,50
7500	1,83	20	19	0,00195	0,000975	97,50
10000	2,44	27	25	0,0026	0,0013	130,00
12500	3,05	34	32	0,0033	0,00165	165,00
15000	3,66	40	38	0,0039	0,00195	195,00
17500	4,27	45	44	0,00445	0,002225	222,50
20000	4,88	54	52	0,0053	0,00265	265,00
22500	5,48	61	58	0,00595	0,002975	297,50
25000	6,09	68	65	0,00665	0,003325	332,50
27500	6,70	74	71	0,00725	0,003625	362,50
30000	7,31	82	77	0,00795	0,003975	397,50
32500	7,92	90	84	0,0087	0,00435	435,00

Module élastique= 18400,4659 MPa

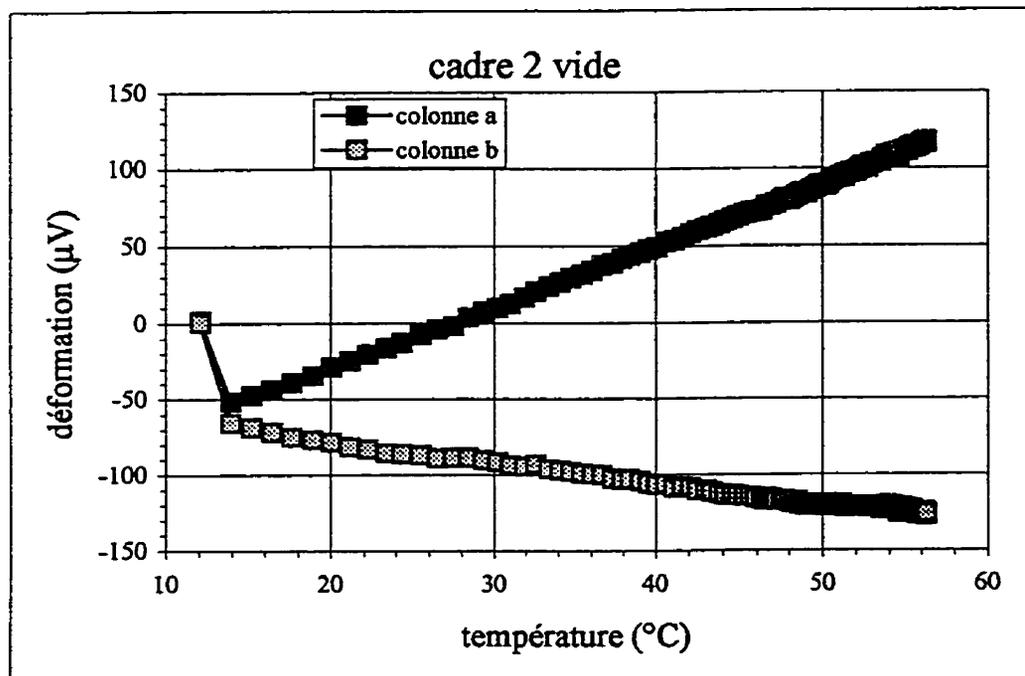
Annexe D:

**Calibration des ponts de jauges en fonction
de la température**



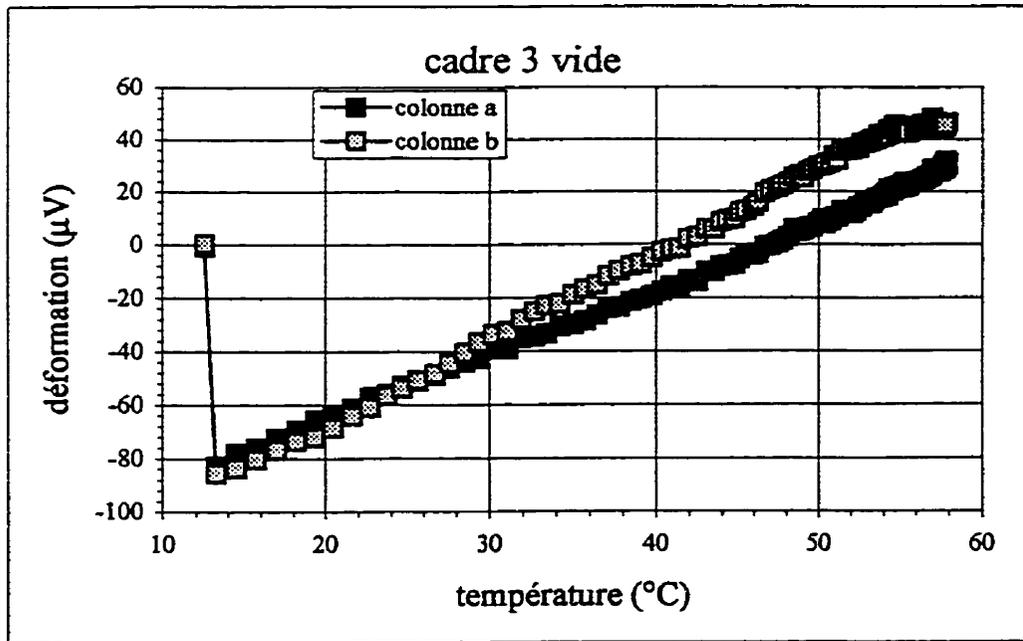
colonne A : $(0 + 114) / (57,5 - 18,5) = 2,92 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$

