

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION  
M. Ing.

PAR  
ARIBIA KARIMA

GESTION ET EXPLOITATION D'UNE BASE DE DONNÉES EXPÉRIMENTALES  
POUR LE RENFORCEMENT EN CISAILLEMENT À L'AIDE DE MCA

MONTRÉAL, LE 17 OCTOBRE 2007

© droits réservés de Aribia Karima

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ  
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Omar Chaallal, directeur de mémoire  
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Bennis Saad, président du jury  
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Amar Khaled, examinateur  
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

# **GESTION ET EXPLOITATION D'UNE BASE DE DONNÉES EXPÉRIMENTALES POUR LE RENFORCEMENT EN CISAILLEMENT À L'AIDE DE MCA**

Aribia Karima

## **SOMMAIRE**

Depuis une quinzaine d'années, une méthode innovatrice de renforcement est proposée. Celle-ci consiste en l'utilisation des matériaux composites avancés (MCA) pour le renforcement des ouvrages en béton armé (BA). Cette technique aujourd'hui éprouvée, constitue une solution sérieuse et économiquement viable au problème inquiétant de déficience structurale du bâti existant. Ses applications à travers le monde connaissent un succès prometteur. Ce succès est le fruit d'un vaste effort de recherche. La contribution de l'équipe de DRSR (Développement et Recherche en Structures et Réhabilitation) à cet effort a été constante et significative. Durant les dernières années, l'équipe s'est attelée, entre autres, au problème fort complexe du renforcement en cisaillement; un aspect relativement peu documenté. Les travaux documentaires, réalisés à travers une recherche bibliographique, exhaustive et détaillée au sein de l'équipe, ont permis de monter une base de données très complète sur le sujet. Cette base de données présente une source de données précieuse pour l'élaboration de normes de calcul, puisque les méthodes de dimensionnement pour prédire la contribution en cisaillement du matériau composite dans ces ouvrages renforcés utilisés par ces normes sont dans la plupart des cas semi-empiriques, reposant en grande partie sur des mesures et des observations obtenues à partir de tests en laboratoire. Disposer d'un outil informatique, intégrant divers modules de gestion et d'exploitation de cette base de données, allant de la simple mise à jour jusqu'à la comparaison aux prédictions théoriques fournies par les normes et autres modèles de calcul, est indispensable. Le but de la présente étude est le développement de cet outil informatique qui va permettre:

- i. La mise à jour les données expérimentales (ajout, modification et suppression);
- ii. Effectuer des recherches multicritères avec la possibilité de sauvegarder les résultats des recherches dans un fichier MS Excel;
- iii. La représentation graphique de quelques paramètres d'influence ainsi que la contribution du matériau composite obtenu par l'expérimentation par rapport aux prédictions théoriques.

Cet outil informatique va permettre de gérer et d'optimiser l'exploitation de la base de données expérimentales pour faciliter aux chercheurs l'élaboration de modèles de prédiction plus précis et donc à l'amélioration des méthodes de dimensionnement et de leur bien-fondé scientifique.

# **MANAGEMENT AND ANALYSIS OF EXPERIMENTAL DATA FOR STRENGTHENING IN SHEAR WITH FRP COMPOSITES**

Aribia Karima

## **ABSTRACT**

Since the last fifteen years, an innovating technique of strengthening is proposed. This technique uses fiber-reinforced polymer (FRP) for strengthening reinforced concrete (RC) structures. It is now well documented and has proven to be an economical solution for existing structures with deficiencies. Its wide application throughout the world is a promising success. This success is the result of an important research effort. The contribution of DRSR (Développement et Recherche en Structures et Réhabilitation) team to this effort was constant and significant. During the last years, the team investigated the very complex problem of shear strengthening, which is an aspect relatively less documented. The exhaustive and detailed bibliographical research work performed by the team contributed to building a complete database for shear strengthening. This database is a valuable source for the development of design codes since most of design approaches to predict the composite contribution to the shear resistance of these RC structures are semi-empirical, and thus based on experimental results.

A software is required to manage the precious data, to maintain the information up to date and to compare it with the theoretical value predicted by design codes and other models.

The main objective of this study is the development of this software to:

- i. Manage the experimental data (add, modify, delete);
- ii. Search the experimental data using different criteria with the possibility of exporting the search result to an MS Excel file;
- iii. Draw graphics for the influence parameters and also to compare the experimental contribution of FRP to the shear resistance with the theoretical predictions.

This software is a useful tool for managing and optimizing the use of the experimental data. It will help the researchers to develop the prediction models and thereby to improve the design methods.

## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de mémoire, le professeur Omar Chaallal pour ses conseils précieux, sa grande disponibilité a été très appréciée.

Mes remerciements vont également au Dr Abdelhak Bouselham membre de l'équipe DRSR pour ses conseils et son entière collaboration pour la réalisation de cette recherche.

J'adresse également mes remerciements les plus vifs au président du jury et aux membres du jury pour avoir accepté de consacrer une partie de leur temps pour examiner ce mémoire.

Je voudrais aussi remercier l'École de technologie supérieure et le laboratoire DRSR pour leur support financier.

Finalement, je voudrais remercier mon conjoint Benamar et mes deux petits anges Amina et Yacine pour leur soutien et leur encouragement durant mes études à l'ÉTS.

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE .....	iii
ABSTRACT .....	iv
REMERCIEMENTS .....	v
TABLE DES MATIÈRES .....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES .....	xi
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 ASPECTS MAJEURS DU COMPORTEMENT DES POUTRES EN BÉTON ARMÉ RENFORCÉES EN CISAILLEMENT À L'AIDE DE MCA.....	6
1.1 Comportement en cisaillement des poutres en béton armé.....	6
1.1.1 Fissuration et modes de rupture.....	6
1.1.2 Paramètres d'influences majeures.....	8
1.2 Calcul en cisaillement des poutres en béton armé selon les normes.....	11
1.2.1 Norme canadienne - CSA A23.3 04.....	12
1.2.2 Norme américaine - ACI 318-05.....	14
1.3 Comportement en cisaillement des poutres en béton armé renforcées à l'aide de matériaux composites avancée (MCA) .....	15
1.3.1 Généralité .....	15
1.3.2 Mode de rupture .....	18
1.3.3 Les paramètres d'influences majeurs .....	19
1.4 Calcul en cisaillement des poutres en BA renforcées à l'aide de MCA selon les normes et guides de calcul.....	24
1.4.1 Norme canadienne - CSA S806-02 .....	24
1.4.2 Le guide de calcul américaine ACI 440 2R-02 .....	25
1.4.3 Le guide de calcul européen <i>fib</i> TG9.3 .....	27
CHAPITRE 2 PRÉSENTATION DE LA BASE DE DONNÉES .....	29
2.1 Introduction .....	29
2.2 Contexte .....	30
2.3 Nature des données.....	32
CHAPITRE 3 CONCEPTION DE L'OUTIL DE GESTION ET D'EXPLOITATION DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES .....	35
3.1 Introduction .....	35

3.2	Environnement de programmation.....	36
3.3	Description de la base de données Access. ....	36
3.4	Description du logiciel. ....	41
3.4.1	Mise à jour des données expérimentales .....	42
3.4.2	Recherche multicritère .....	45
3.4.3	Analyse graphique.....	48
CHAPITRE 4	FONCTIONNEMENT DE L'OUTIL FRP-S2DMS.....	52
4.1	Environnement requis .....	52
4.2	Installation.....	52
4.3	Fonctionnement.....	52
CONCLUSION	.....	65
ANNEXE 1	DONNÉES EXPÉRIMENTALES CONCERNANT LE RENFORCEMENT EN CISAILLEMENT .....	68
ANNEXE 2	EXEMPLES DE GRAPHS RÉALISÉS PAR L'OUTIL FRP-S2DMS	71
ANNEXE 3	CALCUL DE LA RÉSISTANCE EN CISAILLEMENT DÛ AU MATERIAU COMPOSITE PAR LES MODÈLES ANALYTIQUES ...	76
BIBLIOGRAPHIE	.....	101

## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Description des champs de la table Spécimen .....37
Tableau II	Description des champs de la table Configuration .....39
Tableau III	Description des champs de la table Type de chargement .....39
Tableau IV	Description des champs de la table Mode de rupture .....40
Tableau V	Description des champs de la table Test .....40
Tableau VI	Description des champs de la table Type de renforcement .....40
Tableau VII	Coefficients de sécurité utilisés dans le modèle de Triantafillou. ....77

## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Réseaux de fissures de flexion et de cisaillement dans une poutre rectangulaire.....7
Figure 2	Les différents modes de rupture en cisaillement en fonction du type de la poutre.....8
Figure 3	Influence de la taille des spécimens sur la résistance en cisaillement .....9
Figure 4	Influence du taux d'acier longitudinal sur la résistance en cisaillement dans les poutres sans armatures transversales.....10
Figure 5	Influence de l'effort axial sur la résistance en cisaillement dans les poutres sans armatures transversales .....11
Figure 6	Différentes configurations de renforcement en cisaillement .....17
Figure 7	Modes de rupture dans les poutres renforcées en cisaillement à l'aide de FRP.....19
Figure 8	Bilan des travaux expérimentaux rapportés dans la littérature .....20
Figure 9	Influence du taux d'acier transversal sur le gain en charge dû au FRP pour des poutres profondes .....22
Figure 10	Influence du rapport a/d sur le gain en charge dû au FRP.....23
Figure 11	Influence de la taille des poutres sur le gain en charge dû au FRP .....23
Figure 12	Travaux expérimentaux sur le renforcement en cisaillement à l'aide de MCA. Évolution dans le temps .....32
Figure 13	Transfert des données de fichier Excel vers la base de données Access. 37
Figure 14	Organigramme des différents modules du logiciel .....41
Figure 15	Organigramme des mises à jour des données expérimentales.....44
Figure 16	Organigramme de la recherche multicritères.....47
Figure 17	Organigramme du module d'analyse graphique des données recherchées.....51
Figure 18	Menu Principal.....53
Figure 19	Mise à jour des données d'un essai.....54
Figure 20	Mise à jour des données pour un essai de section en Té avec un renfort composite collée en bandes.....55
Figure 21	Affichage de la liste des essais existants. ....56

Figure 22	Transfert de l'essai sélectionné.....	57
Figure 23	Recherches multicritères.....	59
Figure 24	Fichiers Excel pour la sauvegarde des données expérimentales recherchées/sélectionnées.....	60
Figure 25	Options pour l'analyse graphique.....	61
Figure 26	Résultat de l'analyse graphique.....	62
Figure 27	Fichier Excel pour la sauvegarde du graphe.....	63
Figure 28	Fichier d'aide.....	64
Figure 29:	Dimensions utilisées dans le renforcement en cisaillement à l'aide des lamelles composites pour déterminer la surface du renfort FRP. (a) Bandes verticales. (b) Bandes inclinées.....	81
Figure 30	Différents paramètres utilisés dans le modèle rupture du renfort composite.....	88
Figure 31	Contraintes dans un élément en cisaillement.....	93
Figure 32	Distribution de la contrainte du composite pour (a) $\lambda$ petite et (b) $\lambda$ grande.....	95

## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

AFRP	Aramid Fiber Reinforced Polymer
BA	Béton armé
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
DRSR	Développement et Recherche en Structure et Réhabilitation
FRP	Fiber Reinforced Polymer
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
MCA	Matériaux composites avancés
ÉTS	École de Technologie Supérieure
$a$	Longueur de cisaillement, définie comme la distance entre le point d'application de la charge et l'appui
$a_g$	Dimension des agrégats, selon le CSA A23.3 04
$a/d$	la longueur de cisaillement sur la hauteur utile de la section
$b_w$	Largeur de l'âme
$d$	Hauteur utile de la section
$d_f$	Profondeur du renfort composite, mesurée à partir du centre de gravité de l'armature longitudinale tendue
$f'_c$	Résistance du béton à la compression obtenue à partir d'un test standard
$f_{fe}$	Contrainte effective du renfort FRP
$f_{f,u}$	Contrainte ultime du renfort FRP
$f_y$	Limite élastique de l'armature transversale
$n_f$	Nombre de couches du renfort composite
$t_f$	Épaisseur du renfort composite
$s_f$	Espacement entre les bandes composites
$s$	Espacement des étriers en acier transversal
$w_f$	Largeur du renfort composite

$A_F$	Aire des lamelles composites
$A_v$	Aire de l'armature transversale
$E_F$	Module d'élasticité des lamelles composites
$E_s$	Module de déformation longitudinale de l'acier transversal
$L_e$	Longueur d'adhérence effective du renfort composite
$V_c$	Contribution du béton à la résistance en cisaillement
$V_{exp,f}$	Contribution à la résistance en cisaillement obtenue à partir des tests
$V_f$	Contribution du FRP à la résistance en cisaillement
$V_s$	Contribution de l'armature transversale à la résistance en cisaillement
$V_l$	Résistance totale à l'effort tranchant
$\alpha$	Angle d'inclinaison des fibres composites
$\beta$	Coefficient qui indique l'endommagement du béton
$\phi_F$	Coefficient de pondération
$\varepsilon_{fe}$	Déformation effective du renfort en FRP
$\varepsilon_{fu}$	Déformation ultime rapportée par le composite
$\theta$	Angle des fissures diagonales par rapport à l'axe de la poutre
$\rho_f$	Taux de renfort en FRP

## INTRODUCTION

### Contexte Général

L'industrie de la construction contribue en grande partie à la croissance de l'économie des pays développés. Dans cette industrie, un grand nombre de structures en béton armé présentent un état avancé de détérioration causée par la corrosion des armatures, la fatigue, l'exposition prolongée à un environnement agressif, l'augmentation continue des charges d'exploitation, ainsi que le vieillissement des éléments de ces structures. De plus, la conception de ces structures était basée sur des normes anciennes, qui pourraient être dans certains cas non sécuritaires en comparaison aux normes actuelles.

Les inspections faites sur plusieurs ouvrages donnent des résultats très inquiétants sur leur état. De ce fait, les gouvernements doivent consacrer des budgets énormes pour la réparation et l'entretien de ces ouvrages afin de les maintenir sécuritaires et en bon état.

Juste au Canada, le nombre des ponts touchés par la corrosion est en augmentation considérable, leurs réhabilitations coûteront plus de 44 milliards de dollars aux contribuables canadiens. Selon l'Association canadienne de la construction, la réparation des infrastructures mondiales est estimée à 900 milliards de dollars. (Isiscanada 2004, 2005)

Des interventions rapides sont indispensables pour arriver à des solutions économiques et efficaces. Le choix offert aux gestionnaires se répartit entre les deux types suivants : réhabilitation (réparation ou renforcement) ou reconstruction générale après démolition. Cependant, le choix de réhabilitation est l'option la plus rentable puisqu'elle est économique, préserve l'environnement et offre la possibilité de laisser la structure en service lors des travaux. Le fait d'éviter l'interruption du service joue un rôle important dans le choix des interventions pour certains ouvrages. Prenons l'exemple de réhabilitation d'un pont dont le taux de trafic est très important et le temps d'exécution

des travaux de réparation est assez long. Dans ce cas, on aura des impacts négatifs sur les usagers de l'ouvrage.

Pour améliorer la performance de la structure vis-à-vis la modification des conditions d'exploitation au fil des années ou l'augmentation de sa durée de vie, la méthode de réhabilitation la plus adéquate est celle du renforcement. Cette méthode est étroitement liée à la durabilité, l'efficacité et à la rapidité de la mise en œuvre.

Depuis une quinzaine d'années, une méthode innovatrice de renforcement est proposée, celle-ci consiste en l'utilisation de matériaux composites avancés (MCA) pour le renforcement en flexion et en cisaillement des ouvrages en béton armé (BA). Cette technique aujourd'hui éprouvée, constitue une solution sérieuse et économiquement viable au problème très inquiétant du bâti existant.

L'arrivée de ces structures renforcées à l'aide de matériaux composites dans l'industrie du génie civil, a donné naissance à plusieurs modèles de calcul basés sur des études expérimentales. Celles-ci représentent le fruit d'un vaste effort de recherche, où la contribution de l'équipe de DRSR a été constante et significative.

Durant les dernières années, l'équipe s'est attelée, entre autres, au renforcement en cisaillement. Les travaux documentaires, réalisés à travers une recherche bibliographique exhaustive et détaillée, ont permis de réaliser une base de données très complète sur le sujet. Celle-ci couvre plus de 300 tests, et regroupe plus de 12000 données expérimentales. Cette base de données est dédiée à un problème fort complexe, celui du comportement à l'effort tranchant.

## **Problématique du renforcement en cisaillement à l'aide de MCA**

Le comportement en cisaillement des poutres en BA est un phénomène complexe dans la mesure où plusieurs paramètres l'influencent et différents modes de rupture sont observés. Avec l'ajout du renfort externe en MCA, d'autres paramètres d'influence liés aux MCA vont alors s'ajouter aux précédents. Ces nouveaux paramètres engendrent l'apparition de modes de rupture additionnels, ce qui rend la problématique du cisaillement plus complexe.

Certainement, l'analyse d'une partie des résultats de ces investigations a permis d'élaborer les méthodes semi-empiriques utilisées par les normes de calcul pour le dimensionnement des structures renforcées, toutefois, plusieurs lacunes entourent ces méthodes qui doivent être améliorées par des recherches plus poussées.

## **Objectifs du projet de recherche**

La présente étude s'inscrit dans le cadre d'un vaste programme de recherche portant sur le comportement des poutres en béton armé renforcées en cisaillement à l'aide de matériaux composites, mené depuis plusieurs années par l'équipe du DRSR, à l'École de Technologie Supérieure. La base de données réalisée par cette équipe est une source de données précieuse et indispensable pour l'élaboration de modèles de prédiction et donc à l'amélioration des méthodes de dimensionnement et de leur fondement scientifique.

Les travaux de recherche en cours au sein du DRSR, sur le renforcement en cisaillement, ont motivé l'équipe de développer un outil avec Visual Basic et MS Access pour la gestion et l'exploitation des données expérimentales relatives à cet aspect du renforcement.

L'objectif principal de cette étude est de développer cet outil informatique qui va intégrer divers modules, allant de la simple mise à jour jusqu'à la comparaison aux prédictions théoriques fournies par les normes et autres modèles de calcul et le mettre à la disposition des chercheurs oeuvrant dans le domaine pour les aider à améliorer les prescriptions réglementaires en vigueur.

### **Méthodologie générale**

La méthodologie comporte une étude théorique, le développement d'un outil informatique et des recommandations pour les recherches futures.

- L'étude théorique comprend une étude bibliographique sur les recherches expérimentales concernant le comportement des poutres en béton armé (BA) renforcées en cisaillement à l'aide de matériaux composites avancés (MCA).
- L'outil informatique est développé avec le langage de programmation Microsoft Visual Basic 6.0 et la base de données MS Access 2002. Il assure la gestion et l'exploitation des données expérimentales et offre de nombreuses fonctionnalités, dont les plus importantes sont:
  - a- La mise à jour des données expérimentales (ajout, modification et suppression);
  - b- La possibilité d'effectuer des recherches multicritères avec la possibilité de sauvegarder les résultats des recherches dans un fichier MS Excel;
  - c- La possibilité de représenter graphiquement des paramètres d'influence ainsi que la contribution du matériau composite obtenu par l'expérimentation par rapport aux prédictions théoriques.
- Des conclusions et des recommandations pour les recherches futures concernant cet outil.

## **Présentation du mémoire**

Ce mémoire comporte trois volets:

- 1) Le premier volet est consacré à l'étude bibliographique sur les recherches expérimentales concernant le comportement des poutres en béton armé (BA) renforcées en cisaillement à l'aide de matériaux composites avancés (MCA) et la présentation de la base de données élaborée par le laboratoire DRSR.
- 2) Le deuxième volet présente la conception et le fonctionnement de l'outil informatique.
- 3) Le troisième volet présente les conclusions obtenues lors de cette étude et les recommandations en vue d'extensions futures de l'outil développé.

## **CHAPITRE 1**

### **ASPECTS MAJEURS DU COMPORTEMENT DES POUTRES EN BÉTON ARMÉ RENFORCÉES EN CISAILLEMENT À L'AIDE DE MCA**

#### **1.1 Comportement en cisaillement des poutres en béton armé**

Une attention particulière doit être accordée au dimensionnement des poutres en béton armé (BA) sous l'action de l'effort tranchant dans la mesure où la rupture en cisaillement, contrairement à la rupture en flexion, se produit de façon brusque et sans signes précurseurs. Il faut dire que le comportement en cisaillement des poutres en BA est complexe et implique de nombreux paramètres. Ceci explique le nombre impressionnant d'études dédiées à cet aspect des structures, comme le souligne le rapport de l'ASCE-ACI Committee 445 (1998) et le montre l'intérêt qu'il continue de susciter auprès des chercheurs jusqu'à maintenant.

Ce qui suit est un rappel des éléments majeurs concernant le comportement en cisaillement des poutres en BA; en particulier, la fissuration et les modes de ruptures et les paramètres dominants. Une revue sommaire de la norme canadienne (CSA A23.3, 2004) et du code américain du béton (ACI 318, 2005) y est également présentée.

##### **1.1.1 Fissuration et modes de rupture**

Les fissures apparaissent dans une poutre en BA à l'endroit où la contrainte de traction atteint la résistance du béton en traction. Dans une poutre soumise à l'effort tranchant, on voit apparaître des fissures verticales, notamment à mi-portée, et des fissures diagonales au niveau des appuis. Ces dernières, qui sont typiques du comportement dominant du cisaillement, sont dues aux sollicitations combinées du moment de flexion et de l'effort tranchant.

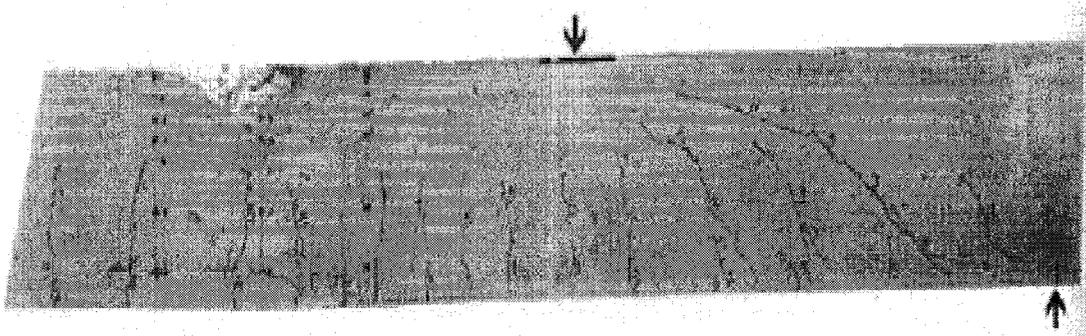


Figure 1 Réseaux de fissures de flexion et de cisaillement dans une poutre rectangulaire. (Adaptée de MacGregor et Bartlett, 2000)

Concernant les modes de rupture en cisaillement, plusieurs scénarios sont rapportés dans la littérature. Ces derniers dépendent principalement du type de poutre, lequel est défini par le rapport  $a/d$ , où  $a$  représente la distance séparant l'appui du point d'application de la charge, communément appelée longueur de cisaillement, et  $d$  la hauteur effective de la section. C'est ainsi que l'on définit les types de poutre suivants:

- Poutres très profondes pour un rapport  $a/d \leq 1$ ;
- Poutres profondes pour un rapport  $1 < a/d \leq 2.5$ ;
- Poutres élancées pour un rapport  $2.5 < a/d \leq 6$ ;
- Poutres très élancées pour un rapport  $a/d > 6$ .

La figure 2 montre de façon schématique les différents modes de ruptures susceptibles de se produire dans une poutre sous l'action de l'effort tranchant, selon le type de poutre; autrement dit le rapport  $a/d$ .

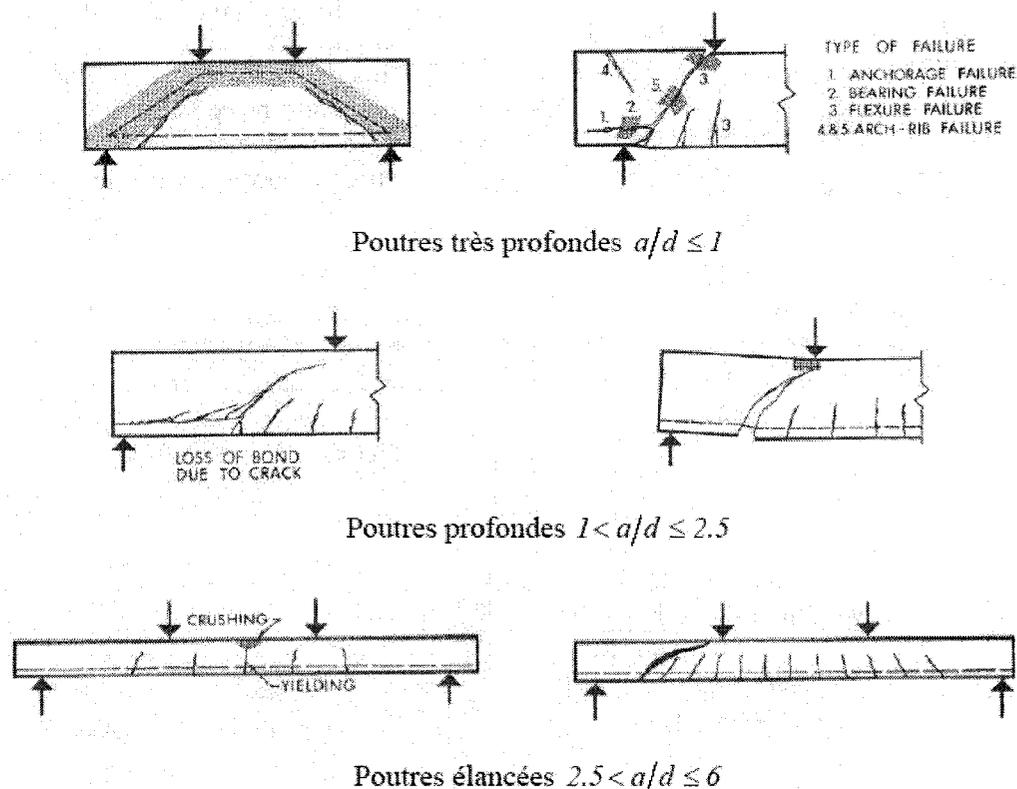


Figure 2 Les différents modes de rupture en cisaillement en fonction du type de la poutre (Adaptée de ASCE-ACI, 1973)

## 1.1.2 Paramètres d'influences majeures

De nombreux paramètres influencent le comportement en cisaillement des poutres en BA mais à des degrés différents. Le rapport ASCE-ACI Committee 445 (1998) identifie ceux qui ont une influence majeure. Ils sont présentés dans ce qui suit:

### 1.1.2.1 Taille de la poutre

Plusieurs études ont démontré que, dans les poutres en BA dépourvues d'acier transversal, la contrainte de cisaillement n'était pas proportionnelle à la taille de la poutre (Figure 3). Ceci peut avoir une incidence directe sur les règles de calcul en cisaillement utilisées, dans la mesure où ces règles se basent essentiellement sur les

résultats des essais en laboratoire, et que ces essais sont le plus souvent conduits sur des spécimens de taille relativement réduite.

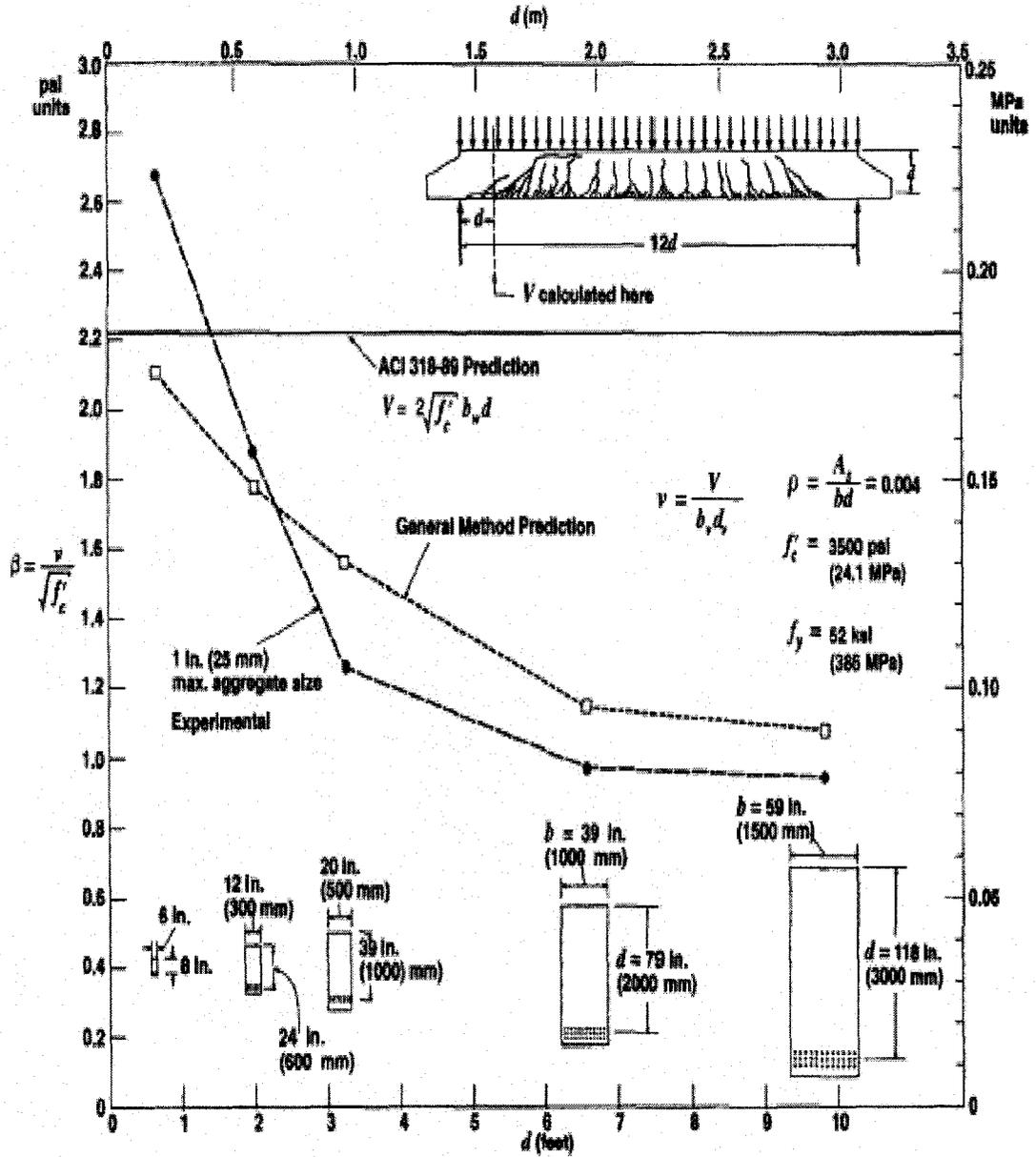


Figure 3 Influence de la taille des spécimens sur la résistance en cisaillement (Adaptée de l'ASCE-ACI, 1998)

### 1.1.2.2 Rapport $a/d$

Le rapport  $a/d$ , on l'a vu, est un facteur important permettant de distinguer entre les différents types de poutre, notamment les poutres de type profond et celle de type élancé, et consécutivement sur les modes de rupture susceptibles de s'y produire. Le premier type de poutre, c'est-à-dire profond, à un comportement assimilable à celui d'un arc à tirant. Le second, lui, est régi par la théorie classique de la poutre qui par ailleurs explique pourquoi la résistance en cisaillement atteinte à la rupture est plus élevée dans les poutres de type profond, comparativement au type élancé.

### 1.1.2.3 Taux du renforcement longitudinal

Les résultats d'essais montrent que la résistance en cisaillement des poutres en BA sans acier transversal dépend du taux d'acier longitudinal, en particulier si le taux est relativement faible (Figure 4). En terme de fissuration, il est observé que les fissures inclinées apparaissent plutôt que d'habitude, lorsque le taux d'acier longitudinal est relativement faible (MacGregor et Barlett, 2000).

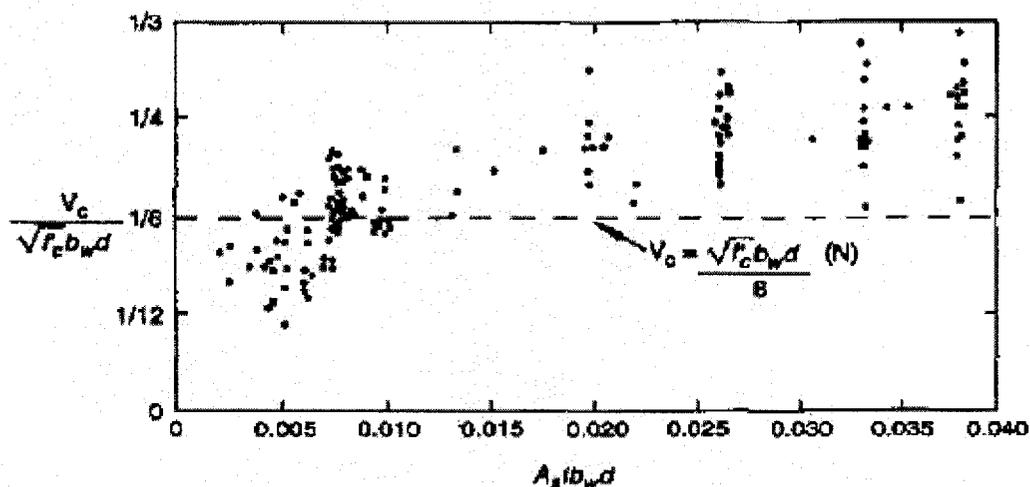


Figure 4 Influence du taux d'acier longitudinal sur la résistance en cisaillement dans les poutres sans armatures transversales (Adaptée de MacGregor et Bartlett, 2000)

#### 1.1.2.4 L'effort axial

La force axiale de traction engendre une réduction de la résistance en cisaillement dans une poutre en B.A sans acier transversal. En revanche, lorsque l'effort est de compression, ceci a pour conséquence d'augmenter la résistance en cisaillement (Figure 5). Mais, cette influence demeure encore difficile à quantifier, et son impact sur la ductilité de la poutre, mal définie (ASCE-ACI Committee 445, 1998).

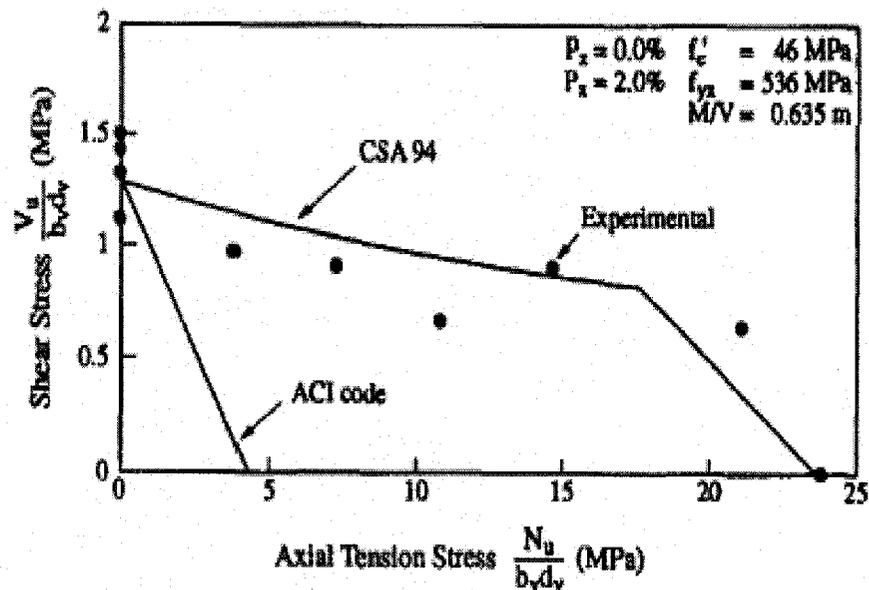


Figure 5 Influence de l'effort axial sur la résistance en cisaillement dans les poutres sans armatures transversales (Adaptée de l'ASCE-ACI, 1998)

## 1.2 Calcul en cisaillement des poutres en béton armé selon les normes

Le calcul en cisaillement des poutres en BA, en ce qui concerne l'acier transversal repose essentiellement sur le modèle du treillis, proposé par Ritter-Mörsch, il y a plus d'un siècle. Ceci est valable pour toutes les normes de béton armé. La différence réside

cependant dans la façon de quantifier la contribution du béton à la résistance en cisaillement, et à moindre degré, l'angle de fissuration de façon conservative, ce dernier est généralement pris égal à 45°.

Le calcul en cisaillement des poutres en BA, dans la norme canadienne par exemple (CSA A23.3, 2004), est basé sur la théorie modifiée du champ de compression, qui est une variante du modèle du treillis à angle variable. Dans le code américain de béton (ACI-318, 2005), le calcul est basé sur une approche plutôt de type semi empirique. La contribution du béton y est déterminée à partir d'expressions obtenues par calibration des résultats d'essais. Cette contribution est additionnée à celle due à l'acier transversal est obtenue en utilisant le modèle du treillis à 45°.

Ce qui suit rappelle, à titre indicatif, les prescriptions réglementaires contenues dans la norme canadienne (CSA A23.3, 2004) et dans le code américain de béton (ACI-318, 2005), respectivement.

### 1.2.1 Norme canadienne - CSA A23.3 04

Dans la norme canadienne, la résistance totale en cisaillement  $V_r$  est déterminée à partir de l'équation suivante:

$$V_r = V_c + V_s \quad (1.1)$$

Dans cette expression,  $V_c$  représente la contribution du béton, elle est calculée par l'équation suivante:

$$V_c = \phi_c \lambda \beta \sqrt{f_c'} b_w d \quad (1.2)$$

$\beta$  est un coefficient qui tient compte de l'endommagement du béton.

Dans le calcul de  $V_c$ , la valeur de  $\sqrt{f_c'}$  doit être inférieure à 8 MPa.

Pour le calcul de la résistance en cisaillement de l'acier transversal  $V_s$ , deux cas sont considérés, selon la disposition des armatures:

1- Disposition droite qui forme un angle de  $90^\circ$  par rapport à l'axe longitudinal:

$$V_s = \frac{\phi_s A_v f_y d_v \cot \theta}{s} \quad (1.3)$$

2- Disposition inclinée qui forme un angle  $\alpha$  par rapport à l'axe longitudinal:

$$V_s = \frac{\phi_s A_v f_y d_v (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha}{s} \quad (1.4)$$

Les coefficients  $\beta$  et  $\theta$  sont calculés suivant les deux méthodes suivantes

#### Méthode simplifiée

Pour une limite élastique des armatures longitudinales.  $f_{yl} < 400$  MPa et  $f_c' < 60$  MPa

La valeur de  $\theta$  est égale à  $35^\circ$ , et la valeur de  $\beta$  est déterminée en distinguant les trois cas suivants:

a) Pour une section dont l'aire des armatures transversales est supérieure ou égale à la section minimum nécessaire, la valeur de  $\beta$  est égale à 0.18.

La section minimum de l'armature transversale est donnée par la formule suivante

$$A_{\min} = 0.06 \sqrt{f_c'} \frac{b_w s}{f_y} \quad (1.5)$$

b) Pour une section sans armatures transversales et la dimension du plus gros granulat utilisé dans la composition du béton est supérieure à 20 mm,  $\beta$  est calculée comme suit:

$$\beta = \frac{230}{(1000 + d_v)} \quad (1.6)$$

c) Pour une section sans armatures transversales avec la dimension des gros granulats non spécifiée, on va remplacer la hauteur utile de la section  $d_v$ , utilisée dans l'équation

(1.6) par la valeur équivalente de l'espacement des fissures verticales dans l'âme  $s_{ze}$  qui est donné par la formule suivante:

$$s_{ze} = \frac{35s_z}{(15 + a_g)} \quad (1.7)$$

Ce paramètre tient compte de l'influence des dimensions des agrégats  $a_g$ .

### Méthode généralisée

Dans cette méthode, le coefficient  $\theta$  est calculé comme suit:

$$\theta = 29 + 7000\varepsilon_x \quad (1.8)$$

Le coefficient  $\beta$  est déterminé par l'équation suivante:

$$\beta = \frac{0.40}{(1 + 1500\varepsilon_x)} \times \frac{1300}{(1000 + s_{ze})} \quad (1.9)$$

Pour une section dont l'aire des armatures transversales est supérieure ou égale à  $A_{\min}$ ,  $s_{ze}$  est égale à 300mm.

Par contre, dans les autres cas  $s_{ze}$  est déterminée par l'équation (1.7).

## **1.2.2 Norme américaine - ACI 318-05**

La résistance totale pondérée du cisaillement des poutres en béton armé, selon la norme américaine est donnée par l'expression suivante:

$$V_n = V_c + V_s \quad (1.10)$$

Dans cette équation, la contribution du béton, notée  $V_c$ , peut être déterminée comme suit:

$$V_c = 2\sqrt{f_c} b_w d \quad (1.11)$$

La norme donne une autre expression de la contribution du béton, plus détaillée, et qui tient compte de l'influence de certains paramètres majeurs; soit :

$$V_c = \left( 1.9\sqrt{f_c'} + 2500\rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \quad (1.12)$$

Toutefois, la valeur de  $V_c$  ne doit pas excéder  $3.5\sqrt{f_c'} b_w d$ .

Le second terme intervenant dans l'équation 1.10 concerne la contribution de l'acier transversal ( $V_s$ ). Cette dernière est déterminée à partir du modèle du treillis, en supposant un angle du plan de fissuration égal à  $45^\circ$ . Pour une disposition droite des étriers en acier, l'expression de  $V_s$  prend la forme suivante :

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad (1.13)$$

Pour une disposition des étriers en acier, inclinée d'un angle  $\alpha$ , on utilise :

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} (\sin \alpha + \cos \alpha) d}{s} \quad (1.14)$$

### 1.3 Comportement en cisaillement des poutres en béton armé renforcées à l'aide de matériaux composites avancée (MCA)

#### 1.3.1 Généralité

Le comportement en cisaillement des poutres en BA, on l'a vu, est complexe car il implique de nombreux paramètres souvent couplés. Avec l'ajout du renfort externe en MCA, d'autres paramètres d'influence, liés aux MCA, vont alors s'ajouter à ceux bien connus dans les poutres en BA. C'est le cas, par exemple, de la configuration du renfort externe en MCA qui peut prendre l'une des formes indiquées sur la Figure 6: continu versus discontinu; lamelle ou tissu; inclinée ou perpendiculaire à l'axe longitudinal de la poutre; en enveloppes versus en U versus collé sur les faces latérales de la poutre. Cette multiplication du nombre de paramètres engendre l'apparition de modes de rupture additionnels, dont les plus importants sont: le décollement du renfort en MCA, la

délamination du béton de substrat ou encore la rupture des MCA. Tout ceci a pour conséquence de rendre l'étude du comportement en cisaillement des poutres en BA renforcées à l'aide de MCA, encore plus complexe.

Ce qui suit rappelle quelques éléments relatifs au comportement en cisaillement des poutres en BA renforcées à l'aide de MCA, notamment en ce qui concerne les modes de ruptures majeurs et les paramètres dominants. Une revue sommaire des prescriptions contenues dans la norme canadienne (CSA S806-02, 2002) et dans le guide de calcul américain (ACI440-02, 2002) y est également présentée.

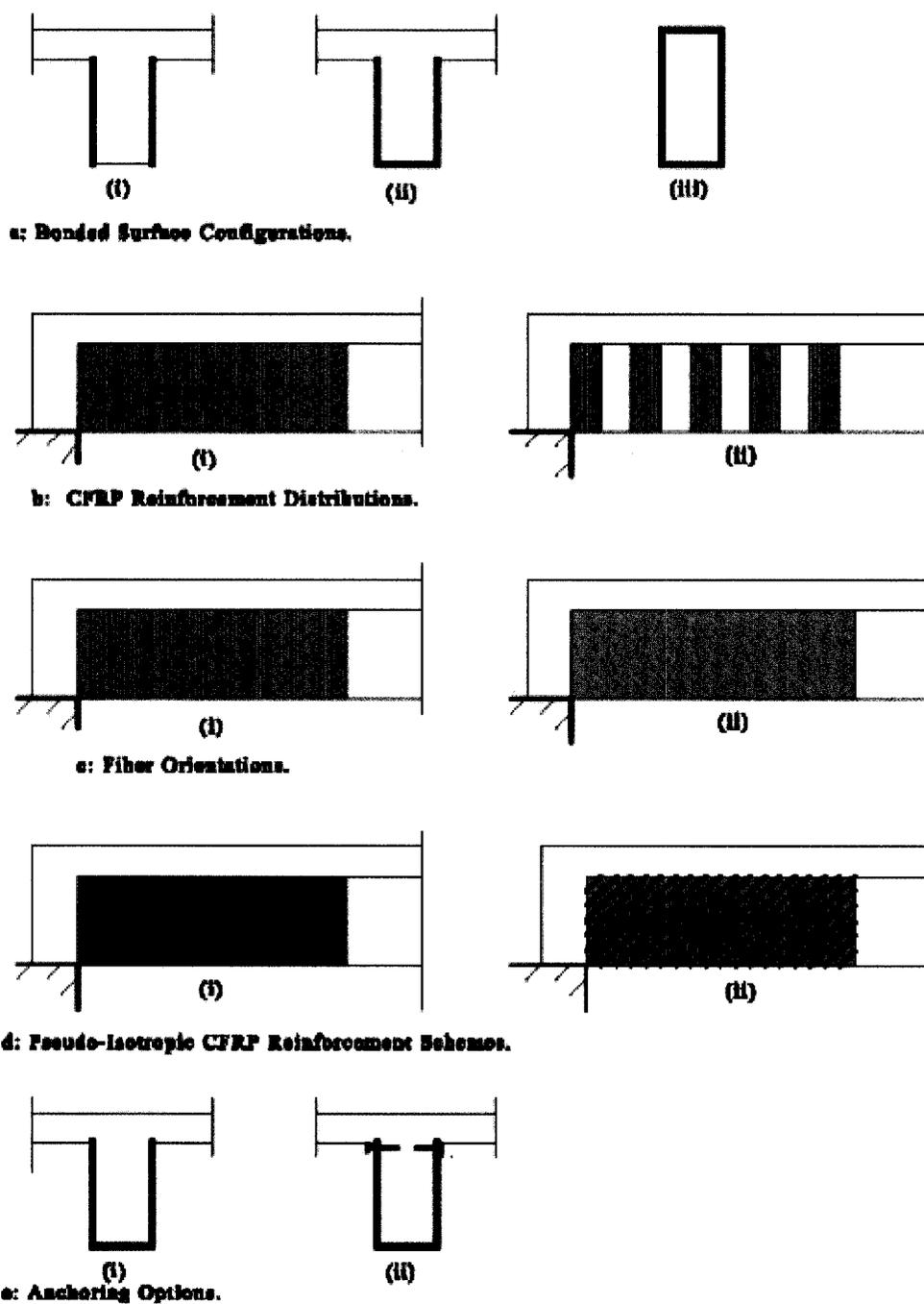


Figure 6 Différentes configurations de renforcement en cisaillement  
(Adaptée de Khalifa et coll. 1998)

### 1.3.2 Mode de rupture

Les études expérimentales antérieures rapportent plusieurs modes de rupture observés dans les essais qui ont été effectués sur les poutres renforcées en cisaillement à l'aide des matériaux composites. Parmi ces modes en trouve:

#### *Le décollement du renfort composite*

Dans ce mode de rupture qui est toujours lié à la délamination du renfort, on ne voit pas les traces du béton sur le renfort décollé (voir Figure 7).

#### *La délamination du renfort composite:*

Ce mode de rupture est observé généralement dans des poutres renforcées avec des bandes collées sur les deux faces ou sur les trois faces latérales de la poutre. Les propriétés du béton jouent un rôle important dans ce mode (voir Figure 7).

#### *La fracture des fibres*

Habituellement, ce mode de rupture est observé dans des poutres renforcées avec une configuration de type enveloppe. La fracture du renfort survient à cause de la rupture des fibres, elle peut survenir au moment de la rupture ou après (voir Figure 7).

#### *L'écrasement du béton*

C'est une rupture en cisaillement due à l'écrasement du béton qui se trouve au-dessous du renfort composite qui s'accompagne par l'apparition des fissures très larges (voir Figure 7).