colonne B : $(127 + 104) / (57,5 - 18,5) = 5,92 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$



colonne A : $(117 + 52) / (56,3 - 14,0) = 4,00 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$

colonne B : $(-126 + 66) / (56,3 - 14,0) = -1,42 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$



colonne A : $(22 + 83) / (55,0 - 13,3) = 2,52 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

colonne B : $(44 + 85) / (55,0 - 13,3) = 3,09 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

cadre 4 vide : graphique inexistant

colonne A : $(195 + 43) / (57,1 - 13,9) = 5,51 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

colonne B : $(415 + 43) / (57,1 - 13,9) = 10,60 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

Annexe E:

Tableaux des résultats du comptage de fibres

Comptage des fibres du mélange 35-D-20

ÉCHANT.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6	# 7	# 8	# 9	# 10	# 11	# 12	MOY.	VAR.
N _{vas}	28	34	32	25	36	22	22	20	25	30	24	25	26,9	18,9
N _{vai}	22	13	29	20	16	23	17	23	30	18	21	23	21,3	23,4
N _{vbs}	28	18	23	21	19	22	34	19	30	13	13	14	21,2	31,8
N _{vbi}	36	14	20	8	24	26	27	16	22	28	42	19	23,5	39,7
N _{vcs}	39	30	19	24	31	32	26	23	17	21	17	27	25,5	26,3
N _{vci}	20	24	13	21	28	23	25	24	22	24	29	20	22,8	18,3
N _{vds}	19	30	17	23	27	18	25	36	20	31	19	15	23,3	27,9
N _{vdi}	14	34	13	24	17	25	25	24	27	19	25	42	24,1	33,8
N _{hs}	39	20	21	28	32	29	27	29	17	28	20	43	27,5	28,3
N _{hi}	31	17	23	15	22	29	27	23	29	30	45	28	26,4	29,2
n _{vas} (cm ²) ⁻¹	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,2	0,3	0,4	0,3	0,3	0,33	18,9
n _{vai} (cm ²) ⁻¹	0,3	0,2	0,4	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,3	0,26	23,4
n _{vbs} (cm ²) ⁻¹	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,4	0,2	0,4	0,2	0,2	0,2	0,26	31,8
n _{vbi} (cm ²) ⁻¹	0,4	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,5	0,2	0,29	39,7
n _{vcs} (cm ²) ⁻¹	0,5	0,4	0,2	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,32	26,3
n _{vci} (cm ²) ⁻¹	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,2	0,28	18,3
n _{vds} (cm ²) ⁻¹	0,2	0,4	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,4	0,2	0,4	0,2	0,2	0,29	27,9
n _{vdi} (cm ²) ⁻¹	0,2	0,4	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,5	0,3	33,8
n _{hs} (cm ²) ⁻¹	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,3	0,18	28,3
n _{hi} (cm ²) ⁻¹	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,17	29,2
n _{vs} (cm ²) ⁻¹	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	13,2
n _{vi} (cm ²) ⁻¹	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,28	13,4
alpha s	0,7	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6	0,4	0,6	0,6	1,1	0,59	31,5
alpha i	0,7	0,4	0,6	0,4	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	0,7	0,8	0,6	0,59	18,7
alpha glob.	0,7	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6	0,7	0,8	0,59	18,5