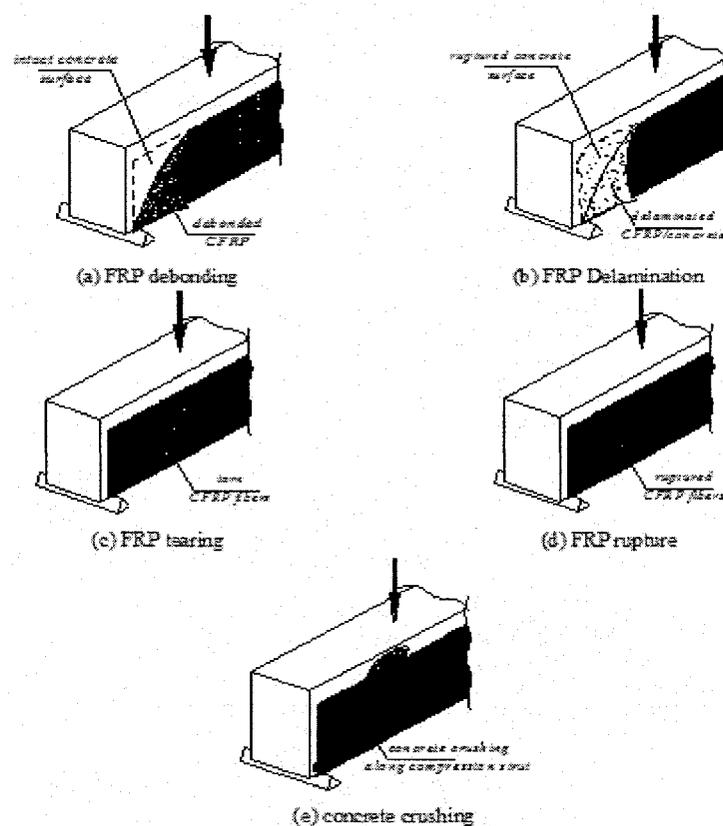


Figure 7 Modes de rupture dans les poutres renforcées en cisaillement à l'aide de FRP

### 1.3.3 Les paramètres d'influences majeurs

De nombreux paramètres influencent le comportement en cisaillement des poutres en BA renforcées à l'aide de MCA, comme le montre clairement la figure 8. Cette figure illustre, sous forme de matrice, le bilan des travaux consacrés au renforcement en cisaillement à l'aide de MCA. On y compte 29 paramètres. Certaines d'entre eux concernent les poutres en béton armé conventionnelles, alors que d'autres sont liés aux poutres renforcées de MCA. Sur cette figure, on peut aussi noter que certains paramètres ont été largement couverts dans les études antérieures; c'est le cas par exemple des propriétés des MCA. D'autres paramètres, en revanche, n'ont fait l'objet d'aucune



### **1.3.3.1 Propriétés des MCA**

Les propriétés du matériau composite utilisé joue un rôle primordial dans le comportement au cisaillement d'une poutre renforcée puisque ce composite collée en surface se comporte comme une armature extérieure et travail conjointement avec l'armature existante.

En effet, plusieurs travaux ont démontré que plus le renfort est rigide plus sa déformation maximale sera très faible. D'autres propriétés du renfort composite influence le comportement au cisaillement d'une poutre renforcée comme l'inclinaison des fibres et qui a été confirmé par les essais réalisés par Chaallal et coll. (1997) où il a été conclu à travers leurs résultats obtenus que les lamelles inclinées offrent une performance meilleure que les lamelles verticales.

### **1.3.3.2 Acier transversal**

Des recherches expérimentales faites sur des poutres en béton armé renforcées avec des matériaux composites ont rapportées que la présence de l'armature transversale influence le comportement en cisaillement de ces poutres, mais plusieurs questions se posent sur la répartition des efforts entre le renfort externe et l'armature interne ainsi que le rôle de chacun d'eux (Voir figure 9).

### **1.3.3.3 Taille des spécimens**

Les essais menés par Bousselham en 2005 ont conclu qu'il existe une influence de la taille des spécimens qui peut affecter la contribution du renfort FRP à la résistance, même les analyses des données expérimentales qui proviennent de sources différentes ont l'aussi confirmées. Pour des spécimens dont la hauteur utile  $d$  est inférieure à 300 mm, le mode de rupture observé était, dans la plupart des cas, une rupture par

décollement du renfort FRP, également le gain de charges diminue quand la hauteur de la section augmente (voir figure 11) (Bousselham, 2005).

#### 1.3.3.4 Type de poutre ou le rapport $a/d$

La longueur de cisaillement  $a/d$  est un paramètre d'influence majeur sur le comportement des poutres en béton armé renforcées en cisaillement à l'aide des matériaux composite, en effet en fonction de la variation de ce rapport, nous avons des catégories de poutres en BA et de modes de ruptures différents (voir §1.3.3.1), même chose était observée dans le cas des poutre en BA et renforcée par du renfort FRP comme le montre la figure 10, pour des poutres profond ( $1 < a/d \leq 2,5$ ), le mode observée était une fracture du renfort et pour des poutres élancées ( $a/d > 3.2$ ), la rupture survient par décollement (Bousselham et Chaallal, 2005).

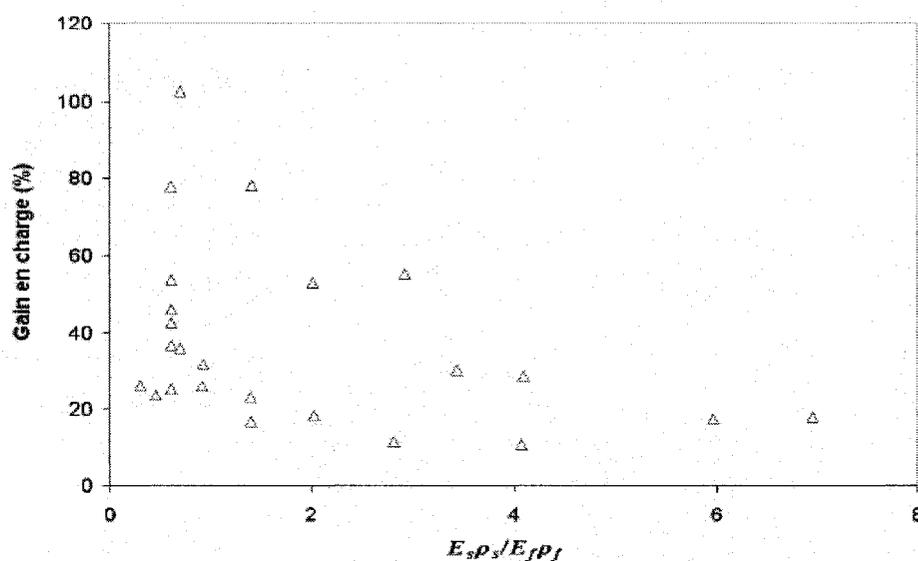


Figure 9 Influence du taux d'acier transversal sur le gain en charge dû au FRP pour des poutres profondes (Adaptée de Bousselham, 2005)

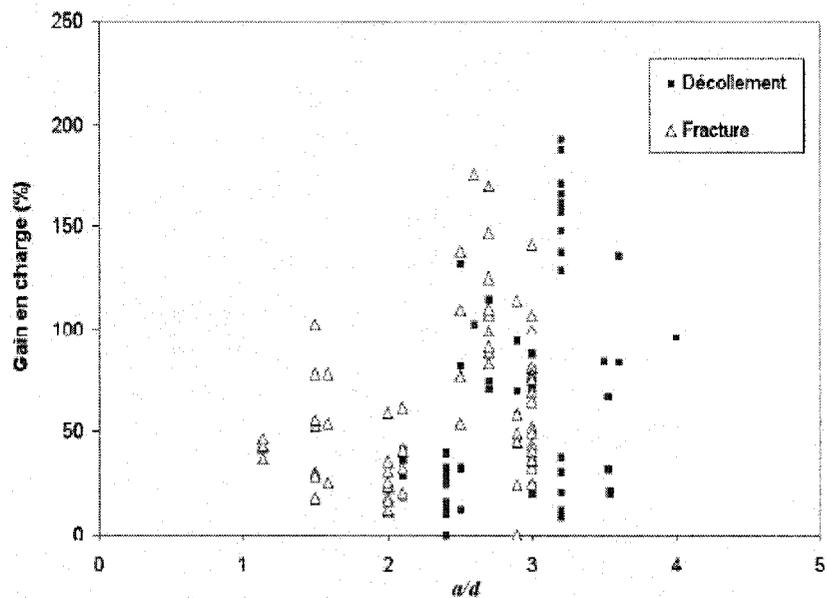


Figure 10 Influence du rapport  $a/d$  sur le gain en charge dû au FRP  
(Adaptée de Bouselham, 2005)

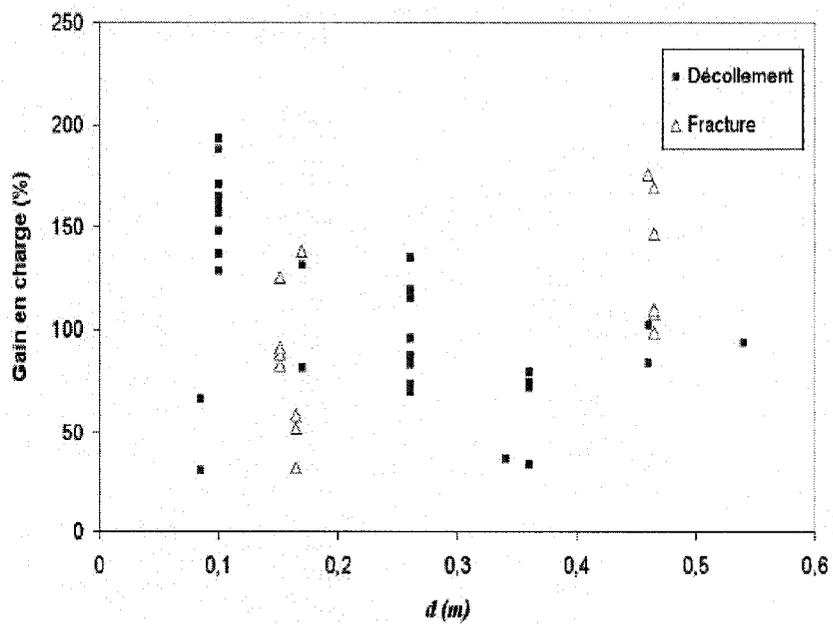


Figure 11 Influence de la taille des poutres sur le gain en charge dû au FRP  
(Adaptée de Bouselham, 2005)

#### 1.4 Calcul en cisaillement des poutres en BA renforcées à l'aide de MCA selon les normes et guides de calcul

Les normes et guides de calcul (CSA S806-02 2002; ACI-440 2002 ; *fib* TG 9.3 2001) utilisent, pour le dimensionnement en cisaillement des poutres en BA renforcées à l'aide de MCA, la même approche que celle utilisée dans les normes de BA pour le calcul en cisaillement des poutres en BA conventionnelles. La contribution du MCA à la résistance en cisaillement est alors ajoutée aux contributions respectives du béton et de l'acier transversal à la résistance ; ces deux contributions étant déterminées selon les normes de BA.

$$V_t = V_c + V_s + V_f \quad (1.15)$$

Pour calculer la contribution du MCA à la résistance ( $V_f$ ), les normes et guide de calcul adoptent le modèle du treillis à 45°, par analogie avec l'acier transversal. Toutefois, l'utilisation de ce modèle se heurte à une difficulté majeure: contrairement à l'acier caractérisé par un plateau de plastification, les fibres en polymères ont un comportement linéaire jusqu'à la rupture. Comme conséquence, la déformation ultime en tension du MCA ( $\epsilon_{fu}$ ), qui n'est jamais atteinte comme le rapportent de nombreuses études, est remplacée par une déformation dite effective ( $\epsilon_{fe}$ ); cette dernière étant nettement inférieure à la déformation ultime, en ce qui concerne le renforcement en cisaillement. La méthode de détermination de la déformation effective des MCA diffère cependant d'une norme à une autre.

##### 1.4.1 Norme canadienne - CSA S806-02

Selon la norme canadienne, la contribution des MCA est calculée en considérant une déformation effective du renfort en MCA à valeur fixe, selon que le renfort est en enveloppe, en U ou collé sur les faces latérales seulement; soit :

$$V_F = \phi_F \frac{A_F E_F \varepsilon_F d_F}{s_F} \quad (1.16)$$

Avec :

$A_F$  : Aire des lamelles composites en mm

$E_F$  : Module d'élasticité des lamelles composites en MPa

$\varepsilon_F$  : Déformation effective du renfort en MCA. Pour un renfort en enveloppe ou un renfort en U  $\varepsilon_F = 4000\mu_\varepsilon$  ; pour un renfort collé sur les faces latérales seulement,  $\varepsilon_F = 2000\mu_\varepsilon$

$d_F$  : Hauteur utile des lamelles composites en mm

$s_F$  : Espacement des lamelles composites en mm

$\phi_F$  : Coefficient de pondération.

#### 1.4.2 Le guide de calcul américaine ACI 440 2R-02

Dans le guide de calcul américaine ACI-440, la résistance totale en cisaillement est calculée à partir de l'expression :

$$V_r = V_c + V_s + \psi_f V_f \quad (1.17)$$

Où  $\psi_f$  : représente le coefficient de pondération, est pris égal à 0.85 pour une configuration du renfort en U ou collé sur les faces latérales, et égal à 0.95 pour configuration en enveloppe.

Dans l'équation 1.17, la résistance en cisaillement du renfort en MCA est calculée comme suit:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\cos \alpha + \sin \alpha) d_f}{s_f} \quad (1.18)$$

Avec:

$A_{fv}$  Aire du renfort FRP en mm<sup>2</sup> qui est égale à:  $2n_f t_f w_f$  ;

$n_f$  : Nombre de couches du renfort en mm;

$t_f$  : Épaisseur du renfort en mm;

$w_f$  : Largeur du renfort en mm;

$\alpha$  : Angle d'inclinaison des fibres composites en degrés;

$d_f$  : Hauteur utile des lamelles composites en mm;

$s_f$  : Espacement entre les bandes composites en mm;

$f_{fe}$  : Contrainte effective du renfort FRP qui est égale à  $E_f \varepsilon_{fe}$ ; (1.19)

$E_f$  : Module d'élasticité du renfort en FRP;

$\varepsilon_{fe}$  : Déformation effective du renfort en FRP.

Pour sa part, la déformation (ou résistance) effective du renfort en MCA, qui représente le facteur fondamental dans l'équation 1.18, est calculée à partir des expressions suivantes, dépendamment de la configuration du renfort; soient:

Dans le cas d'une forme en enveloppe:

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \varepsilon_{fu}$$

Dans le cas d'une forme en U ou en bande:

$$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0.004,$$

Où  $k_v$  est un coefficient de réduction qui dépend de la longueur d'adhérence effective du renfort  $L_e$ , de sa configuration et de la résistance de béton, il est donné par l'équation suivante:

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad (1.20)$$

$$\text{Avec } k_1 = \left( \frac{f'_c}{11900 \varepsilon_{fu}} \right)^{2/3} \quad (1.21)$$

$$k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} \quad \text{Pour une configuration en U} \quad (1.22)$$

$$k_2 = \frac{d_f - 2L_e}{d_f} \quad \text{Pour une configuration en bande} \quad (1.23)$$

Le guide de calcul de l'ACI-440 stipule que la somme des contributions des MCA et de l'acier transversal ne doit pas excéder  $0.66\sqrt{f'_c} b_w d$ .

### 1.4.3 Le guide de calcul européen *fib* TG9.3

Le guide de calcul européen *fib* TG 9.3 (2001) adopte pour sa part une toute autre approche, en ce qui concerne la détermination de la déformation effective du renfort en MCA.

L'expression utilisée pour ce faire est obtenue par simple calibration des résultats des tests disponibles dans la littérature, en supposant valide l'application du modèle du treillis à 45° au cas du renfort externe en MCA.

On distingue ainsi deux modes de rupture concernant le renfort en MCA: (i) le décollement; (ii) la rupture. Pour chacun de ces deux modes de rupture, une série d'expressions de la déformation effective des MCA est proposée, selon la configuration du renfort.

Ces expressions dépendent du taux de renfort  $\rho_f$ , du module de déformation longitudinal du renfort  $E_f$ , et de la résistance du béton en compression. Par exemple, pour un renfort en U ou constitué de lamelles collées sur les faces seulement, utilisant des fibres en carbone, la déformation effective du MCA, pour une rupture par décollement, peut être calculée comme suit :

$$\varepsilon_{f,e} = 10^{-3} \times 0.65 \times \left( \frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.56} \quad (1.24)$$

Par ailleurs, le guide de calcul européen *fib* TG 9.3 (2001) recommande la limitation de la rigidité du renfort à la valeur  $0.018 f_{cm}^{2/3}$  afin d'éviter le risque de décollement.

## CHAPITRE 2

### PRÉSENTATION DE LA BASE DE DONNÉES

#### 2.1 Introduction

Une part importante de l'effort de recherche sur le comportement structural des poutres en béton armé a été dédiée au cisaillement (Regan, 1993). Il faut rappeler que le comportement en cisaillement des poutres en béton armé est un problème complexe, qui a jusqu'ici défié la prédiction purement analytique; bien des aspects, concernant le cisaillement, restent encore mal quantifiées, et la contribution du béton à la résistance en cisaillement demeure encore aujourd'hui une question de grande actualité.

Ce qui par ailleurs explique pourquoi les méthodes de calcul en cisaillement, qui sont en vigueur, restent largement semi-empiriques, reposant en grande partie sur les résultats d'essais en laboratoire.

Cet effort de recherche a permis, au fil des ans, d'accumuler une quantité considérable de données expérimentales et d'observations concernant le comportement en cisaillement, comme il ressort du rapport de l'ASCE-ACI (1973) ou plus récemment encore, celui de l'ASCE-ACI (1998). Pour systématiser la gestion de ces données, l'ACI-445 Shear and Torsion Committee a lancé récemment un projet ayant pour objectif de monter une base de données, regroupant tous les résultats disponibles à travers le monde sur le cisaillement dans les éléments en béton armé (Kuchma et coll., 2003).

Il s'agit, de toute évidence, d'un projet d'envergure qui, outre la gestion systématique des données expérimentales, permettra, à travers l'exploitation rationnelle qui en sera faite, d'améliorer les prescriptions réglementaires en vigueur et leur bien-fondé scientifique.

Concernant le renforcement en cisaillement à l'aide de MCA collé en surface, les travaux de recherche qui lui ont été consacrés jusqu'ici restent peu nombreux, comparativement aux travaux dédiés au cisaillement dans les poutres en béton armé conventionnelles.

Toutefois, l'on note depuis peu une accumulation croissante des données expérimentales, consécutive à l'intérêt grandissant que suscite la recherche sur cet aspect du renforcement à l'aide de MCA. Ceci motive l'élaboration, dès maintenant, d'une base de données propre au renforcement en cisaillement à l'aide de MCA. Ceci d'autant plus que, dans ce cas-ci, davantage de paramètres d'influence entrent en jeu. Aussi, la gestion, tout comme l'exploitation, des données expérimentales devient particulièrement ardue en absence d'un outil informatique.

## **2.2 Contexte**

Triantafillou (1998), dans une étude visant à développer un modèle pour le calcul de la contribution des MCA à la résistance en cisaillement, a recensé une quarantaine de tests consacrés au sujet. Ces données ont été utilisées pour calibrer l'expression de la déformation effective du FRP (voir §1.4.3).

Dans la perspective d'améliorer le modèle ainsi développé, Triantafillou et Antonopoulos (2000) ont ajouté au précédent recensement une trentaine de tests, parus entre temps dans la littérature.

Poursuivant entre autre un autre objectif, qui consistait celui-ci à identifier les paramètres majeurs influençant le comportement en cisaillement des poutres en BA renforcées à l'aide de MCA, Bouselham et Chaallal (2005) ont procédé au montage d'une base de données, qui rassemblait alors plus d'une centaine de tests, et incluait toutes les données pertinentes en cisaillement ; à savoir: les propriétés géométriques des

spécimens mis à l'essai et celles du renfort en MCA, les propriétés mécaniques des matériaux, le taux de renfort en MCA, celui de l'acier transversal et celui de l'acier longitudinal, le rapport  $a/d$ , la charge de rupture totale et la contribution du FRP, et enfin le mode de rupture observé.

Actualisée régulièrement par l'équipe du DRSR (Bousselham, 2005, Bousselham et Chaallal, 2006), cette base de données renfermait à la fin de l'année 2005 plus de cents soixante tests.

Les travaux de recherche en cours au sein du DRSR, sur le renforcement en cisaillement, entre autres dans le cadre du projet 12-75 du National Cooperative Highway Research Program NCHRP (NCHRP, États-Unis), ont motivé le projet de développer un outil avec Visual Basic et MS Access pour la gestion et l'exploitation des données expérimentales concernant cet aspect du renforcement.

Avec la prise en compte des travaux plus récents rapportées dans la littérature, ce sont plus de 265 tests qui sont à présent recensés; excluant ceux qui sont incomplets ou ambiguës (voir figure 12).

Outre la mise à jour des données, d'autres paramètres d'influence sont à présent recensés. Le type de poutre (continue versus à une seule travée), l'épaisseur et la largeur de la table de compression dans le cas d'une section en T, ou encore la taille des agrégats sont des exemples des paramètres ajoutés. Au total, ce sont plus de quarante paramètres qui sont pris en compte.

La section suivante présente dans le détail ces paramètres, classés en catégories.

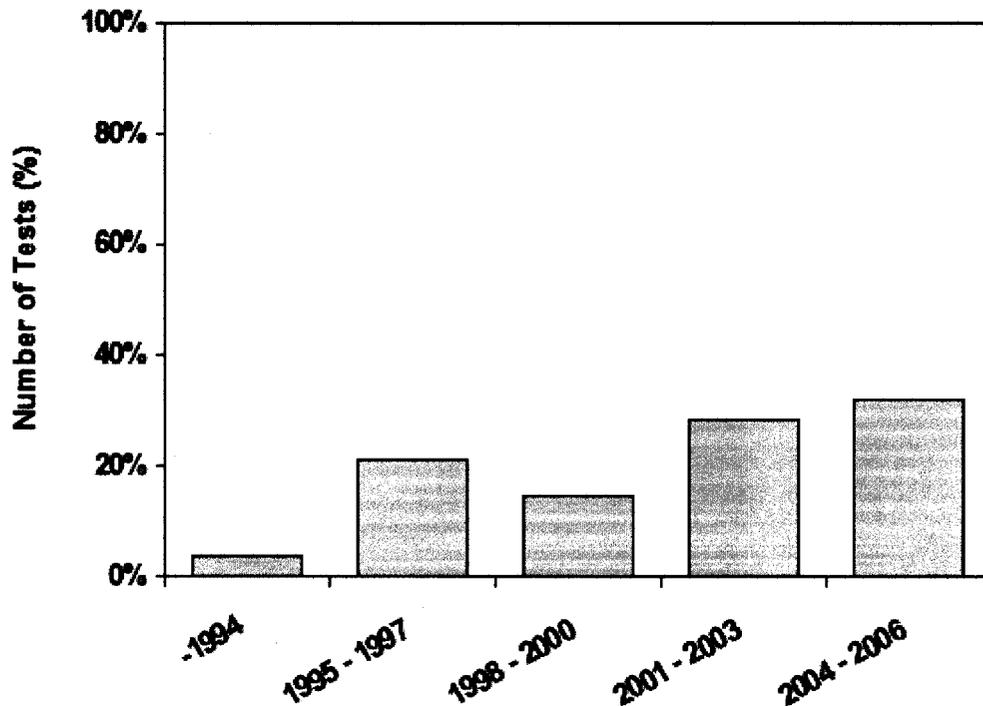


Figure 12 Travaux expérimentaux sur le renforcement en cisaillement à l'aide de MCA. Évolution dans le temps (Adaptée de Chaallal et Bouselham, 2006)

### 2.3 Nature des données

Les données expérimentales ont été extraites à partir de recherche documentaire, portant sur les travaux consacrés au renforcement en cisaillement des poutres en BA à l'aide de MCA. L'ensemble de ces travaux ont été passés en revue, depuis la première étude menée par Berset (1992) jusqu'aux plus récentes (Hassan, 2006). Le lecteur intéressé trouvera dans Bouselham et Chaallal (2006) une description détaillée de ces travaux qui, dans la quasi-totalité, sont de nature expérimentale. Cette description porte sur les

propriétés géométriques des spécimens mis à l'essai, les paramètres étudiés et les principaux résultats obtenus, en particulier les gains en charge dus au FRP et le(s) mode(s) de rupture observé(s). Ceci a débouché sur la matrice illustrant le bilan des travaux qui est montrée à la figure 8.

Les données expérimentales contenues dans la base de données peuvent être classées selon les catégories suivantes:

*1- Données sur les auteurs*

Cette catégorie fournit les références complètes de la recherche: ses auteurs, l'année et le lieu de parution. À noter que les tests gardent la même identification que celle qui est utilisée par les auteurs de la recherche

*2- Propriétés des spécimens mis à l'essai*

Ceci englobe les propriétés géométriques des spécimens, telles que la longueur totale de la poutre, sa portée, le type de poutre selon qu'elle est simple ou continue. La longueur de cisaillement  $y$  est également incluse, ainsi que la nature du chargement : statique ou cyclique.

*3- Dimensions de la section*

Par dimensions de la section, il est entendu sa largeur, sa hauteur totale et sa hauteur effective, ainsi que la hauteur effective des MCA. Dans le cas d'une section en T, il est précisé la largeur de la table et son épaisseur.

*4- Propriétés du béton*

Les propriétés du béton pris en compte concernant sa résistance en compression, en veillant à préciser toutefois la dimension maximale des agrégats, qui représente une donnée maîtresse dans la norme canadienne (CSA A23.3, 2004), ainsi que le type d'éprouvette ayant servi dans l'essai de compression, qui selon Kuchma et coll.

(2003) constitue un facteur d'influence non négligeable dans la résistance en cisaillement.

#### 5- Propriétés de l'acier longitudinal

Sont considérés dans cette catégorie l'aire de la section d'acier tendue, le module de déformation longitudinale de l'acier utilisé, ainsi que sa limite élastique.

#### 6- Propriétés de l'acier transversal

En plus de propriétés énumérées plus haut, pour le cas de l'acier longitudinal, on considère ici également l'espacement des étriers internes en acier

#### 7- Propriétés du renfort externe en FRP

Ceci renferme : (a) le type de renfort externe, selon qu'il s'agit de renfort collé en surface ou un autre type de renforcement externe utilisant MCA ; (b) le type de fibre utilisée (carbone, verre ou aramide), son module de déformation longitudinale, sa résistance ultime en tension ; (c) les caractéristiques géométriques du renfort en FRP, incluant la configuration du renfort (enveloppes, U ou collé sur les faces latérales, continu versus discontinu, droit ou incliné par rapport à l'axe longitudinal de la poutre), l'épaisseur du renfort en MCA, le nombre de couches, et pour un renfort discontinu, l'épaisseur des lamelles et leur espacement.

#### 8- Résistance en cisaillement et mode de rupture observé

La résistance en cisaillement totale obtenue à la rupture, ainsi que la contribution des MCA à la résistance sont données dans cette catégorie. L'on précise également le mode de rupture survenu. Sont considérés les modes suivants: (i) le décollement du renfort en MCA; (ii) la délamination du renfort; (iii) la fracture des fibres; (iv) l'écrasement du béton.

## CHAPITRE 3

### CONCEPTION DE L'OUTIL DE GESTION ET D'EXPLOITATION DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES

#### 3.1 Introduction

Comme il a été mentionné dans les chapitres précédents, les codes de dimensionnement et les modèles analytiques existants pour le renforcement externe des poutres en béton armé à l'aide des matériaux composites utilisent des équations semi-empiriques déterminées à partir d'investigations expérimentales effectuées en laboratoire sur des spécimens réduits. Pour l'évaluation et l'amélioration des prescriptions réglementaires contenues dans les codes et également des modèles de calcul proposés, la base de données qui a été développée représente une source d'information précieuse et indispensable.

Ces données collectées à partir de recherches bibliographiques poussée conduit par l'équipe du DRSR sont compilées dans un fichier Excel qui n'est pas protégé et nécessite beaucoup de manipulations pour faire des mises à jour, des recherches ou des analyses. De plus, il est très risqué d'exposer ces données à de mauvaises manipulations qui peuvent engendrer la perte d'information ou l'introduction d'erreurs au moment de la saisie.

Pour pallier à tous ces problèmes, il s'est avéré indispensable de développer un outil informatique facile d'utilisation qui permet à la fois de sécuriser ses données, de les gérer et d'optimiser l'exploitation. Cet outil offre de très nombreuses fonctionnalités dont les plus importantes sont:

1. La mise à jour des données expérimentales (ajout, modification et suppression);

2. La recherche et la catégorisation des tests par critères avec la possibilité de sauvegarder les résultats des recherches dans un fichier MS Excel;
3. Représentation graphique de quelques paramètres d'influence ainsi que des données expérimentales par rapport aux prédictions théoriques.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les outils que nous allons utiliser pour développer notre logiciel ainsi que les différentes fonctions qu'ils offrent.

### **3.2 Environnement de programmation.**

L'outil fonctionne sous Windows, pour son développement, nous avons choisi Microsoft Access pour la sauvegarde des données. Celui-ci offre la possibilité d'importer facilement les données existantes dans le fichier Excel et de les sécuriser avec un mot de passe. Quant au langage de programmation, nous avons opté pour Microsoft Visual Basic 6, ce dernier permet de construire des écrans conviviaux rapidement avec la possibilité de valider la saisie des données. Par ailleurs, il a une bibliothèque très riche de fonctions pour la lecture et la sauvegarde des données dans les tables Access ainsi que la manipulation des fichiers Excel, y compris le dessin des graphes.

### **3.3 Description de la base de données Access.**

Après avoir créé les tables dans la base de données GDEFP.MDB, nous avons exporté les données existantes du fichier Excel dans la table des spécimens voir Annexe 1. Par la suite on a sécurisé la nouvelle base de données avec un mot de passe.

La base de données Access GDEFP.MDB contient six tables, le détail du nom, du type et la description des champs sont récapitulés dans les tableaux suivants:

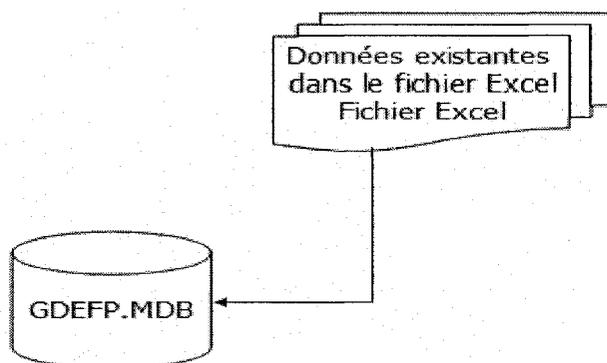


Figure 13 Transfert des données de fichier Excel vers la base de données Access.

Tableau I

Description des champs de la table Spécimen

Nom de la table:	CdeSpecimen	
Description:	Utilisée pour la sauvegarde des résultats et des données des spécimens testés.	
Nom des champs	Type	Description
Author	Texte	Nom de l'auteur
Date	Texte	Date de publication ou de réalisation du test
Code_Specimen	Texte	Code d'identification du spécimen testé
Reference	Texte	Titre de l'article, de son lieu de publication ou toute autre information pertinente
TotalBeamLenght	Numérique	Longueur totale de la poutre
Span	Numérique	Portée
ShearLength	Numérique	Longueur de cisaillement
Typee	Texte	Type de la poutre

LoadingType	Texte	Type de chargement
SectionHeight	Numérique	Hauteur de la section
WebWidth	Numérique	Largeur de l'âme
EffectiveDepth	Numérique	Hauteur utile de section
EffectiveFRPDepth	Numérique	Profondeur du renfort
Section	Texte	Type de section
FlangeThickness	Numérique	Largeur tribulaire dans le cas d'une section en Té
GrossAgregatSection	Numérique	Dimension du plus gros agrégat
CompressionStrengthConcrete	Numérique	Résistance à la compression
Test	Texte	Test de compression
YieldStressLongitudinal	Numérique	Limite élastique des armatures longitudinales
ElasticModulusLongitudinal	Numérique	Module d'élasticité des armatures longitudinales
SectionAreaLongitudinal	Numérique	Aire de des armatures longitudinales
YieldStressTransversal	Numérique	Limite élastique des armatures transversales
ElasticModulusTransversal	Numérique	Module d'élasticité des armatures transversales
SectionAreaTransversal	Numérique	Aire des armatures transversales
SpacingTransversal	Numérique	Espacement entre les armatures transversales
TypeRenforcement	Texte	Type de renforcement
FrpType	Texte	Type des fibres utilisées
Configuration	Texte	La configuration utilisée
NumberLayerFRP	Numérique	Nombre de couche de composite
SpacingFRP	Numérique	Espacement entre les lamelles

ThicknessFRP	Numérique	Épaisseur du tissu composite
WidthFRP	Numérique	Largeur du tissu composite
ShapeFrp	Numérique	Section du renfort utilisé
AngleDiagonalFRP	Numérique	Inclinaison des fibres
ModulusElasticFRP	Numérique	Module d'élasticité du renfort
UltimeResistanceFRP	Numérique	Résistance ultime du composite
ModeRupture	Texte	Mode de rupture qui survient après un chargement ultime
TotalShearForce	Numérique	Effort tranchant ultime
FRPShearForce	Numérique	Effort tranchant repris par le renfort FRP

Tableau II

## Description des champs de la table Configuration

Nom de la table:	Configuration	
Description:	Elle contient la liste des configurations.	
<b>Nom des champs</b>	<b>Type</b>	<b>Description</b>
ConfigurationID	Numérique	Un code unique pour identifier la configuration.
Configuration	Texte	Sides, U-Wrap, Total Wrap, U-Wrap with anchor, NSM rods, Other

Tableau III

## Description des champs de la table Type de chargement

Nom de la table:	LoadingType	
Description:	Elle contient les types de chargement possibles dans un essai.	
<b>Nom des champs</b>	<b>Type</b>	<b>Description</b>
LoadingTypeID	Numérique	Code unique pour identifier le type de chargement
LoadingType	Texte	Static ou Other

Tableau IV

Description des champs de la table Mode de rupture

Nom de la table:	ModeRupture	
Description:	Elle comprend les différents modes de ruptures qui peuvent survenir dans un test.	
<b>Nom des champs</b>	<b>Type</b>	<b>Description</b>
ModeRuptureID	Numérique	Code unique pour identifier le mode de rupture
ModeRupture	Texte	Debonding, Concrete Crushing, Fracture, Other

Tableau V

Description des champs de la table Test

Nom de la table:	Test	
Description:	Elle contient le type d'éprouvette qui a servi dans l'essai de compression pour le calcul de la résistance à la compression du béton.	
<b>Nom des champs</b>	<b>Type</b>	<b>Description</b>
TestID	Numérique	Code unique pour identifier le type de test utilisé
Test	Texte	Cylinder ou Cube

Tableau VI

Description des champs de la table Type de renforcement

Nom de la table:	TypeRenforcement	
Description:	Elle contient le type de système de renforcement utilisé.	
Nom des champs	Type	Description
TypeRenforcementID	Numérique	Code unique pour identifier le type de renforcement utilisé
TypeRenforcement	Texte	External-Bonded, NSM-FRP, Other

### 3.4 Description du logiciel.

Le logiciel comporte deux parties. La première concerne la mise à jour des données expérimentales; la seconde l'exploitation et l'analyse de ces données. Dans les deux parties, une fonction est intégrée pour exporter les données vers un fichier Excel pour une impression éventuelle. Les deux options sont accessibles à partir d'un menu principal (voir figure 14). Un fichier d'aide est également lié au logiciel.

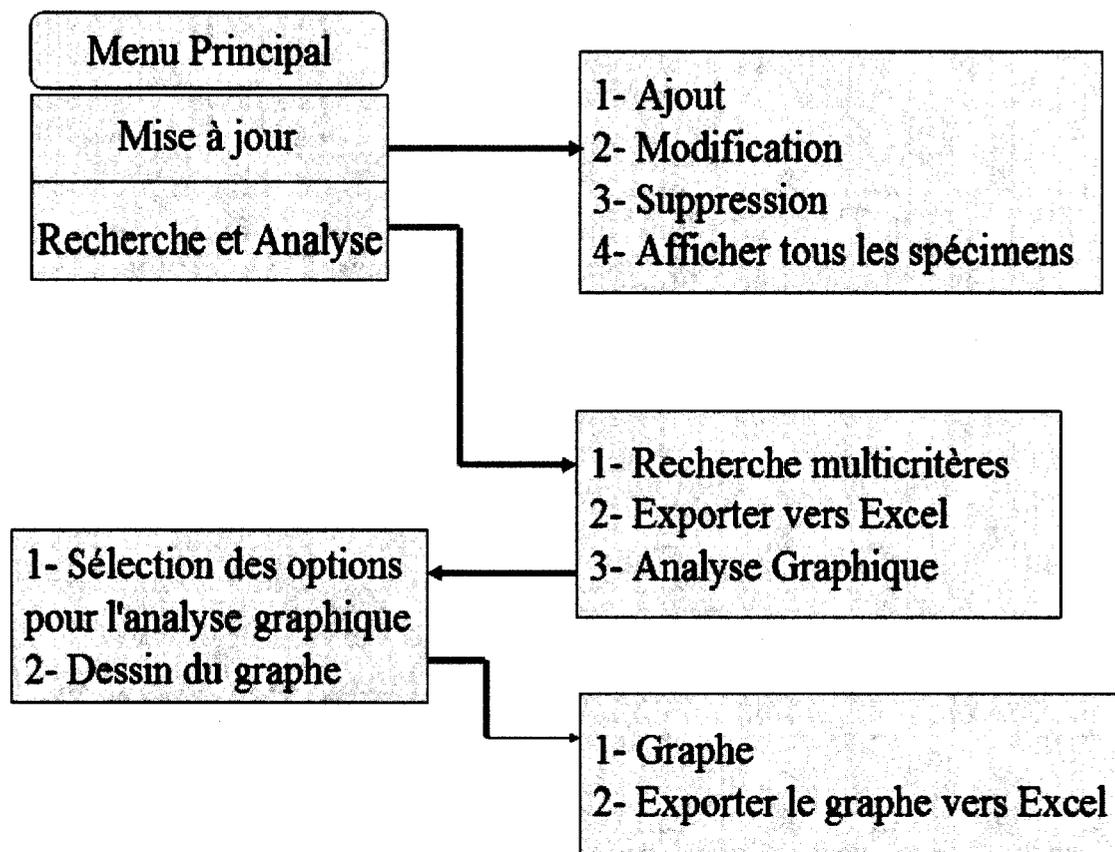


Figure 14 Organigramme des différents modules du logiciel

### 3.4.1 Mise à jour des données expérimentales

Un écran est développé pour l'ajout, la modification et la suppression des spécimens, et pour faciliter la recherche d'un spécimen particulier pour le modifier ou le supprimer. Une autre fonction est ajoutée qui permet l'affichage de la liste complète des spécimens dans un écran à part où nous pouvons sélectionner un seul essai et le transférer à l'écran des mises à jours.

Les données seront regroupées comme suit:

1) Identification du spécimen incluant:

Auteur, code du spécimen, date de réalisation du test et la référence.

2) Géométrie de la poutre incluant:

La longueur totale de la poutre, la longueur de travée, la longueur de cisaillement, le type de la poutre et le type de chargement.

3) Les dimensions de la section utilisée incluant:

La hauteur de la section, la largeur de l'âme, la hauteur utile de la section, la profondeur du renfort, le type de section et la largeur tributaire dans le cas d'une section en T.

4) Les propriétés du béton utilisé incluant:

La dimension du plus gros agrégat, la résistance à la compression, le type de test de compression pour le calcul la résistance à la compression du béton.

5) Les propriétés des armatures longitudinales utilisées incluant:

La limite élastique des armatures longitudinales, le module d'élasticité des armatures longitudinales, l'air de des armatures longitudinales.

6) Les propriétés des armatures transversales utilisées incluant :

La limite élastique des armatures transversales, le module d'élasticité des armatures transversales, l'air des armatures transversales, l'espacement entre les armatures transversales.

7) Les propriétés du matériau composite utilisé incluant:

Le type de renforcement, le type des fibres utilisées, la configuration utilisée, le nombre de couche de composite, l'espacement entre les lamelles, l'épaisseur du tissu composite, la largeur du tissu composite, le type de la section du renfort utilisé, l'angle d'inclinaison des fibres, le module d'élasticité du renfort, la résistance ultime du composite.

8) Les résultats obtenus par le test incluant:

Le mode de rupture observé à la fin de l'essai, la résistance totale à l'effort tranchant et celle apportée par le matériau composite.

Chaque spécimen sera identifié par un code unique, et pour faciliter la saisie des données et éviter les erreurs de frappe des listes de sélection prédéfinis ainsi que des choix sous forme d'options seront utilisés dans la conception de l'écran des mises à jour.

Comme il est possible de rencontrer des essais incomplets à intégrer dans notre base de données on permettra la saisie de N/A dans les champs numériques. Toutes les données seront validées avant de les sauvegarder et des messages d'erreur seront affichés pour signaler toute saisie incomplète (voir figure 15).

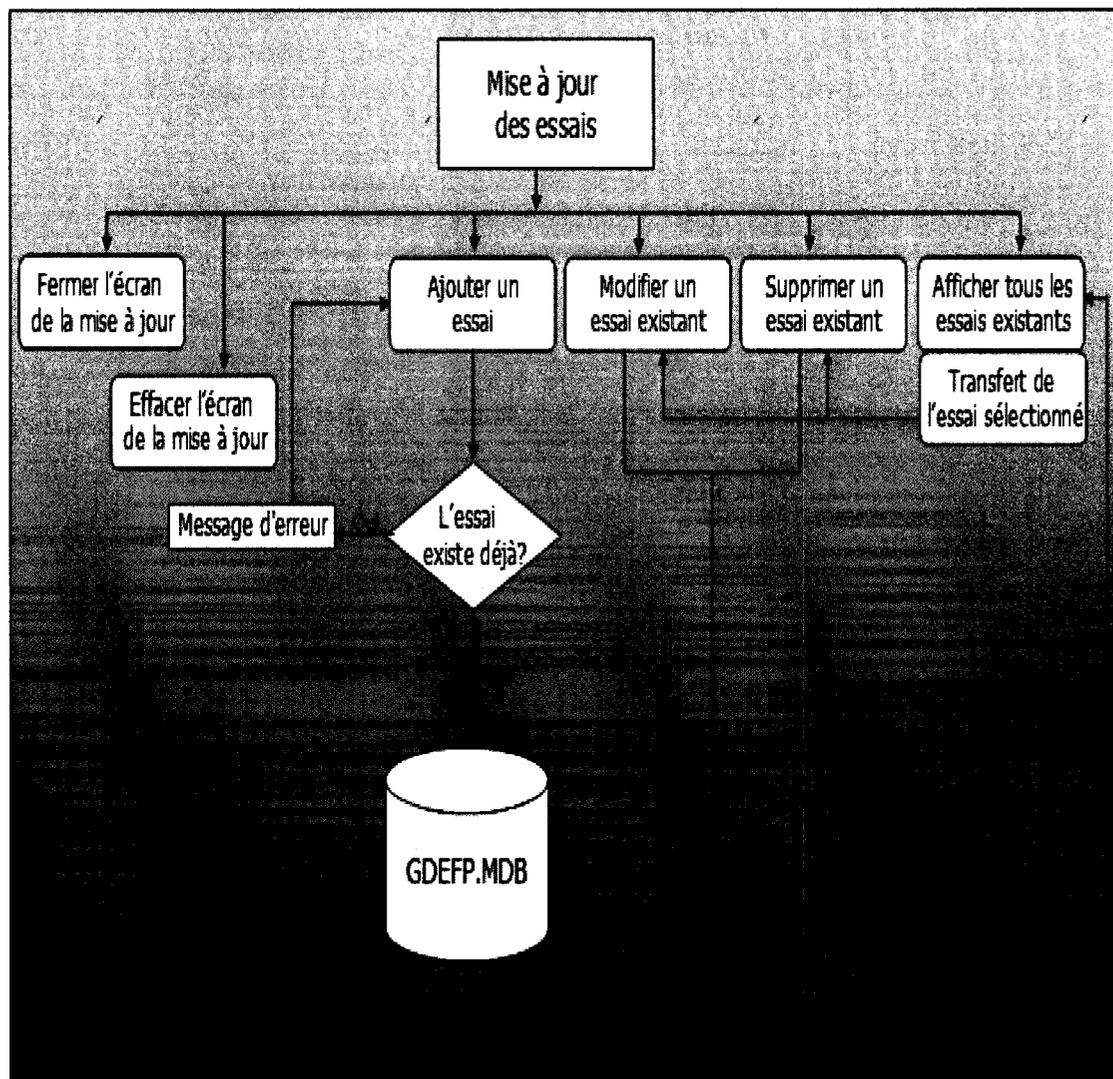


Figure 15 Organigramme des mises à jour des données expérimentales

Pour pallier une défaillance éventuelle de la souris, des raccourcis clavier seront offerts comme Alt A pour ajouter, Alt U pour modifier et Alt D pour supprimer un spécimen.

En haut de l'écran on affiche le symbole décimal à utiliser pour la saisir des données numériques qui peut être la virgule ou le point dépendamment de la langue de travail sélectionnée dans Windows.

### 3.4.2 Recherche multicritère

Pour une exploitation optimale des données, onze options de recherches qui peuvent être combinées sont disponibles dans l'écran de recherche (voir figure 16) sous forme de listes de choix prédéfinis.

Les critères de recherche suivants ont été choisis en fonction de leur importance dans le comportement en cisaillement des poutres en béton armé renforcées par matériau composite:

1) La liste des configurations:

La forme en U, la forme en U Wrapping, la forme en Sides, la forme en U with anchor ou la forme en NSM rods.

2) La liste des modes de ruptures:

Debonding, Fracture, Concrete Crushing ou Other qui inclue tous les autres modes.

3) La liste des types de poutres:

Simple (sur deux appuis) ou continues.

4) La liste des sections du renfort composite:

Des bandes ou continue.

5) La liste des types de sections de poutres:

Rectangulaire ou en T.

6) La liste des types de chargement appliqué:

Statique ou Other, celle ci inclue le cyclique et les autres cas de chargement.

7) La liste des types du renforcement:

Renforcement externe par des lamelles ou des tissus ou biens des barres inclinées en surfaces (NSM rods).

8) La longueur de cisaillement  $a/d$  qui contiendra les trois cas suivants:

$a/d < x$ ,  $a/d > x$  ou  $x \leq a/d \leq y$ , les valeurs de  $x$  et  $y$  sont saisis par l'utilisateur.

9) La liste des sections de l'acier transversal  $A_v$ :

$$A_v = 0, A_v \geq A_{\min}, 0 < A_v < A_{\min},$$

$A_{\min}$  présente la surface minimale de l'acier transversal nécessaire pour un renforcement en cisaillement pour les poutres en béton armé, elle est calculée comme suit (CSA A23.3 2004, ACI 318-05):

$$A_{\min} = 0.06 \sqrt{f'_c} \frac{b_w}{f_y} \quad (3.1)$$

10) La liste des résistances en compression du béton:

$$f'_c < 25 \text{ MPa}, 25 \text{ MPa} \leq f'_c \leq 40 \text{ MPa}, f'_c > 40 \text{ MPa}.$$

11) La liste des hauteurs utiles d:

$$d < 200 \text{ mm}, 200 \text{ mm} \leq d \leq 400 \text{ mm}, d > 400 \text{ mm}.$$

On offre aussi la possibilité d'afficher tous les essais de la base de données. Les résultats de la recherche multicritères sont affichés dans une grille, ils peuvent être sauvegardés dans un fichier Excel. Le nombre de spécimens qui satisfèrent les critères de recherche ainsi que le pourcentage par rapport au nombre total des essais existants sont affichés en bas de l'écran de recherche.

La contribution du matériau composite  $V_{frp-prédite}$  déterminée à partir de la norme canadienne (CSA S806-02), des guides de calcul américain (ACI 440.2R-02) et européen (*fib* TG9.3) ainsi que les modèles suivants est affichée dans la grille.

1. Triantafillou et Antonopoulos (2000);
2. Khalifa et coll. (1999);
3. Chaallal et coll. (2002);
4. Pellegrino et Modena (2002);
5. Chen et Teng (2003);
6. Hsu et coll. (2004);
7. Cao et coll. (2005);
8. Zhang et Hsu, 2005.

L'annexe 3 donne un résumé de chacun de ces modèles. Une analyse graphique très détaillée pour les résultats de la recherche avec plusieurs options est implémentée.