Comptage des fibres du mélange 45-D-20

ÉCHANT.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6	# 7	# 8	# 9	# 10	# 11	# 12	MOY.	VAR.
N _{vas}	19	39	15	18	26	25	23	34	23	24	12	16	22,8	34,1
N _{vai}	30	32	28	22	24	22	23	39	40	21	28	29	28,2	22,6
N _{vbs}	16	29	18	11	23	17	23	7	28	11	15	17	17,9	37,8
N _{vbi}	24	18	19	22	26	28	25	23	18	31	25	14	22,8	21,1
N _{vcs}	22	32	24	32	19	22	11	15	16	13	14	23	20,3	34,2
N _{vci}	25	29	26	37	39	23	19	31	30	17	37	21	27,8	26,2
N _{vds}	14	17	28	19	15	21	20	22	19	21	11	11	18,2	26,9
N _{vdi}	19	28	14	24	25	28	23	22	20	15	26	21	22,1	20,7
N _{hs}	20	31	35	21	16	8,5	22	20	15	16	19	33	21,2	37
N _{hi}	14	19	8,5	21	14	20	25	44	26	23	22	14	20,7	43,2
n _{vas} (cm ²) ⁻¹	0,2	0,5	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,1	0,2	0,28	34,1
n _{vai} (cm ²) ⁻¹	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	0,3	0,4	0,35	22,6
n _{vbs} (cm ²) ⁻¹	0,2	0,4	0,2	0,1	0,3	0,2	0,3	0,1	0,3	0,1	0,2	0,2	0,22	37,8
n _{vbi} (cm ²) ⁻¹	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,4	0,3	0,2	0,28	21,1
n _{vcs} (cm ²) ⁻¹	0,3	0,4	0,3	0,4	0,2	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,25	34,2
n _{vci} (cm ²) ⁻¹	0,3	0,4	0,3	0,5	0,5	0,3	0,2	0,4	0,4	0,2	0,5	0,3	0,35	26,2
n _{vds} (cm ²) ⁻¹	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,1	0,1	0,23	26,9
n _{vdi} (cm ²) ⁻¹	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,27	20,7
n _{hs} (cm ²) ⁻¹	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,14	37
n _{hi} (cm ²) ⁻¹	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,13	43,2
n _{vs} (cm ²) ⁻¹	0,2	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,25	19,5
n _{vi} (cm ²) ⁻¹	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,31	11,8
alpha s	0,6	0,5	0,8	0,5	0,4	0,2	0,6	0,5	0,3	0,5	0,7	1	0,57	38,5
alpha i	0,3	0,4	0,2	0,4	0,3	0,4	0,6	0,8	0,5	0,6	0,4	0,3	0,42	38,2
alpha glob.	0,4	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,6	0,7	0,4	0,5	0,5	0,6	0,48	23,4

Comptage des fibres du mélange 45-D-40

ÉCHANT.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6	# 7	# 8	# 9	# 10	# 11	# 12	MOY.	VAR.
N _{vas}	58	45	42	50	40	40	41	75	29	41	47	30	44,8	27,5
N _{vai}	69	63	46	51	60	61	46	49	57	43	43	33	51,8	20,1
N _{vbs}	31	28	52	34	31	72	46	42	20	28	58	19	38,4	41,7
N _{vbi}	34	63	33	45	41	62	59	38	33	59	77	25	47,4	33,8
N _{vcs}	38	42	44	79	26	46	52	34	42	22	28	28	40,1	38,2
N _{vci}	68	53	59	44	59	45	53	40	48	61	54	55	53,3	15
N _{vds}	18	35	30	53	50	34	81	46	48	25	29	45	41,2	40,4
N _{vdi}	40	30	62	37	38	42	65	50	39	41	58	82	48,7	31,1
N _{hs}	60	51	44	32	60	47	68	53	44	44	38	32	47,6	23,6
N _{hi}	65	60	45	72	60	48	53	52	86	77	69	69	62,8	19,8
n _{vas} (cm ²) ⁻¹	0,7	0,6	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,9	0,4	0,5	0,6	0,4	0,56	27,5
n _{vai} (cm ²) ⁻¹	0,9	0,8	0,6	0,6	0,7	0,8	0,6	0,6	0,7	0,5	0,5	0,4	0,64	20,1
n _{vbs} (cm ²) ⁻¹	0,4	0,3	0,6	0,4	0,4	0,9	0,6	0,5	0,2	0,3	0,7	0,2	0,48	41,7
n _{vbi} (cm ²) ⁻¹	0,4	0,8	0,4	0,6	0,5	0,8	0,7	0,5	0,4	0,7	1	0,3	0,59	33,8
n _{vcs} (cm ²) ⁻¹	0,5	0,5	0,5	1	0,3	0,6	0,6	0,4	0,5	0,3	0,3	0,3	0,5	38,2
n _{vci} (cm ²) ⁻¹	0,8	0,7	0,7	0,5	0,7	0,6	0,7	0,5	0,6	0,8	0,7	0,7	0,66	15
n _{vds} (cm ²) ⁻¹	0,2	0,4	0,4	0,7	0,6	0,4	1	0,6	0,6	0,3	0,4	0,6	0,51	40,4
n _{vdi} (cm ²) ⁻¹	0,5	0,4	0,8	0,5	0,5	0,5	0,8	0,6	0,5	0,5	0,7	1	0,6	31,1
n _{hs} (cm ²) ⁻¹	0,4	0,3	0,3	0,2	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	23,6
n _{hi} (cm ²) ⁻¹	0,4	0,4	0,3	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	19,8
n _{vs} (cm ²) ⁻¹	0,4	0,5	0,5	0,7	0,5	0,6	0,7	0,6	0,4	0,4	0,5	0,4	0,51	21,1
n _{vi} (cm ²) ⁻¹	0,7	0,6	0,6	0,5	0,6	0,7	0,7	0,5	0,5	0,6	0,7	0,6	0,62	8,84
alpha s	0,8	0,7	0,5	0,3	0,8	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,5	0,5	0,62	26,2
alpha i	0,6	0,6	0,5	0,8	0,6	0,5	0,5	0,6	1	0,8	0,6	0,7	0,65	24,8
alpha glob.	0,7	0,6	0,5	0,5	0,7	0,5	0,6	0,6	0,8	0,8	0,6	0,7	0,63	18,2