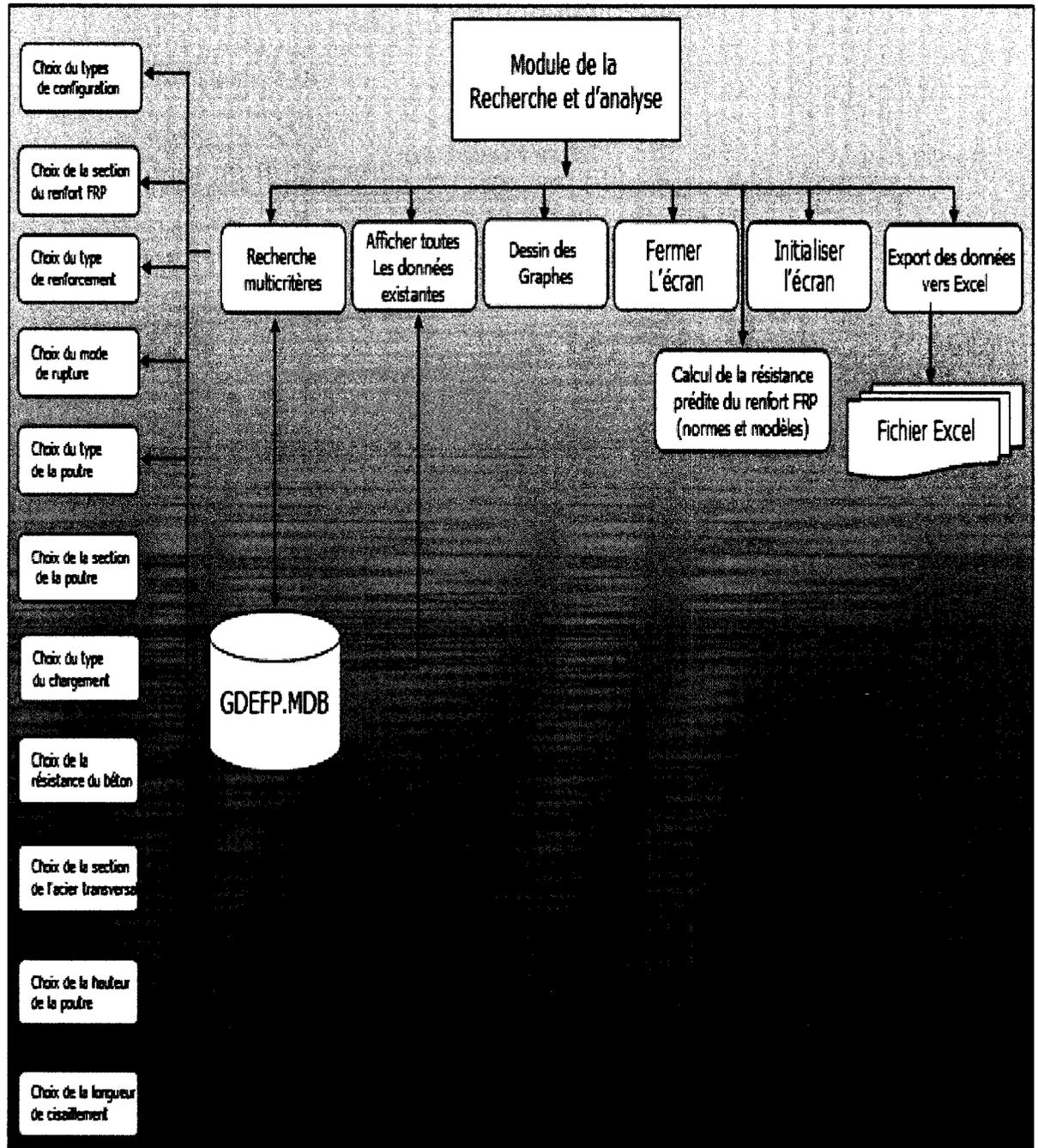


Figure 16 Organigramme de la recherche multicritères

### **3.4.3 Analyse graphique**

Pour analyser les résultats de la recherche précédente sous forme de graphiques on offre la possibilité de choisir les séries qui peuvent être représentées sur le même graphe, aussi ce qui peut être représenté sur les axes des abscisses et des ordonnées. L'écran est divisé en quatre parties (voir figure 17).

#### **3.4.3.1 Le choix des séries**

Parmi les paramètres d'influences majeurs sur le comportement en cisaillement des poutres renforcées, on trouve les types de mode de ruptures et les différentes configurations du renfort c'est pour cela qu'on donnera la possibilité de choisir des séries à partir de ces paramètres, ainsi on aura une analyse plus détaillée de ses données expérimentales avec plusieurs combinaisons entre les différents types de chaque paramètre.

Quand le mode de ruptures sera sélectionné dans la liste, une ou toutes les options suivantes peuvent être choisies:

- Le décollement du renfort;
- La fracture des fibres;
- L'écrasement du béton;
- Autres modes de ruptures.

Également, pour le choix de la configuration du renfort, une ou toutes les options suivantes peuvent être choisies:

- Renfort sur les deux faces de la poutre;
- Renfort sur les trois faces de la poutre (U);
- Renfort sur les trois faces de la poutre avec ancrage;
- Renfort en enveloppes;
- Barre composite ancrée en surface (NSM rods).

### 3.4.3.2 Axe des abscisses "X"

Dans les poutres renforcées en cisaillement par matériaux composites, la rigidité axiale du renfort et la résistance du béton sont des paramètres qui sont liées directement aux différents mécanismes d'adhérences à l'interface béton-FRP. C'est aussi le cas du rapport longueur de cisaillement sur la hauteur utile de la section et de la taille de la poutre, il est donc naturel d'en tenir compte lors de l'analyse et par conséquent de les intégrer dans les options. Cependant, une option seulement peut être choisie

- 1) Le rapport "a/d" qui représente la longueur de cisaillement sur la hauteur utile de la section;
- 2) La rigidité du composite rapportée à la résistance du béton à la compression qui sera exprimer par:  $E_f \rho_f / (f_c')^{2/3}$  où  $\rho_f = \frac{2n_t w_f}{b_w s_f}$ .
- 3) La hauteur utile "d" de la section;
- 4) La résistance du composite " $V_{frp}$ " obtenue à partir des tests.

### 3.4.3.3 Axe des ordonnées "Y"

Pour le calcul de la contribution du renfort composite, les chercheurs ont adopté une fraction de la déformation ultime appelée déformation effective, la relation entre cette déformation et la rigidité axiale a fait l'objet de plusieurs analyses dans la plus part des études qui ont été faites sur le comportement des poutres renforcées en cisaillement, notamment pour élaborer des modèles de calcul pour ces poutres renforcées.

D'autres paramètres ont aussi servi à l'analyse des données expérimentales, comme le gain en charge, la résistance du renfort composite prédite par les normes et les modèles analytiques. Pour cela ses options et d'autres sont pris en compte dans notre analyse.

Suivant l'axe des ordonnées "Y", l'outil permet de choisir entre:

- 1) La déformation effective rapportée par le composite " $\varepsilon_{f,e}$ ", celle ci est une fraction de la déformation ultime, elle est calculée à partir du modèle de Triantafillou et coll, 2000:

$$\varepsilon_{f,e} = \frac{V_{\text{exp},f}}{0.9b_w d E_f \rho_f (1 + \cot \beta) \sin \beta} \quad (3.1)$$

- 2) Le rapport " $\varepsilon_{f,e} / \varepsilon_{f,u}$ " qui représente la déformation effective sur la déformation ultime; " $\varepsilon_{f,u}$ " est définie comme le rapport de la contrainte ultime du renfort FRP sur le module d'élasticité du renfort FRP.

$$\varepsilon_{f,u} = f_{f,u} / E_f \quad (3.2)$$

- 3) Le gain en charge obtenu à l'aide du composite:

$$\text{Gain}(\%) = \frac{V_f}{V_{\text{total}} - V_f} \quad (3.3)$$

- 4) Le rapport " $\frac{V_f}{b_w d_f}$ ", celui ci représente le rapport entre la résistance du composite obtenue à partir des tests et la largeur de l'âme multipliée par la profondeur du composite;

- 5) La résistance du renfort FRP prédite qui pourra être calculée avec trois normes et huit modèles de calcul.

Dans le cas du choix de la résistance du renfort FRP prédite, une méthode de calcul doit être sélectionnée parmi les normes ou modèles.

### 3.4.3.4 Dessin du graphe

Après avoir vérifié que toutes les options ont été choisies y compris la ou les séries, les données pour l'axe des X et Y, un graphe est dessiné. Les données à partir desquelles le graphe a été généré sont aussi affichées en bas de l'écran. On offre également la possibilité de sauvegarder le graphe et les données dans un fichier Excel.

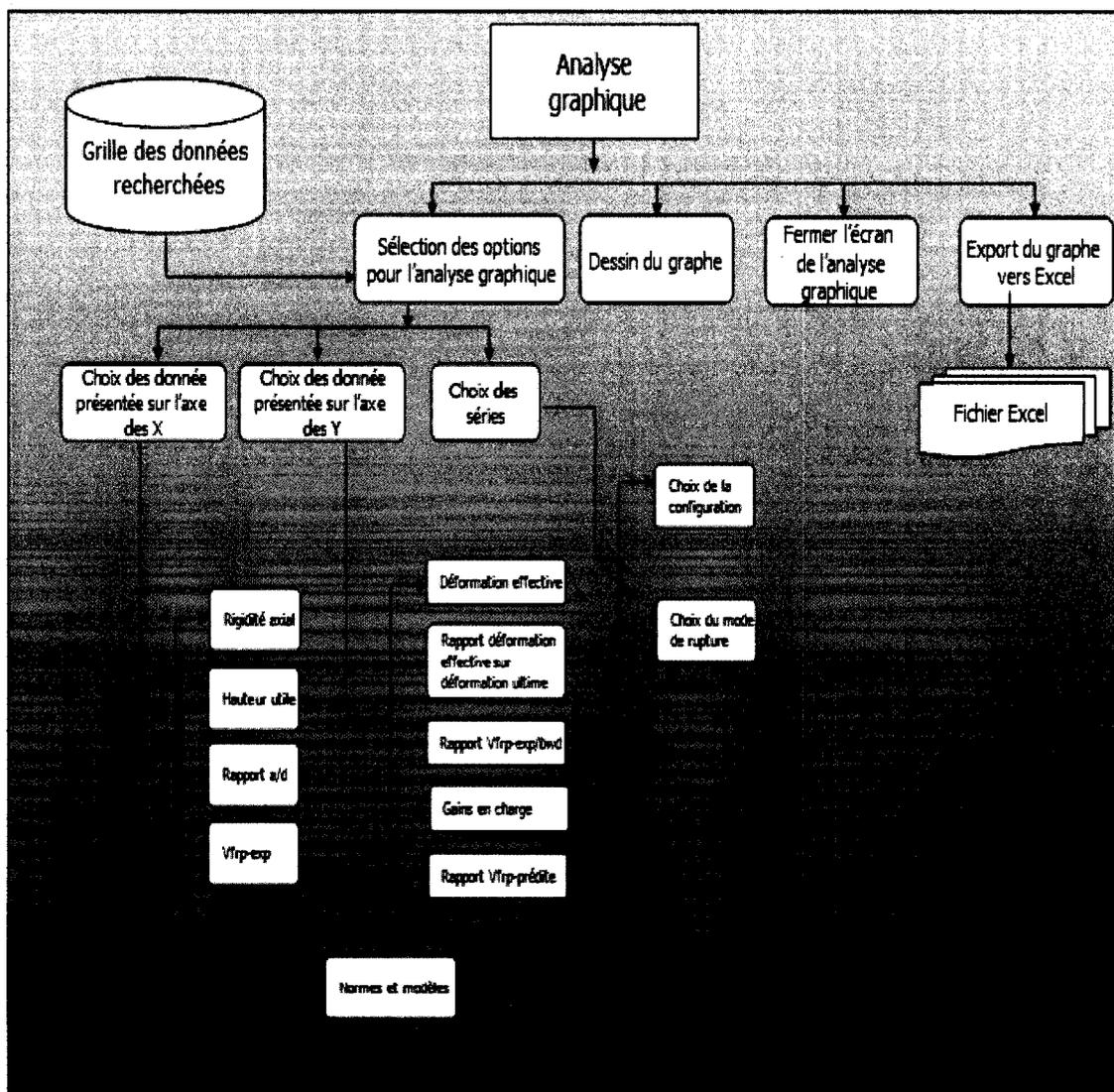


Figure 17 Organigramme du module d'analyse graphique des données recherchées

## CHAPITRE 4

### FONCTIONNEMENT DE L'OUTIL FRP-S2DMS

#### 4.1 Environnement requis

Cet outil a été conçu pour fonctionner sur un poste de travail utilisant Windows comme système d'exploitation. L'installation de Microsoft Excel est obligatoire pour la création des graphes et l'exportation des résultats. Un minimum d'espace disque de 20 Méga octets ainsi que 512 Méga octets de mémoire sont requis pour l'installation et l'utilisation du logiciel.

#### 4.2 Installation

Pour installer le logiciel, on peut exécuter le fichier d'installation ou tout simplement copier les fichiers suivants dans un même répertoire et créer un raccourci pour lancer l'outil:

FRP\_S2DMS.EXE: le fichier exécutable;

GDEFP.MDB : la base de données des essais expérimentaux existants;

GDEFEXPORTMODEL.XLS : fichier modèle pour la sauvegarde des données;

FRP\_S2DMS-Help.CHM: fichier d'aide pour l'outil de gestion et d'exploitation des données expérimentales.

#### 4.3 Fonctionnement

Dans cette partie, on va présenter le fonctionnement en détail de cet outil y compris la mise à jour, la recherche multicritère ainsi que l'analyse graphique.

Le menu principal (voir figure 18) comporte les trois boutons suivants: "Data Update", "Search & Analyse" et "Exit" Ce dernier bouton sert à fermer l'application après avoir validé un message de confirmation, également deux menus sont insérés "FRP\_S2DMS"

qui inclut trois options (Data Update, Search & Analyse, Exit) et "Help" qui inclut le fichier d'aide et le fichier à propos de l'outil FRP\_S2DMS (voir figure 28).

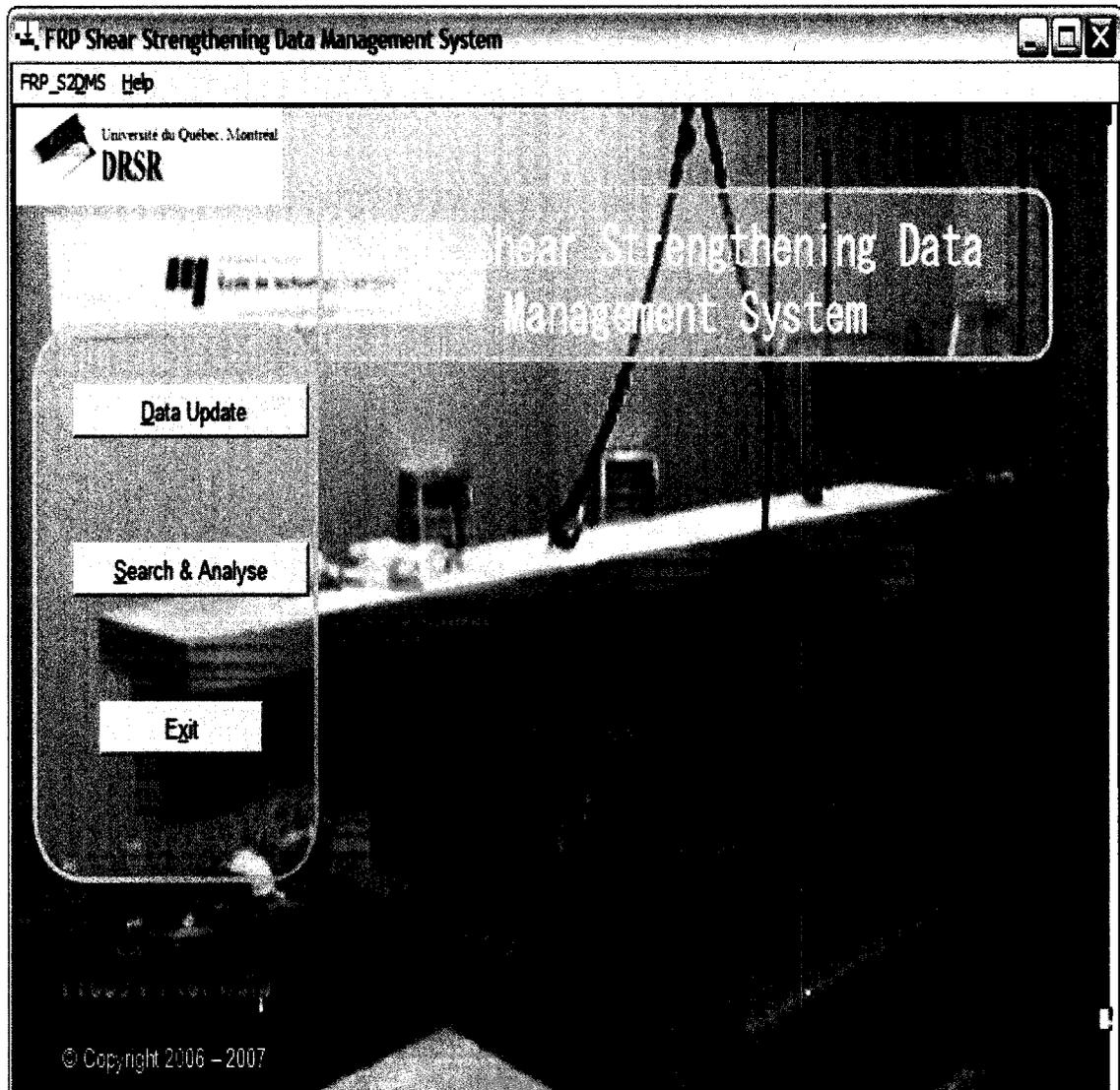


Figure 18 Menu Principal

Quand on clique sur le bouton de "Data Update", l'écran des mises à jour des essais est affiché (voir figure 19) pour saisir toutes les données d'un essai (géométrie, propriétés des matériaux utilisées...). Pour faciliter la saisie, des listes de sélection ont été placées,

celles-ci comportent les différentes possibilités d'un paramètre. Exemple pour le type de fibres utilisées, nous allons choisir entre les trois types qui existent (Aramide, Carbone, Verre), les données dans ces listes sont prédéfinies pour aider l'utilisateur dans son choix. Avant toute mise à jour, l'utilisateur doit remplir tous les champs de l'écran. Dans le cas où la donnée n'est pas disponible on doit saisir "N/A". Des messages d'erreurs sont affichés pour indiquer les données incorrectes ou les champs non remplis. Le symbole décimal à utiliser (virgule ou points) est affiché dans une note en haut de l'écran, celui ci dépend de la configuration du poste de travail.

FRP\_S2DMS Help

Author:  Specimen Code:  Date:

Reference:

**Note**  
Please enter all the data and use N/A if not applicable. For the decimal symbol use .

**Geometry of Beam**  
Shear Length (m):   $a$  Type:  Simple  Continue  
Span (m):   $L_{span}$   
Total Beam Length (m):   $L_{total}$   
Loading Type:

**Dimension of Section**  
Section height (mm):   $h$  Effective FRP Depth (mm):   $d_f$   
Web width (mm):   $b_w$  Effective Depth (mm):   $d$   
Shape:  Rectangular  T-Beam

**Concrete**  
Gross Aggregate Section (mm):   $A_g$   
Compression Strength (MPa):   $f_c$   
Test:

**Longitudinal Steel**  
Yield Stress Long. (MPa):   $f_{yL}$   
Elastic Modulus Long. (GPa):   $E_L$   
Section Area Long. (mm<sup>2</sup>):   $A_L$

**Transversal Steel**  
Yield Stress Trans. (MPa):   $f_{yT}$   
Elastic Modulus Trans. (GPa):   $E_T$   
Section Area Trans. (mm<sup>2</sup>):   $A_T$   
Spacing Trans. (mm):   $s$

**Fibre Reinforced Polymer**  
Strengthening system:  Number of layers:   $n_f$  Thickness (mm):   $t_f$  Inclination of fibers:   $\theta^\circ$   
Fibers Type:  Elastic Modulus (GPa):   $E_f$   
Wrapping Schemes:  ShapeFrp:  Continue  Strips Ultimate Resistance (MPa):   $f_{fu}$

**Shear Force and Rupture Mode**  
Failure Mode:   
Total Shear Force (kN):   $V_u$  FRP Shear Force (kN):   $V_{frp}$

Add Update Delete Clear Display specimen list Close

Figure 19 Mise à jour des données d'un essai

Dans le cas de sélection de la section de l'essai en Té, le champ pour la saisie de la largeur tributaire  $h_f$  devient visible, également dans le cas de sélection de la section du renfort en bandes collées sur les surfaces de la poutre, les champs pour la saisie de l'espacement  $s_f$  et de la largeur du tissu composite  $w_f$  deviennent visibles voir figure 20.

FRP\_SQMS Help

Author:  Specimen Codes:  Date:

Reference:

**Note**  
Please enter all the data and use N/A if not applicable. For the decimal symbol use !

**Geometry of Beam**  
Shear Length (m):   $a$  Type:  Simple  Continue  
Span (m):   $L_{span}$   
Total Beam Length (m):   $L_{total}$   
Loading Type:

**Dimension of Section**  
Section height (mm):   $h$  Effective FRP Depth (mm):   $d_f$   
Web width (mm):   $b_w$  Effective Depth (mm):   $d$   
Shape:  Rectangular  T-Beam Flange Thickness (mm):   $h_f$

**Concrete**  
Gross Aggregate Section (mm):   $A_g$   
Compression Strength (MPa):   $f_c$   
Test:

**Longitudinal Steel**  
Yield Stress Long. (MPa):   $f_{yL}$   
Elastic Modulus Long. (GPa):   $E_L$   
Section Area Long. (mm<sup>2</sup>):   $A_L$

**Transversal Steel**  
Yield Stress Trans. (MPa):   $f_{yT}$   
Elastic Modulus Trans. (GPa):   $E_T$   
Section Area Trans. (mm<sup>2</sup>):   $A_T$   
Spacing Trans. (mm):   $s$

**Fibre Reinforced Polymer**  
Strengthening system:  Number of layers:   $N_f$  Thickness (mm):   $t_f$  Inclination of fibers:   $\theta$   
Fibers Type:  Spacing (mm):   $s_f$  Width (mm):   $w_f$  Elastic Modulus (GPa):   $E_f$   
Wrapping Schemes:  ShapeFrp:  Continue  Strips Ultimate Resistance (MPa):   $f_{fu}$

**Shear Force and Rapture Mode**  
Failure Node:   
Total Shear Force (kN):   $V_u$  FRP Shear Force (kN):   $V_{fp}$

Add Update Delete Clear Display specimen list Close

Figure 20 Mise à jour des données pour un essai de section en Té avec un renfort composite collée en bandes

Après tout ajout ou modification d'un essai, des messages sont affichés pour informer l'utilisateur que la sauvegarde a été faite avec succès. Avant toute suppression d'essais, un message confirmation est affiché.

Comme il est difficile de se rappeler les codes des essais pour les afficher afin de les modifier, l'utilisateur dispose d'un bouton "Display Specimen list" qui permet d'afficher tous les essais disponibles dans un autre écran voir figure 21. Un seul essai peut être sélectionné à la fois et le transférer vers l'écran des mises à jour voir figure 22. Dans le cas où l'utilisateur a sélectionné plusieurs essais, un message d'erreur est affiché.

Strengthening in Shear with FRP Composites - Management and Analysis of Experimental Data - [Specimen list]

FRP\_S2DMS Help

You have 266 specimen(s)

	Date	Author	Specimen Code	L <sub>total</sub> (m)	L <sub>span</sub> (m)	Type	Loading Type	a (m)	h (mm)	b <sub>w</sub> (mm)	d (mm)	d <sub>r</sub> (mm)	Shape
<input type="checkbox"/>	1992	Berset	4-B	0.69	0.6	Continue	Static	0.3	102	114	85	85	Rectangular
<input checked="" type="checkbox"/>	1992	Uji	3-U	1.3	1	Simple	Static	0.43	200	100	170	170	Rectangular
<input type="checkbox"/>	1992	Uji	5-U	1.3	1	Continue	Static	0.43	200	100	170	170	Rectangular
<input type="checkbox"/>	1992	Uji	6-U	1.3	1	Continue	Static	0.43	200	100	170	170	Rectangular
<input type="checkbox"/>	1992	Uji	7-U	1.3	1	Continue	Static	0.43	200	100	170	170	Rectangular
<input type="checkbox"/>	1992	Berset	3-B	0.69	0.6	Continue	Static	0.3	102	114	85	85	Rectangular
<input type="checkbox"/>	1994	Al-Sulaimani et al.	WP	1.25	1.2	Continue	Static	0.4	150	150	113	113	Rectangular
<input type="checkbox"/>	1994	Al-Sulaimani et al.	WO	1.25	1.2	Continue	Static	0.4	150	150	113	113	Rectangular
<input type="checkbox"/>	1994	Al-Sulaimani et al.	SP	1.25	1.2	Continue	Static	0.4	150	150	113	113	Rectangular
<input type="checkbox"/>	1994	Al-Sulaimani et al.	SO	1.25	1.2	Continue	Static	0.4	150	150	113	113	Rectangular
<input type="checkbox"/>	1995	Chajes et al.	45G2	1.22	1.12	Simple	Static	0.41	190.5	63.5	152.4	89	T-Beam
<input type="checkbox"/>	1995	Chajes et al.	E1	1.22	1.12	Simple	Static	0.41	190.5	63.5	152.4	89	T-Beam
<input type="checkbox"/>	1995	Chajes et al.	E2	1.22	1.12	Simple	Static	0.41	190.5	63.5	152.4	89	T-Beam
<input type="checkbox"/>	1995	Chajes et al.	A2	1.22	1.12	Simple	Static	0.41	190.5	63.5	152.4	89	T-Beam
<input type="checkbox"/>	1995	Chajes et al.	G2	1.22	1.12	Simple	Static	0.41	190.5	63.5	152.4	89	T-Beam
<input type="checkbox"/>	1995	Chajes et al.	45G1	1.22	1.12	Simple	Static	0.41	190.5	63.5	152.4	89	T-Beam
<input type="checkbox"/>	1995	Chajes et al.	G1	1.22	1.12	Simple	Static	0.41	190.5	63.5	152.4	89	T-Beam
<input type="checkbox"/>	1995	Chajes et al.	A1	1.22	1.12	Simple	Static	0.41	190.5	63.5	152.4	89	T-Beam
<input type="checkbox"/>	1996	Sato et al.	S3	2.2	1.6	Simple	Static	0.7	300	200	260	260	Rectangular
<input type="checkbox"/>	1996	Sato et al.	S5	2.2	1.6	Continue	Static	0.7	300	200	260	260	Rectangular
<input type="checkbox"/>	1996	Sato et al.	S2	2.2	1.6	Simple	Static	0.7	300	200	260	260	Rectangular
<input type="checkbox"/>	1996	Sato et al.	S4	2.2	1.6	Continue	Static	0.7	300	200	260	260	Rectangular
<input type="checkbox"/>	1997	Umezu et al.	AB9	3.7	2.7	Simple	Static	1.2	450	450	399	399	Rectangular
<input type="checkbox"/>	1997	Umezu et al.	AB10	4.3	3.3	Simple	Static	1.5	550	550	499	499	Rectangular
<input type="checkbox"/>	1997	Araki et al.	CF-243	3.4	1.4	Simple	Static	N/A	400	200	352	352	Rectangular
<input type="checkbox"/>	1997	Umezu et al.	AB8	2.82	1.82	Simple	Static	0.76	300	600	253	253	Rectangular
<input type="checkbox"/>	1997	Umezu et al.	AB7	2.82	1.82	Simple	Static	0.76	300	300	253	253	Rectangular
<input type="checkbox"/>	1997	Umezu et al.	AB6	2.82	1.82	Simple	Static	0.76	300	300	253	253	Rectangular
<input type="checkbox"/>	1997	Funakawa et al.	S-2	5.06	3.55	Simple	Static	1.28	N/A	600	510	510	Rectangular
<input type="checkbox"/>	1997	Funakawa et al.	S-3	5.06	3.55	Simple	Static	1.28	N/A	600	510	510	Rectangular

Transfer Close

Figure 21 Affichage de la liste des essais existants.

Vu que les essais des poutres en béton armé renforcées en cisaillement avec des matériaux composite sont effectuées en série qui contient plusieurs spécimens avec les mêmes propriétés dans la plus part des cas, on a laissé les données d'un essai ajouté sur l'écran de la mise à jours pour d'autres ajouts. On peut à tout moment initialiser l'écran en utilisant le bouton "Clear". En fermant cet écran, on retourne au menu principal.

Strengthening in Shear with FRP Composites - Management and Analysis of Experimental Data - [Specimen update]

FRP\_S2QMS Help

Author: Uji Specimen Code: 3-U Date: 1992

Reference: Uji, K. (1992). Improving Shear Capacity of Existing Reinforced Concrete Members by Applying Carbon Fiber Sheets. Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 14, pp. 253-266.

Note: Please enter all the data and use N/A if not applicable. For the decimal symbol use '!'.

**Geometry of Beam**

Shear Length (m): 0.43  $a$  Type:  Simple  Continue

Span (m): 1  $L_{span}$

Total Beam Length (m): 1.3  $L_{total}$

Loading Type: Static

**Dimension of Section**

Section height (mm): 200  $h$  Effective FRP Depth (mm): 170  $d_f$

Web width (mm): 100  $b_w$  Effective Depth (mm): 170  $d$

Shape:  Rectangular  T-Beam

**Concrete**

Gross Aggregate Section (mm): 20  $A_g$

Compression Strength (MPa): 24.6  $f_c$

Test: N/A

**Longitudinal Steel**

Yield Stress Long. (MPa): 390  $f_{yt}$

Elastic Modulus Long. (GPa): N/A  $E_s$

Section Area Long. (mm<sup>2</sup>): 402  $A_s$

**Transversal Steel**

Yield Stress Trans. (MPa): N/A  $f_{yt}$

Elastic Modulus Trans. (GPa): N/A  $E_s$

Section Area Trans. (mm<sup>2</sup>): 0  $A_v$

Spacing Trans. (mm): 0  $s$

**Fibre Reinforced Polymer**

Strengthening system: External-Bonded Number of layers: 1  $n_f$  Thickness (mm): 0.097  $t_f$  Inclination of fibers: 90  $\theta$

Fibers Type: CFRP Elastic Modulus (GPa): 235  $E_f$

Wrapping Schemes: Total Wrap ShapeFrp:  Continue  Strips Ultimate Resistance (MPa): 2700  $f_{fu}$

**Shear Force and Rupture Mode**

Failure Mode: Fracture

Total Shear Force (kN): 58.4  $V_u$  FRP Shear Force (kN): 33.8  $V_{FRP}$

Add Update Delete Clear Display specimen list Close

Figure 22 Transfert de l'essai sélectionné.

A partir du menu principal (voir figure 18), quand on clique sur le bouton "Search & Analyse", l'écran des recherches est affiché. Celui-ci permet d'effectuer diverses recherches avec une combinaison de plusieurs critères à la fois (figure 23). Ces critères sont présentés sous forme des listes de sélection prédéfinies.

Pour une analyse très détaillée des données expérimentales, ces listes comportent les paramètres qui ont une influence majeure sur le comportement en cisaillement des poutres en béton armé renforcées à l'aide des matériaux composites. Les données recherchées sont placées dans la grille avec les entêtes appropriés à chaque donnée.

Dans le cas où l'utilisateur choisit le rapport  $a/d$  pour sa recherche, trois options sont offertes, pour la dernière option " $x < a/d < y$ " un message d'erreur est affiché si la valeur de  $x$  est supérieure à la valeur de  $y$ . Ceci permet de sélectionner, par exemple, des poutres de types élancée seulement, ou profondes.

Dans le même écran, on a placé d'autres boutons: "Display all" pour visualiser tous les essais disponibles, "Clear" pour initialiser l'écran afin de permettre une nouvelle recherche, "Export to Excel" pour la sauvegarde des résultats de la recherche qui se trouvent dans la grille. Si la grille est vide, un message d'erreur est affiché pour annuler l'exportation des données. Un message de confirmation est présenté à la fin du processus de l'exportation ainsi que le changement de la souris à un sablier pour indiquer le temps d'attente. Celui-ci dépend du nombre d'essais à sauvegarder.

Dans la même grille, on a placé la contribution du composite telle que prédite par, l'ACI 440.2R-02, le CSA S806-02 et le *fib* TG9.3, ainsi que par les modèles de calcul proposés.

Le nombre d'essais trouvés qui répondent aux critères de recherche ainsi que le pourcentage par rapport au nombre total des essais disponibles dans la base de données sont affichés en bas de l'écran (voir figure 23).

Strengthening in Shear with FRP Composites - Management and Analysis of Experimental Data - [Search...]

FRP\_SZQMS Help

**Search options**

Wrapping Schemes: Sides Type of beam: Simple Compression Strength (MPa): f<sub>c</sub>

Shape Frp: Shape: Rectangul Area Trans. Steel: A<sub>s</sub>

Strengthening System: External-Bonded Loading Type: Static Effective Depth (mm): d

Failure Mode: Debonding a/d: X <= a/d <= Y X: 1.5 Y: 4

Display all  
Search  
Clear

Date	Author	Specimen Code	L <sub>total</sub> (m)	L <sub>span</sub> (m)	Type	Loading Type	a (m)	b (mm)	b <sub>r</sub> (mm)	d (mm)	d <sub>r</sub> (mm)	Shape	b <sub>v</sub> (mm)
1996	Sato et al.	S2	2.2	1.6	Simple	Static	0.7	300	200	260	260	Rectangular	N/A
1998	Triantafillou	S3(45)	1	0.8	Simple	Static	0.32	110	70	100	100	Rectangular	N/A
1998	Triantafillou	S1a	1	0.8	Simple	Static	0.32	110	70	100	100	Rectangular	N/A
1998	Triantafillou	S1b	1	0.8	Simple	Static	0.32	110	70	100	100	Rectangular	N/A
1998	Triantafillou	S1(45)	1	0.8	Simple	Static	0.32	110	70	100	100	Rectangular	N/A
1998	Triantafillou	S2a	1	0.8	Simple	Static	0.32	110	70	100	100	Rectangular	N/A
1998	Triantafillou	S2b	1	0.8	Simple	Static	0.32	110	70	100	100	Rectangular	N/A
1998	Triantafillou	S2(45)	1	0.8	Simple	Static	0.32	110	70	100	100	Rectangular	N/A
1998	Triantafillou	S3b	1	0.8	Simple	Static	0.32	110	70	100	100	Rectangular	N/A
1998	Triantafillou	S3a	1	0.8	Simple	Static	0.32	110	70	100	100	Rectangular	N/A
1998-a	Chaallal et al.	RS90-1	1.3	1.2	Simple	Static	0.6	250	150	220	220	Rectangular	N/A
1998-a	Chaallal et al.	RS90-2	1.3	1.2	Simple	Static	0.6	250	150	220	220	Rectangular	N/A
1998-a	Chaallal et al.	RS135-1	1.3	1.2	Simple	Static	0.6	250	150	220	220	Rectangular	N/A
1998-a	Chaallal et al.	RS135-2	1.3	1.2	Simple	Static	0.6	250	150	220	220	Rectangular	N/A
2002	Pellegrino	TR30C2	2.7	2	Simple	Static	0.75	300	150	250	250	Rectangular	N/A
2002	Pellegrino	TR30C4	2.7	2	Simple	Static	0.75	300	150	250	250	Rectangular	N/A
2002	Pellegrino	TR30C3	2.7	2	Simple	Static	0.75	300	150	250	250	Rectangular	N/A
2003	Hsu et al.	Z4-90	1.22	1.07	Simple	Static	0.53	228.6	152.4	165.1	165.1	Rectangular	N/A

Graph Options Export to Excel Close

25 specimen(s) found, present 9 % of the available tests.

Figure 23 Recherches multicritères

Dans le fichier de sauvegarde des données, on a mis le nom du programme, la date de la recherche, les critères de recherche et les essais trouvés. Pour les options de recherche non utilisés, la note "Not Specified" est écrite dans les cases de ces critères (voir figure 24).

Microsoft Excel - FRP\_S2DMS\_Specimens\_2007\_10\_01\_11\_2.xls

File Edit View Insert Format Tools Data Window Help

K4

Strengthening in Shear with FRP

Date: 10/1/2007

Search Options		Values
Wrapping Schemes:	Sides	
Shape Frp:	Strips	
Strengthening System:	External-Bonded	
Failure Mode:	Debonding	
Type of beam:	Not Specified	
Shape:	Rectangular	
Loading Type:	Static	
Compression Strength (MPa):	Not Specified	
Area Transversal Steel (mm <sup>2</sup> ):	Not Specified	
Effective Depth (mm):	Not Specified	
a/d:	<=1.5 And <= 4	

No.	Researcher	Year	Test Specimen Code	Beam						a/d	Fibres Type	Concrete resistance			
				Shape	L <sub>100</sub> (m)	L <sub>200</sub> (m)	a (m)	Type	Loading Type			f <sub>c</sub> (MPa)	Test	Ag (mm)	h (mm)
1	Al-Sulaimani et al.	1994	SP	Rectangular	1.25	1.20	0.40	Continuous	Static	3.5	E-Glass	37.7	Cylinder	N/A	150.
2	Al-Sulaimani et al.	1994	S0	Rectangular	1.25	1.20	0.40	Continuous	Static	3.5	E-Glass	37.7	Cylinder	N/A	150.
3	Sato et al.	1996	S2	Rectangular	2.20	1.60	0.70	Simple	Static	2.7	CFRP	45.2	N/A	N/A	300.
4	Triantafilou .	1998	S2b	Rectangular	1.00	0.80	0.32	Simple	Static	3.2	CFRP	30	Cylinder	10	110.
5	Triantafilou .	1998	S1a	Rectangular	1.00	0.80	0.32	Simple	Static	3.2	CFRP	30	Cylinder	10	110.
6	Triantafilou .	1998	S1b	Rectangular	1.00	0.80	0.32	Simple	Static	3.2	CFRP	30	Cylinder	10	110.
7	Triantafilou .	1998	S2a	Rectangular	1.00	0.80	0.32	Simple	Static	3.2	CFRP	30	Cylinder	10	110.
8	Triantafilou .	1998	S2(45)	Rectangular	1.00	0.80	0.32	Simple	Static	3.2	CFRP	30	Cylinder	10	110.
9	Triantafilou .	1998	S3a	Rectangular	1.00	0.80	0.32	Simple	Static	3.2	CFRP	30	Cylinder	10	110.
10	Triantafilou .	1998	S3b	Rectangular	1.00	0.80	0.32	Simple	Static	3.2	CFRP	30	Cylinder	10	110.
11	Triantafilou .	1998	S3(45)	Rectangular	1.00	0.80	0.32	Simple	Static	3.2	CFRP	30	Cylinder	10	110.
12	Triantafilou .	1998	S1(45)	Rectangular	1.00	0.80	0.32	Simple	Static	3.2	CFRP	30	Cylinder	10	110.
13	Chaallal et al.	1998-a	RS135-2	Rectangular	1.30	1.20	0.60	Simple	Static	2.7	CFRP	35	N/A	N/A	250.
14	Chaallal et al.	1998-a	RS135-1	Rectangular	1.30	1.20	0.60	Simple	Static	2.7	CFRP	35	N/A	N/A	250.

Ready CAPS

Figure 24 Fichiers Excel pour la sauvegarde des données expérimentales recherchées/sélectionnées

Une fois les résultats de la recherche affichés dans la grille, le bouton "Graph Options" devient visible sur l'écran de la recherche (voir figure 23) et différents choix pour l'analyse graphique sont alors affichés. Trois parties distinctes sont disponibles pour le

choix: des séries, des données à présenter sur l'axe des abscisses et des données à présenter sur l'axe des ordonnées (voir figure 25).

Pour le choix des séries, le programme donne la possibilité de choisir entre le mode de rupture et la configuration, et ceci par la liste de sélection respective. Plusieurs combinaisons peuvent être faites pour le dessin des graphes.

Dans le cas où l'option " $V_{frp-prédite}$ " est sélectionnée pour être représentée sur l'axe des y, la partie qui présente les normes et les modèles, est activée, on doit alors choisir une option de cette partie pour faire l'analyse graphique; dans le cas contraire un message d'erreur est affiché.

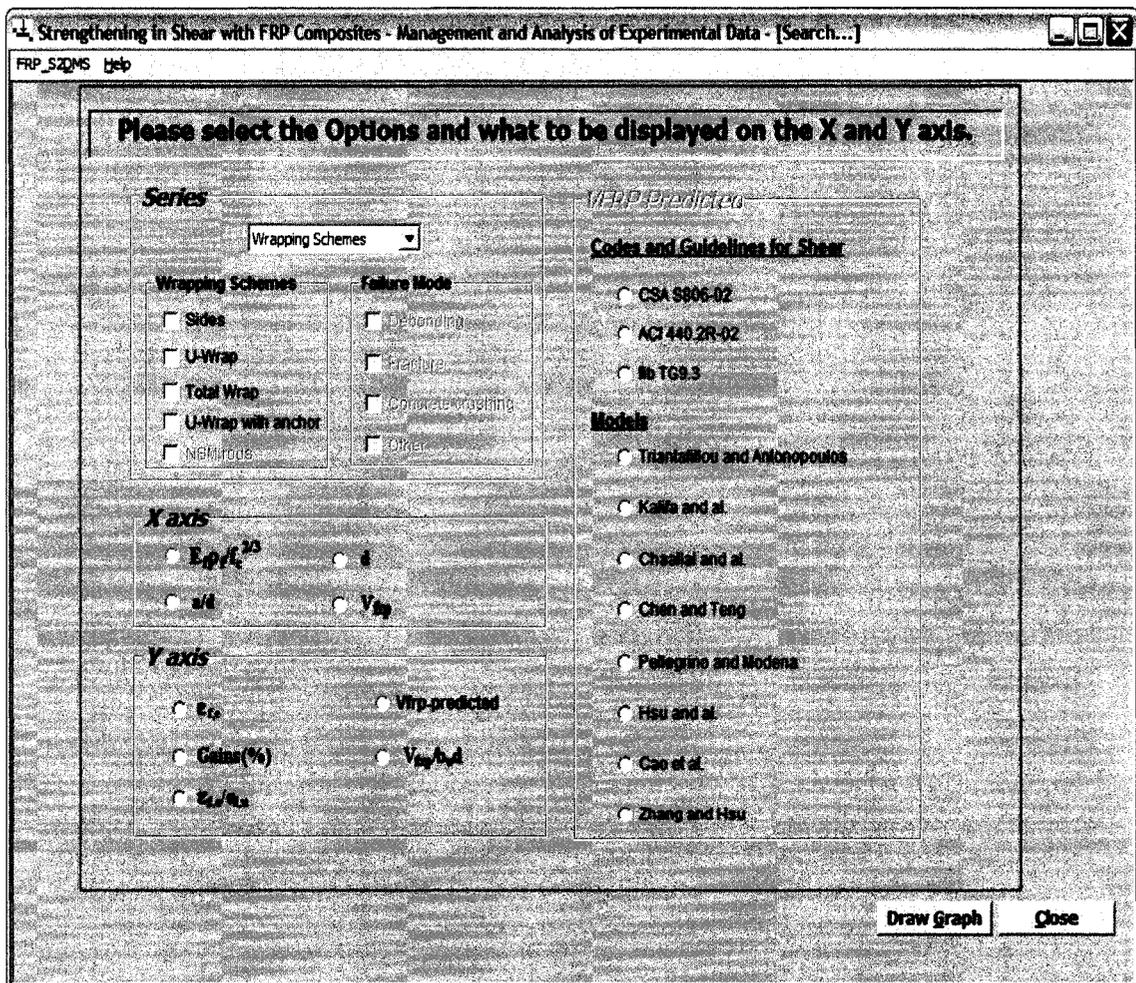


Figure 25 Options pour l'analyse graphique

Une fois les options de l'analyse graphique choisies, l'option dessin du graphe affiche la courbe qui répond aux options choisies auparavant (voir figure 26).

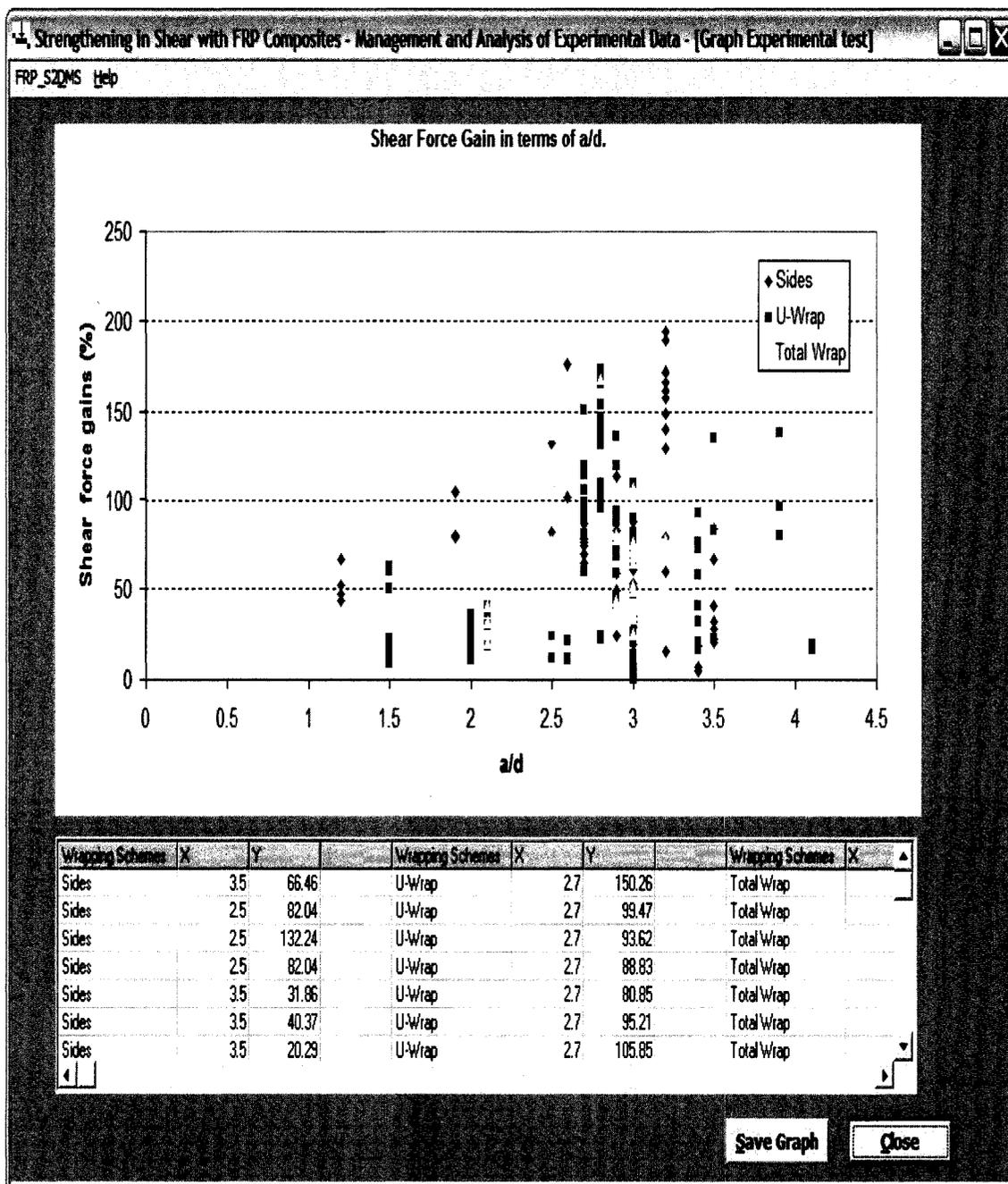


Figure 26 Résultat de l'analyse graphique

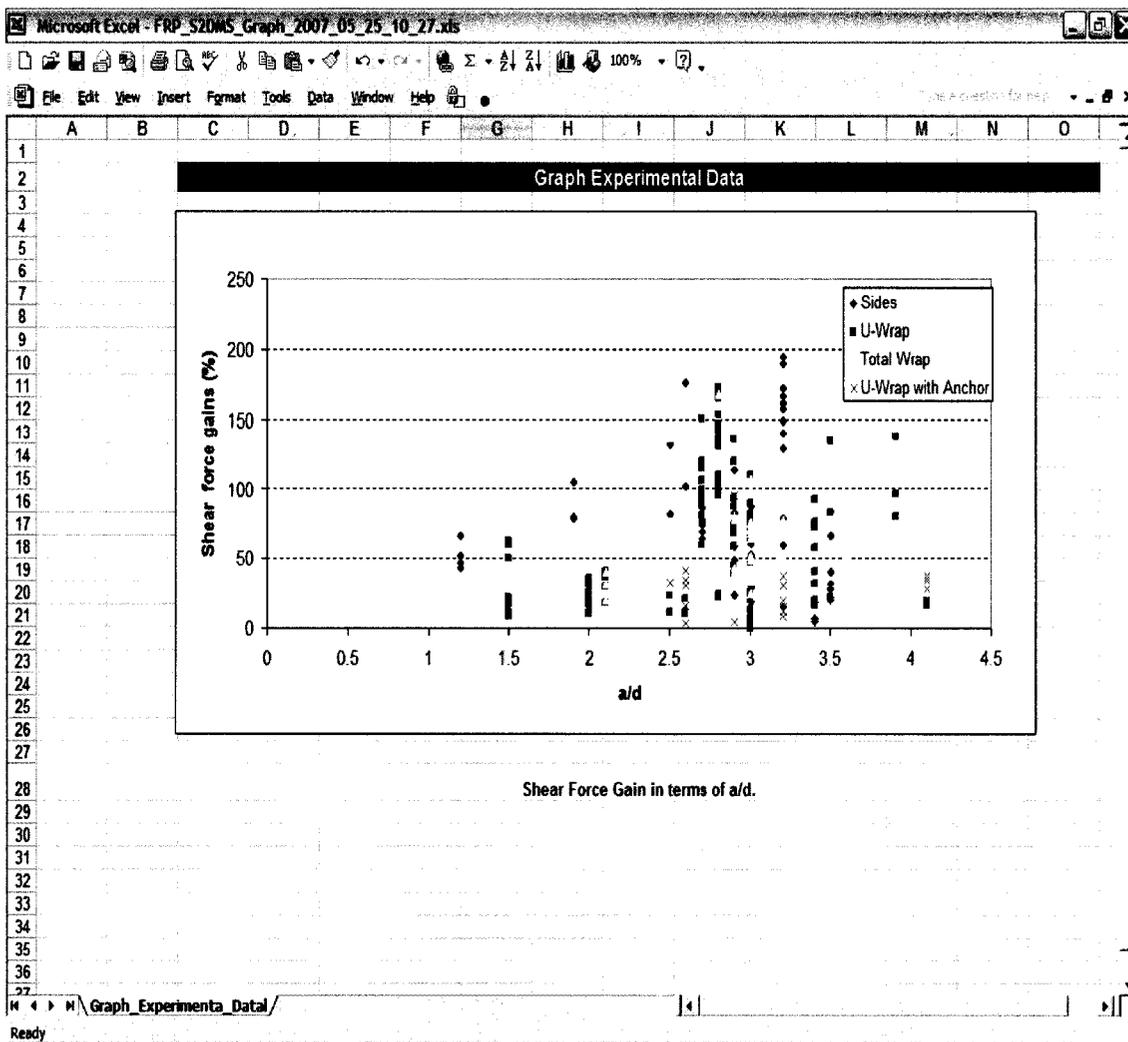


Figure 27 Fichier Excel pour la sauvegarde du graphe

L'outil offre la possibilité de sauvegarder le graphe dans un fichier Excel (voir figure 27), on a également mis les données qui ont servi à la réalisation de cette courbe dans une grille.