Comptage des fibres du mélange 35-D-60

ÉCHANT.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6	# 7	# 8	# 9	# 10	# 11	# 12	MOY.	VAR.
N _{vas}	82	107	91	67	56	81	96	57	43	73	106	75	77,8	25,8
N _{vai}	82	83	69	64	102	103	75	81	79	76	114	115	86,9	19,8
N _{vbs}	67	33	36	66	50	56	75	47	72	30	64	27	51,9	33,2
N _{vbi}	63	114	103	59	80	84	92	53	104	56	61	40	75,8	31,3
N _{vcs}	49	81	102	65	42	77	101	80	97	96	68	65	76,9	25,9
N _{vci}	100	103	71	80	83	77	122	113	92	93	116	96	95,5	16,9
N _{vds}	74	62	31	36	29	44	54	76	36	66	29	62	49,9	35,6
N _{vdi}	33	67	118	110	32	86	88	96	33	97	57	75	74,3	40,7
N _{hs}	73	73	42	75	62	48	39	72	65	52	50	62	59,2	21,5
N _{hi}	58	58	73	90	66	57	45	78	51	46	37	97	62,8	29,6
n _{vas} (cm ²) ⁻¹	1	1,3	1,1	0,8	0,7	1	1,2	0,7	0,5	0,9	1,3	0,9	0,97	25,8
n _{vai} (cm ²) ⁻¹	1	1	0,9	0,8	1,3	1,3	0,9	1	1	0,9	1,4	1,4	1,08	19,8
n _{vbs} (cm ²) ⁻¹	0,8	0,4	0,4	0,8	0,6	0,7	0,9	0,6	0,9	0,4	0,8	0,3	0,64	33,2
n _{vbi} (cm ²) ⁻¹	0,8	1,4	1,3	0,7	1	1	1,1	0,7	1,3	0,7	0,8	0,5	0,94	31,3
n _{vcs} (cm ²) ⁻¹	0,6	1	1,3	0,8	0,5	1	1,3	1	1,2	1,2	0,8	0,8	0,95	25,9
n _{vci} (cm ²) ⁻¹	1,2	1,3	0,9	1	1	1	1,5	1,4	1,1	1,2	1,4	1,2	1,18	16,9
n _{vds} (cm ²) ⁻¹	0,9	0,8	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7	0,9	0,4	0,8	0,4	0,8	0,62	35,6
n _{vdi} (cm ²) ⁻¹	0,4	0,8	1,5	1,4	0,4	1,1	1,1	1,2	0,4	1,2	0,7	0,9	0,92	40,7
n _{hs} (cm ²) ⁻¹	0,5	0,5	0,3	0,5	0,4	0,3	0,2	0,5	0,4	0,3	0,3	0,4	0,38	21,5
n _{hi} (cm ²) ⁻¹	0,4	0,4	0,5	0,6	0,4	0,4	0,3	0,5	0,3	0,3	0,2	0,6	0,4	29,6
n _{vs} (cm ²) ⁻¹	0,8	0,9	0,8	0,7	0,5	0,8	1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	13,7
n _{vi} (cm ²) ⁻¹	0,9	1,1	1,1	1	0,9	1,1	1,2	1,1	1	1	1,1	1	1,03	9,07
alpha s	0,6	0,5	0,3	0,7	0,7	0,4	0,2	0,6	0,5	0,4	0,4	0,6	0,49	28,5
alpha i	0,4	0,3	0,4	0,6	0,5	0,3	0,2	0,5	0,3	0,3	0,2	0,6	0,39	32
alpha glob.	0,5	0,4	0,4	0,6	0,6	0,4	0,2	0,5	0,4	0,3	0,3	0,6	0,44	27,5