En appuyant sur le bouton "Close", on retourne à l'écran des options d'analyses graphiques.

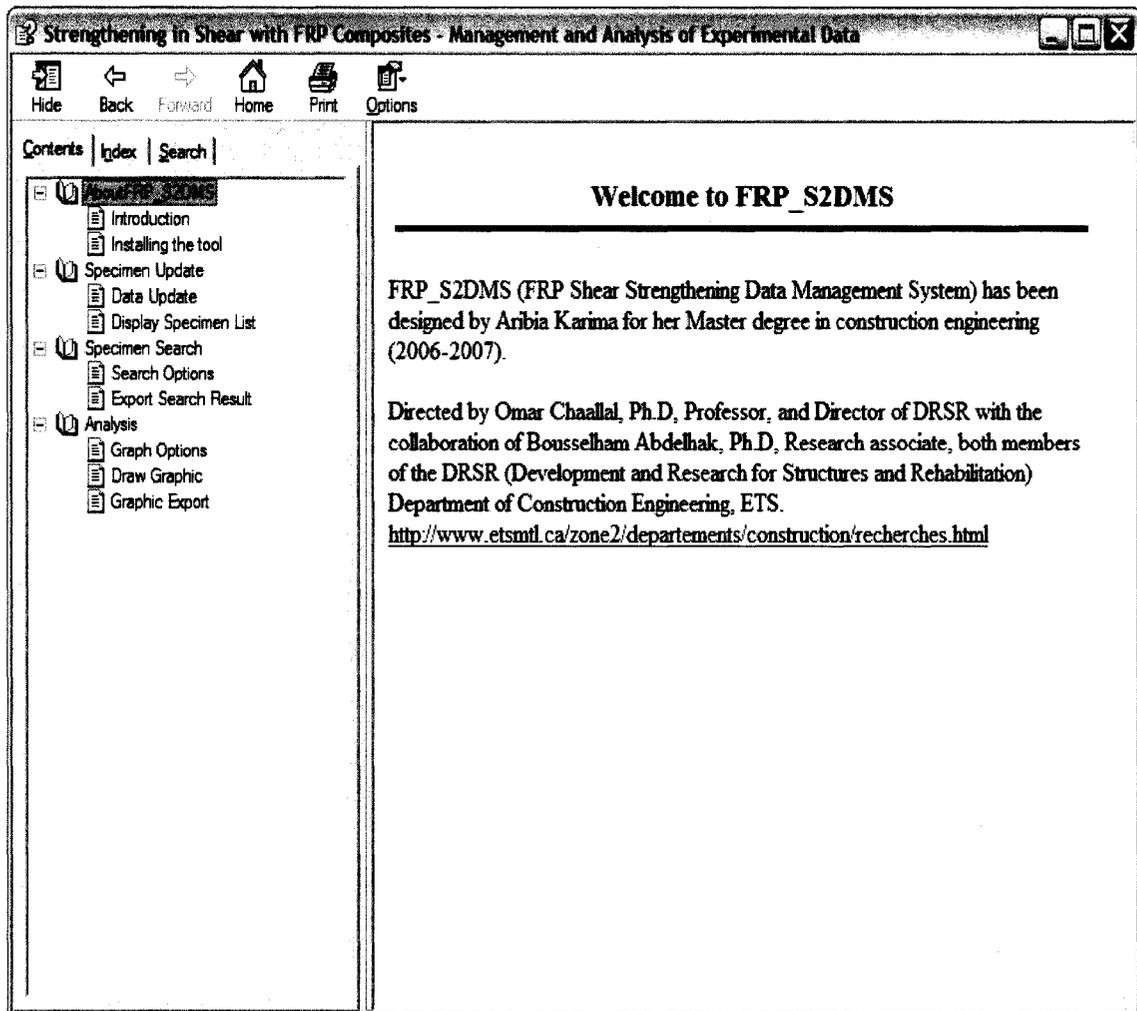


Figure 28 Fichier d'aide

Un fichier d'aide est inclus dans le logiciel et sera activé par la touche F1 ou à partir du menu Help (voir figure 28).

L'outil est développé en version anglaise, pour permettre à un grand nombre de chercheurs d'exploiter ces différentes fonctions.

## CONCLUSION

L'objectif de la présente étude est de développer un outil informatique pour la gestion et l'exploitation des données expérimentales concernant le renforcement en cisaillement à l'aide de MCA.

Pour atteindre cet objectif, la présente étude englobe deux grands volets. Le premier comporte une étude bibliographique sur les recherches expérimentales concernant le comportement des poutres en béton armé (BA) renforcées en cisaillement à l'aide des matériaux composites avancés (MCA) et la présentation de la base de données élaborée par le laboratoire DRSR. Le second est consacré à la conception et le fonctionnement de l'outil informatique développé dans le cadre de la présente étude.

Après une quinzaine d'années d'utilisation des matériaux composites pour le renforcement en cisaillement des structures en béton armé, cette technique est devenue un champ de recherches très important vu les avantages appréciable qu'elle offre du point de vue économique, environnemental et structurel. Plusieurs investigations expérimentales entreprises dans cet axe ont abouti à des conclusions intéressantes, particulièrement, en ce qui concerne les propriétés de ces matériaux composites (Triantafillou et Antonopoulos 2000, Khalifa et coll. 1999, Chen et Teng, 2004). Néanmoins, plusieurs points restent encore à être élucidés. Parmi ces points, on peut citer les paramètres majeurs du mécanisme de résistance au cisaillement comme l'effet du rapport de la longueur de cisaillement sur la hauteur utile de la section, l'effet de l'armature transversale et longitudinale et l'effet d'échelle.

Cependant, l'expansion mondiale de cette technique dépend considérablement de l'information obtenue sur le comportement des structures renforcées et les nouveaux modes de rupture développés dans ces structures.

D'autres travaux expérimentaux doivent être orientés vers ce champ de recherche très complexe, afin d'aider les chercheurs à améliorer les prescriptions réglementaires en vigueur et les rendre encore plus sécuritaires et plus économiques.

La présente étude, consacrée en grande partie au développement de l'outil de gestion et d'exploitation des données expérimentales, se veut un appui aux travaux de ces chercheurs.

Effectivement, l'outil développé dans le cadre de cette étude offre une gestion efficace et une exploitation poussée des données expérimentales de la base de données élaborée par l'équipe du laboratoire DRSR.

Spécifiquement, cet outil permet:

- La mise à jour des données expérimentales (ajout, modification et suppression);
- La possibilité d'effectuer des recherches multicritères avec la possibilité de sauvegarder les résultats des recherches dans un fichier MS Excel;
- La possibilité de représenter graphiquement des paramètres d'influence ainsi que des données expérimentales par rapport aux prédictions théoriques.

C'est un outil très utile pour l'analyse des différents résultats des tests existants et la comparaison aux prédictions théoriques fournies par les normes et autres modèles de calcul. Par ailleurs, une bonne interprétation des différents graphes réalisés à l'aide de l'outil permet de distinguer avec certitudes les paramètres majeurs qui influencent la résistance en cisaillement des poutres en béton armé renforcées à l'aide des matériaux composites.

Ceci étant dit, les mises à jour pour les versions futures de cet outil peuvent être résumées comme suit:

- Inclure d'autres normes et modèles pertinents pour élargir l'analyse des données expérimentales;

- Ajouter dans la base de données, les essais effectués sur des spécimens en béton précontraint;
- Ajouter dans la base de données, les essais de fatigue;
- Ajouter d'autres paramètres pour l'analyse graphique des données expérimentales;
- Joindre une deuxième partie au programme, celle-ci sera consacrée au renforcement en flexion.

**ANNEXE 1**

**DONNÉES EXPÉRIMENTALES CONCERNANT LE RENFORCEMENT EN  
CISAILLEMENT**

## Données expérimentales rapportées dans la littérature sur le renforcement en cisaillement à l'aide de FRP

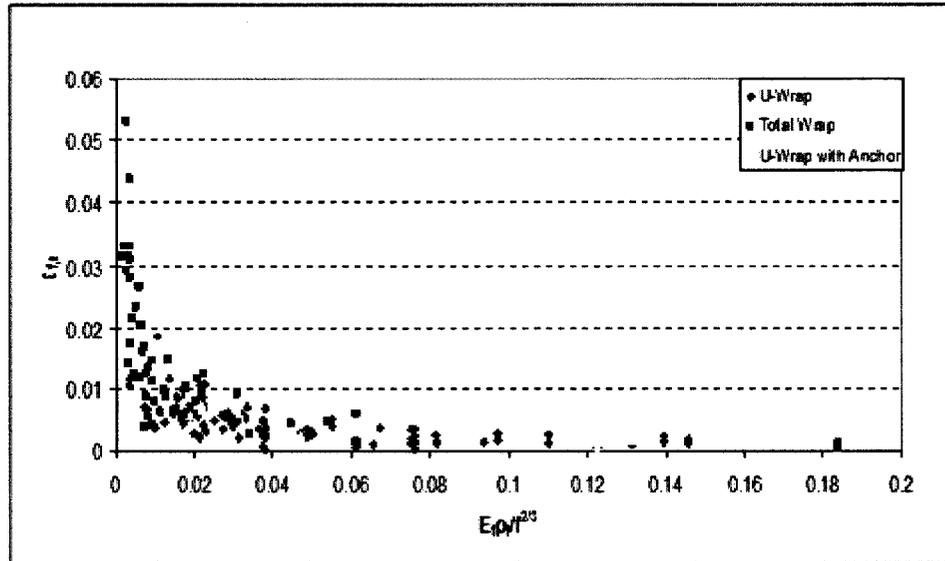
Une partie des données expérimentales collectées par le laboratoire DRSR.

No.	Rechercheur	Test Specimen Designation	Beam				s/d	FRP Type	Concrete resistance		
			Shape	$L_{total}$ (m)	$L_{FLYUP}$ (m)	s (m)			$f_c$ (MPa)	Test	$A_g$ (mm <sup>2</sup> )
1	Berset	3	Rectangular	0.69	0.60	0.30	3.5	GFRP	42.9	Cylinder	10
2	Berset	4	Rectangular	0.69	0.60	0.30	3.5	GFRP	42.9	Cylinder	10
3	Uji	3	Rectangular	1.30	1.00	0.43	2.5	CFRP	24.6	?	20
4	Uji	5	Rectangular	1.30	1.00	0.43	2.5	CFRP	24.6	?	20
5	Uji	6	Rectangular	1.30	1.00	0.43	2.5	CFRP	27.4	?	20
6	Uji	7	Rectangular	1.30	1.00	0.43	2.5	CFRP	27.4	?	20
7	Al-Subhani et al.	SO	Rectangular	1.25	1.20	0.40	3.5	GFRP	37.7	Cylinder	?
8	Al-Subhani et al.	SP	Rectangular	1.25	1.20	0.40	3.5	GFRP	37.7	Cylinder	?
9	Al-Subhani et al.	WO	Rectangular	1.25	1.20	0.40	3.5	GFRP	37.7	Cylinder	?
10	Al-Subhani et al.	WP	Rectangular	1.25	1.20	0.40	3.5	GFRP	37.7	Cylinder	?
11	Chajes et al.	A1	T-Beam	1.22	1.12	0.41	2.7	AFRP	45.5	Cylinder	9.5
12	Chajes et al.	A2	T-Beam	1.22	1.12	0.41	2.7	AFRP	48.3	Cylinder	9.5
13	Chajes et al.	E1	T-Beam	1.22	1.12	0.41	2.7	E-Glass	41.8	Cylinder	9.5
14	Chajes et al.	E2	T-Beam	1.22	1.12	0.41	2.7	E-Glass	48.3	Cylinder	9.5
15	Chajes et al.	G1	T-Beam	1.22	1.12	0.41	2.7	CFRP	43.9	Cylinder	9.5
16	Chajes et al.	G2	T-Beam	1.22	1.12	0.41	2.7	CFRP	47.1	Cylinder	9.5
17	Chajes et al.	45G1	T-Beam	1.22	1.12	0.41	2.7	CFRP	47.1	Cylinder	9.5
18	Chajes et al.	45G2	T-Beam	1.22	1.12	0.41	2.7	CFRP	41.8	Cylinder	9.5
19	Sato et al.	S2	Rectangular	2.20	1.60	0.70	2.7	CFRP	45.2	?	?
20	Sato et al.	S3	Rectangular	2.20	1.60	0.70	2.7	CFRP	41.3	?	?
21	Sato et al.	S4	Rectangular	2.20	1.60	0.70	2.7	CFRP	37.5	?	?
22	Sato et al.	S5	Rectangular	2.20	1.60	0.70	2.7	CFRP	39.7	?	?
23	Miyachi et al.	AN-1	Rectangular	-	1.40	0.50	3.0	CFRP	35.1	?	?
24	Miyachi et al.	AN-2	Rectangular	-	1.40	0.50	3.0	CFRP	32.4	?	?
25	Miyachi et al.	AS-2	Rectangular	-	1.40	0.45	2.7	CFRP	35.0	?	?
26	Miyachi et al.	ON-1	Rectangular	-	1.40	0.33	2.0	CFRP	39.1	?	?
27	Taerwe et al.	BS2	Rectangular	4.00	3.80	1.25	3.0	CFRP	35.1	?	?
28	Taerwe et al.	BS5	Rectangular	4.00	3.80	1.25	3.0	CFRP	36.8	?	?
29	Taerwe et al.	BS6	Rectangular	4.00	3.80	1.25	3.0	CFRP	35.8	?	?
30	Taerwe et al.	BS7	Rectangular	4.00	3.80	1.25	3.0	CFRP	34.7	?	?
31	Sato et al.	2	T-Beam	2.00	1.40	0.60	2.5	CFRP	35.7	?	?
32	Sato et al.	3	T-Beam	2.00	1.40	0.60	2.5	CFRP	35.3	?	?
33	Umezaki et al.	AS1	Rectangular	2.90	1.90	0.80	2.9	AFRP	43.0	?	?
34	Umezaki et al.	AS2	Rectangular	2.90	1.90	0.80	2.9	AFRP	43.0	?	?
35	Umezaki et al.	AS3	Rectangular	2.90	1.90	0.80	2.9	AFRP	44.8	?	?
36	Umezaki et al.	CS1	Rectangular	2.82	1.82	0.76	3.0	CFRP	40.5	?	?
37	Umezaki et al.	CS2	Rectangular	2.82	1.82	0.76	3.0	CFRP	40.5	?	?
38	Umezaki et al.	CS3	Rectangular	2.90	1.90	0.80	2.9	CFRP	44.8	?	?
39	Umezaki et al.	AB1	Rectangular	2.82	1.82	0.76	3.0	AFRP	41.9	?	?
40	Umezaki et al.	AB2	Rectangular	2.82	1.82	0.76	3.0	AFRP	45.6	?	?
41	Umezaki et al.	AB3	Rectangular	2.82	1.82	0.76	3.0	AFRP	41.9	?	?
42	Umezaki et al.	AB4	Rectangular	2.82	1.82	0.76	3.0	AFRP	41.9	?	?
43	Umezaki et al.	AB5	Rectangular	2.82	1.82	0.76	3.0	AFRP	42.7	?	?
44	Umezaki et al.	AB6	Rectangular	2.82	1.82	0.76	3.0	AFRP	43.1	?	?
45	Umezaki et al.	AB7	Rectangular	2.82	1.82	0.76	3.0	AFRP	43.5	?	?
46	Umezaki et al.	AB8	Rectangular	2.82	1.82	0.76	3.0	AFRP	43.5	?	?
47	Umezaki et al.	AB9	Rectangular	3.70	2.70	1.20	3.0	AFRP	39.9	?	?
48	Umezaki et al.	AB10	Rectangular	4.30	3.30	1.50	3.0	AFRP	39.9	?	?
49	Umezaki et al.	AB11	Rectangular	4.30	3.30	1.50	3.0	AFRP	40.6	?	?
50	Funakawa et al.	S-2	Rectangular	5.06	3.55	1.28	2.5	CFRP	27.0	?	?

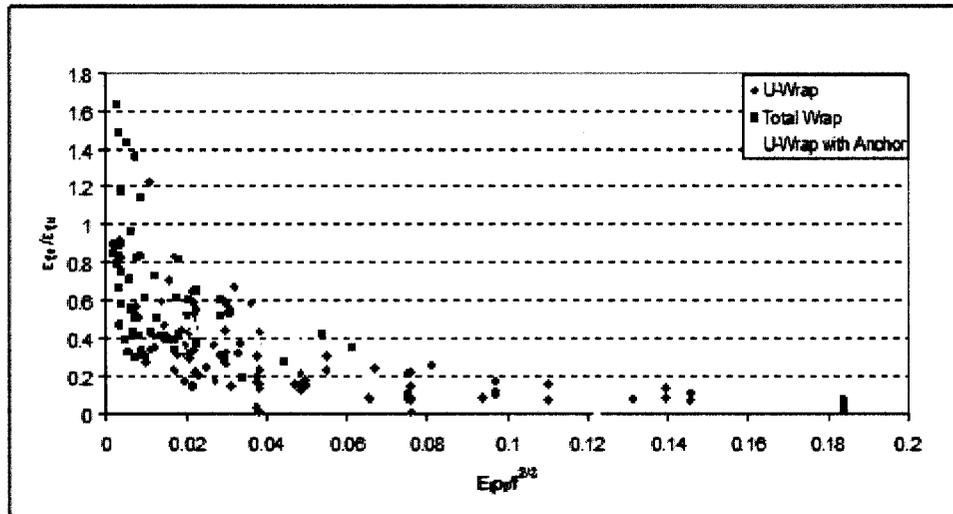
51	Funakawa et al	S-3	Rectangular	5.06	3.55	1.28	2.5	CFRP	27.0	?	?
52	Funakawa et al	S-4	Rectangular	5.06	3.55	1.28	2.5	CFRP	27.0	?	?
53	Asaki et al	CF-045	Rectangular	3.40	1.40	-	1.5	CFRP	24.8	?	?
54	Asaki et al	CF-064	Rectangular	3.40	1.40	-	1.5	CFRP	24.9	?	?
55	Asaki et al	CF-097	Rectangular	3.40	1.40	-	1.5	CFRP	25.2	?	?
56	Asaki et al	CF-131	Rectangular	3.40	1.40	-	1.5	CFRP	25.4	?	?
57	Asaki et al	CF-243	Rectangular	3.40	1.40	-	1.5	CFRP	25.6	?	?
58	Asaki et al	AF-060	Rectangular	3.40	1.40	-	1.5	AFRP	25.8	?	?
59	Asaki et al	AF-090	Rectangular	3.40	1.40	-	1.5	AFRP	25.9	?	?
60	Asaki et al	AF-120	Rectangular	3.40	1.40	-	1.5	AFRP	26.1	?	?
61	Kamiharako et al	2	Rectangular	3.00	2.00	1.00	2.5	CFRP	32.6	?	?
62	Kamiharako et al	3	Rectangular	3.00	2.00	1.00	2.5	AFRP	32.6	?	?
63	Kamiharako et al	7	Rectangular	3.00	2.00	1.00	1.7	CFRP	34.6	?	?
64	Kamiharako et al	8	Rectangular	3.00	2.00	1.00	1.7	AFRP	34.6	?	?
65	Talsten	S4	Rectangular	4.50	4.00	1.20	2.6	CFRP	48.5	?	?
66	Talsten	SR1	Rectangular	4.50	4.00	1.60	3.5	CFRP	53.8	?	?
67	Talsten	SR2	Rectangular	4.50	4.00	1.20	2.6	CFRP	52.7	?	?
68	Chaabi et al	RS90-1	Rectangular	1.30	1.20	0.60	2.5	CFRP	35.0	?	?
69	Chaabi et al	RS90-2	Rectangular	1.30	1.20	0.60	2.5	CFRP	35.0	?	?
70	Chaabi et al	RS135-1	Rectangular	1.30	1.20	0.60	2.5	CFRP	35.0	?	?
71	Chaabi et al	RS135-2	Rectangular	1.30	1.20	0.60	2.5	CFRP	35.0	?	?
72	Mitau et al	A	Rectangular	1.80	1.00	0.50	1.1	CFRP	28.5	?	?
73	Mitau et al	B	Rectangular	1.80	1.00	0.50	1.1	CFRP	28.5	?	?
74	Mitau et al	C	Rectangular	1.80	1.00	0.50	1.1	CFRP	28.5	?	?
75	Mitau et al	D	Rectangular	2.40	1.40	0.70	1.6	CFRP	28.5	?	?
76	Mitau et al	E	Rectangular	2.40	1.40	0.70	1.6	CFRP	28.5	?	?
77	Mitau et al	F	Rectangular	2.40	1.40	0.70	1.6	CFRP	28.5	?	?
78	Triantafibu	S1a	Rectangular	1.00	0.80	0.32	3.2	CFRP	30.0	Cylinder	10
79	Triantafibu	S1b	Rectangular	1.00	0.80	0.32	3.2	CFRP	30.0	Cylinder	10
80	Triantafibu	S1(45)	Rectangular	1.00	0.80	0.32	3.2	CFRP	30.0	Cylinder	10
81	Triantafibu	S2a	Rectangular	1.00	0.80	0.32	3.2	CFRP	30.0	Cylinder	10
82	Triantafibu	S2b	Rectangular	1.00	0.80	0.32	3.2	CFRP	30.0	Cylinder	10
83	Triantafibu	S2(45)	Rectangular	1.00	0.80	0.32	3.2	CFRP	30.0	Cylinder	10
84	Triantafibu	S3a	Rectangular	1.00	0.80	0.32	3.2	CFRP	30.0	Cylinder	10
85	Triantafibu	S3b	Rectangular	1.00	0.80	0.32	3.2	CFRP	30.0	Cylinder	10
86	Triantafibu	S3(45)	Rectangular	1.00	0.80	0.32	3.2	CFRP	30.0	Cylinder	10
87	Khalifa et al	CW2	Rectangular	4.88	1.98	0.92	3.6	CFRP	27.5	?	?
88	Khalifa et al	CO2	Rectangular	4.88	1.98	0.92	3.6	CFRP	20.5	?	?
89	Khalifa et al	CO3	Rectangular	4.88	1.98	0.92	3.6	CFRP	20.5	?	?
90	Khalifa et al	C-BT2	T-Beam	3.05	2.34	1.07	3.0	CFRP	35.0	?	?
91	Khalifa et al	C-BT3	T-Beam	3.05	2.34	1.07	3.0	CFRP	35.0	?	?
92	Khalifa et al	C-BT4	T-Beam	3.05	2.34	1.07	3.0	CFRP	35.0	?	?
93	Khalifa et al	C-BT5	T-Beam	3.05	2.34	1.07	3.0	CFRP	35.0	?	?
94	Khalifa et al	C-BT6	T-Beam	3.05	2.34	1.07	3.0	CFRP	35.0	?	?
95	Khalifa et al	A-SW3-2	Rectangular	3.05	1.83	0.76	3.0	CFRP	19.3	?	?
96	Khalifa et al	A-SW4-2	Rectangular	3.05	2.24	1.02	4.0	CFRP	19.3	?	?
97	Khalifa et al	A-SO3-2	Rectangular	3.05	1.83	0.76	3.0	CFRP	27.5	?	?
98	Khalifa et al	A-SO3-3	Rectangular	3.05	1.83	0.76	3.0	CFRP	27.5	?	?
99	Khalifa et al	A-SO3-4	Rectangular	3.05	1.83	0.76	3.0	CFRP	27.5	?	?
100	Khalifa et al	A-SO3-5	Rectangular	3.05	1.83	0.76	3.0	CFRP	27.5	?	?
101	Khalifa et al	A-SO4-2	Rectangular	3.05	2.24	1.02	4.0	CFRP	27.5	?	?
102	Khalifa et al	A-SO4-3	Rectangular	3.05	2.24	1.02	4.0	CFRP	27.5	?	?
103	Khalifa et al	A2	T-Beam	3.05	2.34	1.08	3.0	CFRP	32.0	?	?
104	Khalifa et al	A3	T-Beam	3.05	2.34	1.08	3.0	CFRP	32.0	?	?
105	Khalifa et al	A4	T-Beam	3.05	2.34	1.08	3.0	CFRP	32.0	?	?
106	Khalifa et al	A5	T-Beam	3.05	2.34	1.08	3.0	CFRP	32.0	?	?