Comptage des fibres du mélange 45-D-60

ÉCHANT.	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6	# 7	# 8	# 9	# 10	# 11	# 12	MOY.	VAR.
N _{vas}	76	86	72	77	92	60	66	95	71	65	120	82	80,2	20,6
N _{vai}	93	78	55	46	142	90	107	89	126	105	106	130	97,3	29,5
N _{vbs}	87	57	70	29	82	45	66	37	88	85	59	42	62,3	33,4
N _{vbi}	50	74	62	33	71	113	57	33	84	42	102	25	62,2	44,8
N _{vcs}	94	56	65	103	69	73	124	87	87	98	57	77	82,5	24,6
N _{vci}	131	90	107	91	131	104	94	116	93	117	116	77	106	16,2
N _{vds}	49	87	61	75	41	82	48	63	48	97	90	63	67	28,1
N _{vdi}	44	65	71	72	33	73	96	55	31	81	53	98	64,3	34,2
N _{hs}	86	75	96	119	85	96	117	82	66	112	66	77	89,5	20,7
N _{hi}	52	77	63	93	43	77	57	67	57	95	61	73	67,7	23,5
n _{vas} (cm ²) ⁻¹	0,9	1,1	0,9	1	1,1	0,7	0,8	1,2	0,9	0,8	1,5	1	0,99	20,6
n _{vai} (cm ²) ⁻¹	1,2	1	0,7	0,6	1,8	1,1	1,3	1,1	1,6	1,3	1,3	1,6	1,21	29,5
n _{vbs} (cm ²) ⁻¹	1,1	0,7	0,9	0,4	1	0,6	0,8	0,5	1,1	1,1	0,7	0,5	0,77	33,4
n _{vbi} (cm ²) ⁻¹	0,6	0,9	0,8	0,4	0,9	1,4	0,7	0,4	1	0,5	1,3	0,3	0,77	44,8
n _{vcs} (cm ²) ⁻¹	1,2	0,7	0,8	1,3	0,9	0,9	1,5	1,1	1,1	1,2	0,7	1	1,02	24,6
n _{vci} (cm ²) ⁻¹	1,6	1,1	1,3	1,1	1,6	1,3	1,2	1,4	1,2	1,5	1,4	1	1,31	16,2
n _{vds} (cm ²) ⁻¹	0,6	1,1	0,8	0,9	0,5	1	0,6	0,8	0,6	1,2	1,1	0,8	0,83	28,1
n _{vdi} (cm ²) ⁻¹	0,5	0,8	0,9	0,9	0,4	0,9	1,2	0,7	0,4	1	0,7	1,2	0,8	34,2
n _{hs} (cm ²) ⁻¹	0,6	0,5	0,6	0,8	0,5	0,6	0,7	0,5	0,4	0,7	0,4	0,5	0,57	20,7
n _{hi} (cm ²) ⁻¹	0,3	0,5	0,4	0,6	0,3	0,5	0,4	0,4	0,4	0,6	0,4	0,5	0,43	23,5
n _{vs} (cm ²) ⁻¹	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9	1,1	1	0,8	0,91	8,61
n _{vi} (cm ²) ⁻¹	1	1	0,9	0,8	1,2	1,2	1,1	0,9	1	1,1	1,2	1	1,02	12,5
alpha s	0,6	0,5	0,7	0,9	0,6	0,8	0,8	0,6	0,5	0,7	0,4	0,6	0,64	21,1
alpha i	0,3	0,5	0,4	0,8	0,2	0,4	0,3	0,5	0,3	0,6	0,3	0,5	0,44	33,4
alpha glob.	0,5	0,5	0,6	0,8	0,4	0,6	0,5	0,5	0,4	0,6	0,4	0,5	0,53	23,4