## **ANNEXE 2**

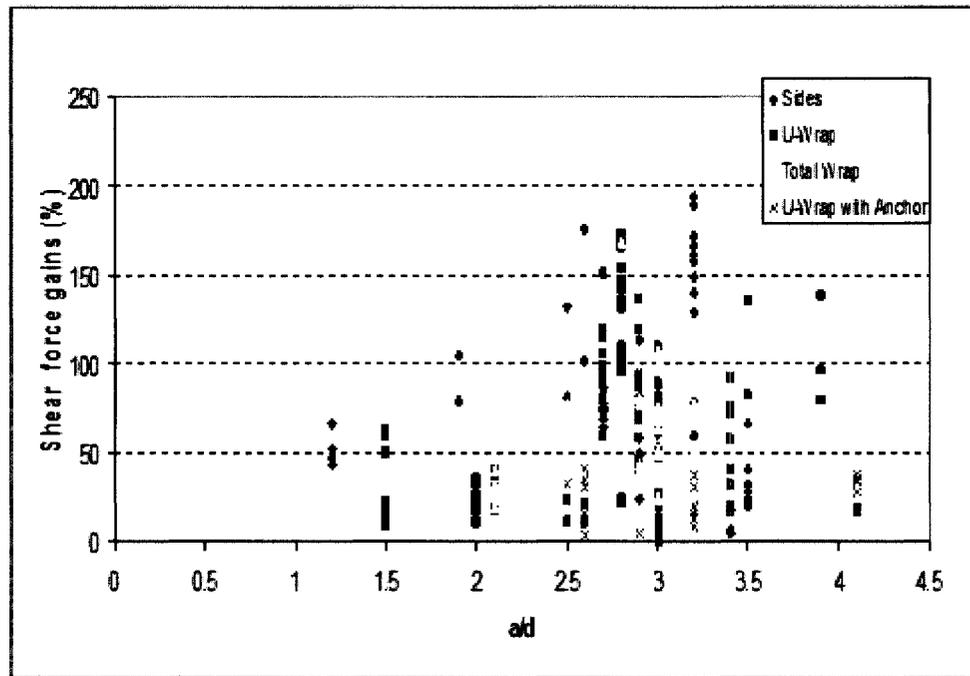
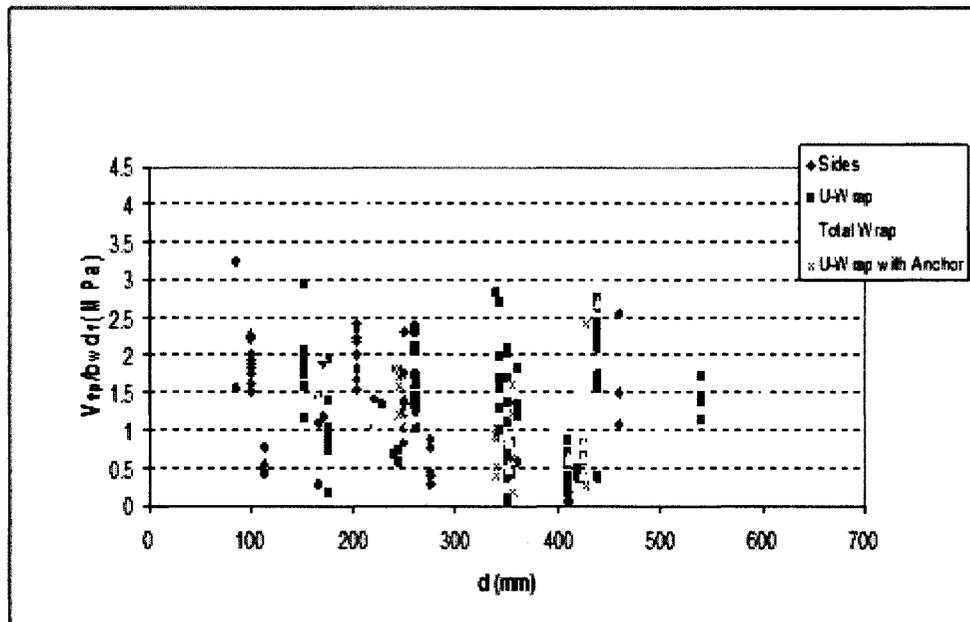
### **EXEMPLES DE GRAPHERS RÉALISÉS PAR L'OUTIL FRP-S2DMS**

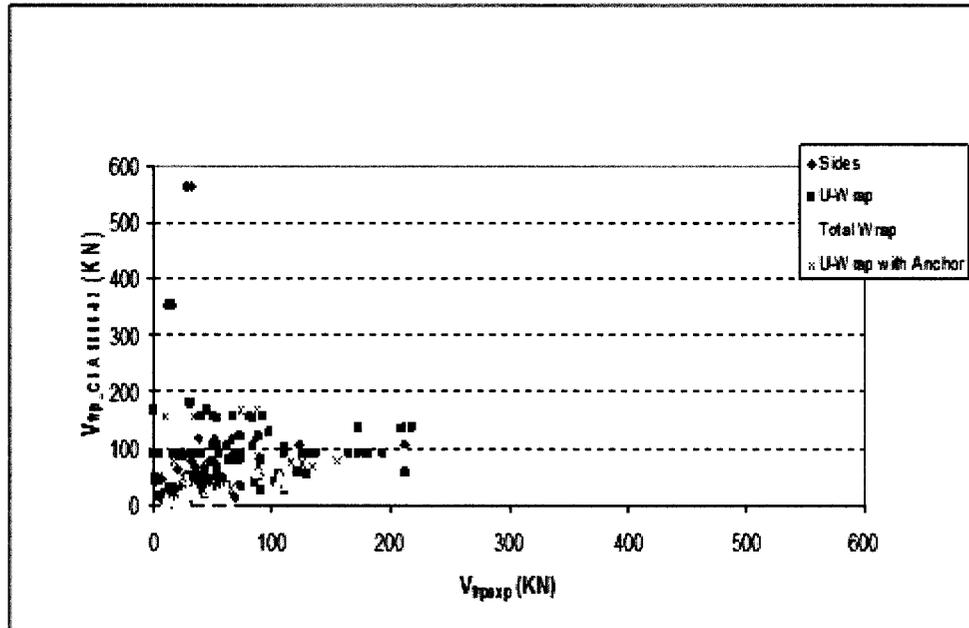


Effective strain of FRP in term of rigidity of FRP.

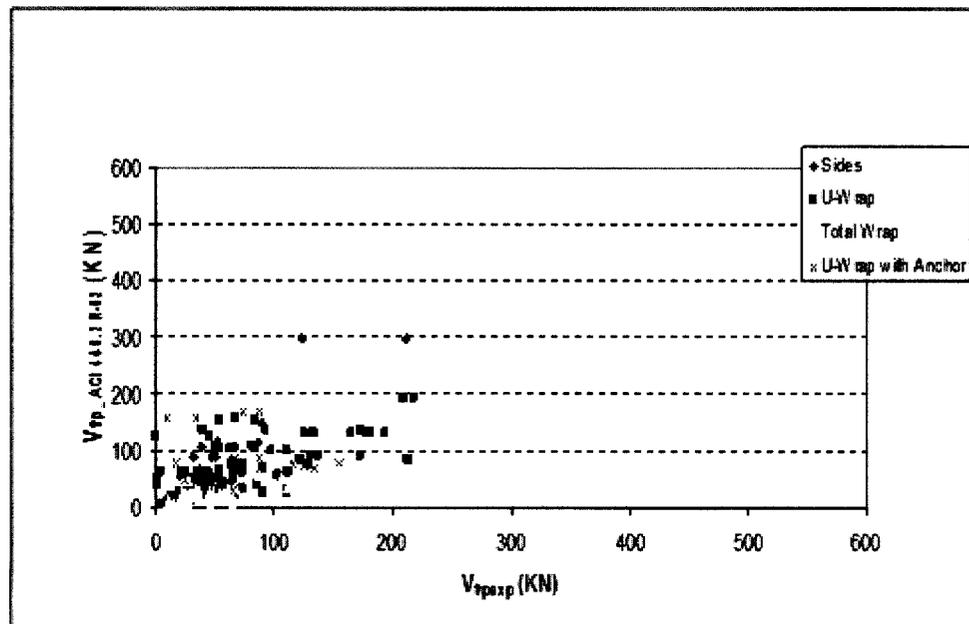


Ratio of Effective strain of FRP in term of rigidity of Frp.

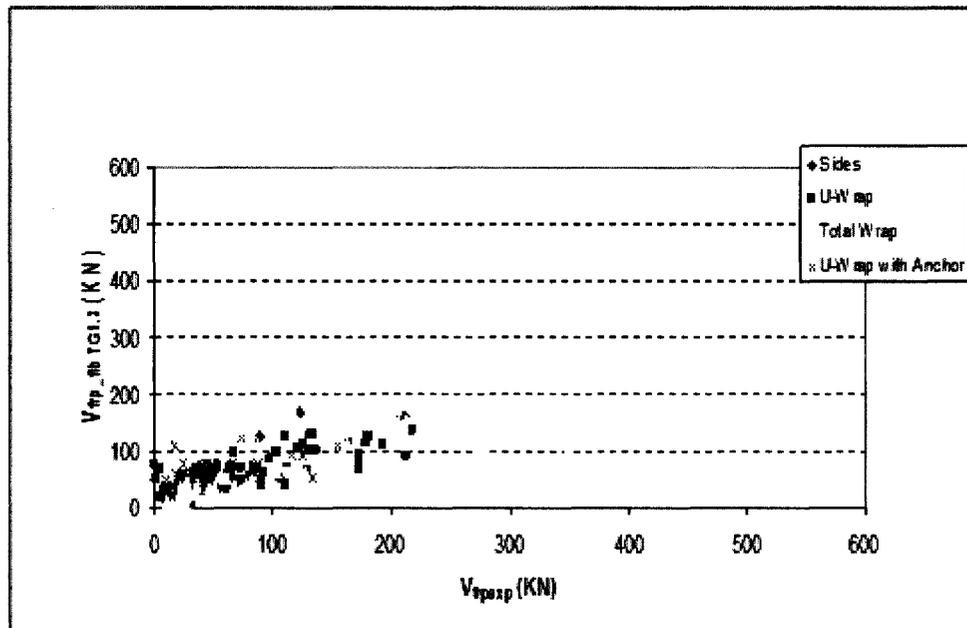
Shear Force Gain in terms of  $a/d$ .FRP Shear strength in term of  $d$ .



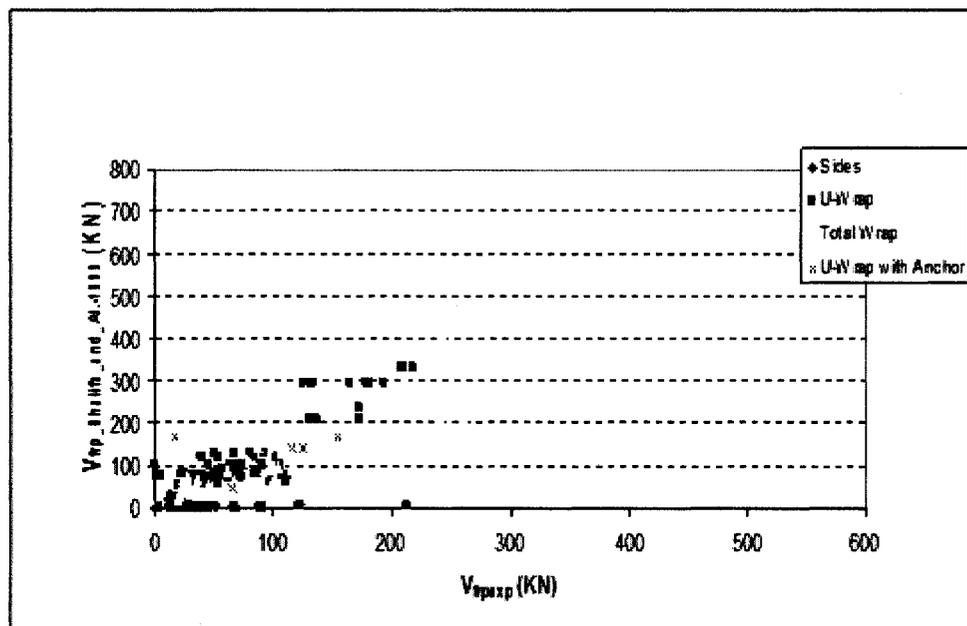
Comparison between results of FRP shear contribution obtained with CSA design and the experimental results of FRP shear contribution.



Comparison between results of FRP shear contribution obtained with ACI design and the experimental results of FRP shear contribution.



Comparison between results of FRP shear contribution obtained with *fib* design and the experimental results of FRP shear contribution.



Comparison between results of FRP shear contribution obtained with Khalifa and al. design and the experimental results of FRP shear contribution.

**ANNEXE 3****CALCUL DE LA RÉSISTANCE EN CISAILLEMENT DÛ AU MATERIAU  
COMPOSITE PAR LES MODÈLES ANALYTIQUES**

### 1- Modèle de Thanasis C. Triantafillou et Costa P. Antonopoulos, 2000

Dans ce modèle, la contribution du matériau composite  $V_{fd}$  pour une poutre renforcée en cisaillement est déterminée par la formule suivante:

$$V_{fd} = 0.9 \frac{\varepsilon_{fd,e}}{\gamma_{f,d}} E_f \rho_f b_w d (\cot \theta + \cot \beta) \sin \beta \quad (\text{B.1})$$

$\gamma_{f,d}$  Représente le coefficient de sécurité utilisée pour le FRP, sa valeur dépend du type de mode de rupture et du type des fibres utilisées, voir tableau ci-dessous:

Tableau VII  
Coefficients de sécurité utilisés dans le modèle de Triantafillou.

Mode de rupture					
Fracture			Debonding		
Type des fibres			Type des fibres		
CFRP	AFRP	GFRP	CFRP	AFRP	GFRP
$\gamma_{f,d} = 1,20$	$\gamma_{f,d} = 1,25$	$\gamma_{f,d} = 1,30$	$\gamma_{f,d} = 1,30$	$\gamma_{f,d} = 1,30$	$\gamma_{f,d} = 1,30$

Dans le cas où  $\varepsilon_{fd,e} = \varepsilon_{\max}$  on a  $\gamma_{f,d} = 1,30$ , cette déformation est limitée à la valeur approximative de 0.004 ce qui a été proposée par d'autres chercheurs (Priestley and Seible en 1995, Khalifa et coll. en 1998) pour assurer l'intégrité du béton et sécuriser l'activation du mécanisme de résistance développés dans la poutres renforcée par imbrication mécanique des granulats et connu sous le nom d'*aggregate interlock*.

$E_f$ : Module d'élasticité du FRP dans la direction des fibres.

$\rho_f$ : Taux du renforcement du MCA

$$= \frac{2t_f \sin \beta}{b_w} \text{ pour une section continue}$$

$$= \frac{2t_f w_f}{b_w s_f} \text{ pour une section en bande avec un espacement } s_f \text{ et une largeur } w_f.$$

$\theta$ : Angle formé par le plan de fissuration et l'axe longitudinal de l'élément, les auteurs ont proposé cet angle à  $45^\circ$ ;

$\beta$ : Angle formé par l'orientation des fibres et l'axe longitudinal de l'élément;

$\varepsilon_{f,e}$ : Déformation effective, on a  $\varepsilon_{fd,e} = \alpha \varepsilon_{f,e} \leq \varepsilon_{\max} = 0.5\%$  avec  $\alpha$  facteur de réduction égale à 0.8

La formule qui calcule la déformation  $\varepsilon_{f,e}$  dépend du type de configuration, du mode de rupture et du type de fibres utilisées.

1. Pour une forme en U ou des bandes collées avec des fibres en carbone et un décollement comme mode de rupture on utilise:

$$\varepsilon_{f,e} = 10^{-3} \times 0.65 \times \left( \frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.56} \quad (\text{B.2})$$

2. Pour une forme en U ou des bandes collées avec des fibres en carbone et une fracture comme mode de rupture on utilise:

$$\varepsilon_{f,e} = 0.17 \times \left( \frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.30} \varepsilon_{fu} \quad (\text{B.3})$$

Avec:

$\varepsilon_{fu}$ : Déformation ultime;

$f_{cm}$ : Résistance de compression du béton.

3. Pour une forme en enveloppe avec des fibres en carbone.

$$\varepsilon_{f,e} = 0.17 \times \left( \frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.3} \varepsilon_{fu} \quad (\text{B.4})$$

4. Pour une forme en enveloppe avec des fibres en aramide et une fracture comme mode de rupture on utilise:

$$\varepsilon_{f,e} = 0.048 \times \left( \frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.47} \varepsilon_{fu} \quad (\text{B.5})$$

Dans toutes les équations, la valeur de  $f_{cm}$  est donnée en MPa et la valeur de  $E_f$  est donnée en GPa.

Le modèle recommande l'utilisation des tissus en forme enveloppe et continue sur toute la surface de la poutre ou des bandes ancrées si la configuration du renfort composite en enveloppes n'est pas possible ainsi que la limitation de la rigidité du MCA à  $(E_f \rho_F)_{\min}$  pour prévenir la délamination du renfort composite:

$$(E_f \rho_F)_{\min} = \left( \frac{0.65 * 10^{-3} \alpha}{\varepsilon_{\max}} \right)^{1/0.56} \quad (\text{B.6})$$

Également la valeur de  $f_{cm}^{2/3}$  doit être limitée à  $0.018 f_{cm}^{2/3}$  afin d'éviter le risque de décollement, l'espacement entre les bandes composites ne doit pas excéder la valeur de  $0.8d$  (Triantafillou et Antonopoulos, 2000).

## 2- Modèle de Ahmed Khalifa, Gustavo Tumialan, Antonio Nanni et Abdeldjelil Belarbi, 1999

Ce modèle est applicable seulement dans le cas des poutres en béton armé avec un renforcement en cisaillement à l'aide des matériaux composites qui sont constitués de fibres de carbone. Dans ce cas, la résistance à l'effort tranchant rapportée par ce matériau composite  $V_f$  est déterminée par la formule suivante:

$$V_f = \frac{A_f d_f f_{fe} (\sin \beta + \cos \beta)}{s_f} \quad (\text{B.7})$$

Cette formule est similaire à celle qui calcule la contribution de l'acier transversal, pour remplacer la limite élastique des armatures transversales  $f_y$ , les auteurs ont utilisés  $f_{fe}$ , cette dernière représente la contrainte effective en traction du renfort composite, elle est donnée par la formule suivante:  $f_{fe} = R f_{fu}$ , avec  $f_{fu}$  la résistance ultime en traction de composite et  $R$  un coefficient de réduction qui dépend du type de mode de rupture survenu après un chargement.

Dans ce modèle, les deux modes de rupture suivants sont considérés lors du calcul de ce coefficient: la fracture des fibres (*Fracture*) et la délamination du tissu composite (*Debonding*).

Pour le premier mode on a:

$$R = 0.5622(\rho_f E_f)^2 - 1.218\rho_f E_f + 0.778 \quad (\text{B.8})$$

Pour le deuxième mode on a:

$$R = \frac{(f_c')^{2/3} w_{fe}}{\varepsilon_{fu} d} [738.93 - 4.06(E_f t_f)] \times 10^{-6} \quad (\text{B.9})$$

Afin de contrôler la largeur des fissures de cisaillement et le mécanisme appelé perte de l'imbrication mécanique due aux granulats (*loss of aggregate interlock*) dans les deux cas présentés ci haut, ce coefficient ne doit pas dépasser un coefficient maximal  $R_{\max}$ , ou  $R_{\max} = 0.006/\varepsilon_{fu}$ ,  $\varepsilon_{fu}$  présente la déformation ultime produite dans le renfort composite.

Dans l'équation B.8,  $\rho_f$  présente le taux du renforcement du FRP et  $E_f$  présente le module d'élasticité de ce renfort pris en GPa, cette équation est applicable lorsque  $\rho_f E_f \leq 0.7$  GPa.

$$\rho_f = \frac{2t_f w_f}{b_w s_f} \quad (\text{B10})$$

Dans l'équation 10, la valeur de  $s_f$  ne doit pas dépasser l'espacement maximal  $s_{\max} = w_f + d/4$  ( $w_f$  la largeur des bandes composites,  $d$  la hauteur utile de la section renforcée), les différentes dimensions utilisées pour le calcul du taux de renforcement sont présentées dans la figure 29.

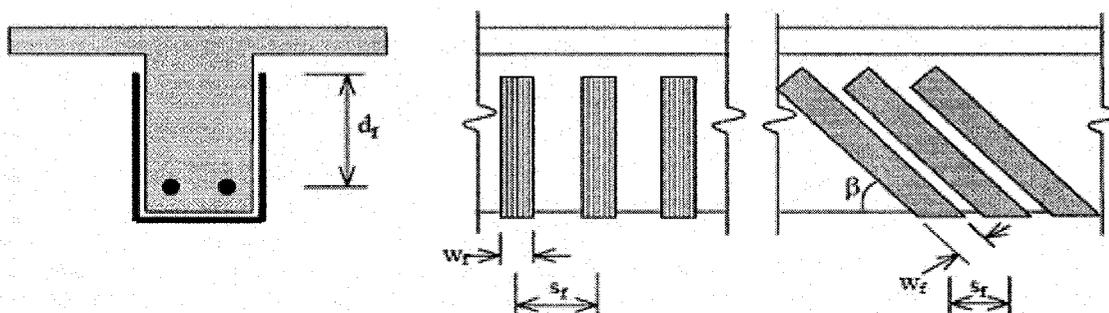


Figure 29: Dimensions utilisées dans le renforcement en cisaillement à l'aide des lamelles composites pour déterminer la surface du renfort FRP. (a) Bandes verticales. (b) Bandes inclinées (Adaptée de Khalifa et coll., 1999)

Dans l'équation B.9,  $f'_c$  présente la résistance à la compression du béton pris en MPa et  $w_{fe}$  présente la largeur effective du tissu composite, elle dépend de la configuration du renfort composite collée au-dessus de la poutre renforcée.

Cette largeur dépend de la configuration du matériau composite:

$$w_{fe} = d - L_e \text{ pour des bandes en forme de "U" sans ancrage.}$$

$$w_{fe} = d + 2L_e \text{ pour des bandes isolées.}$$

Dans son modèle Khalifa et coll. en 1998, la longueur d'adhérence effective  $L_e$  est donnée par une équation empirique issue des études de Maeda et coll. en 1997  $L_e = e^{6.134 - 0.58 \ln(t_f E_f)}$ , elle prend en compte l'influence de l'épaisseur du composite  $t_f$  et le module d'élasticité  $E_f$ , par contre dans le modèle 1999, ils proposent que  $L_e = 75 \text{ mm}$ .

L'équation B.9 est applicable lorsque la rigidité axiale du renfort  $t_f E_f$  varie entre 20 et 90 GPa et on ne peut pas l'adapter dans le cas d'une configuration avec un ancrage ou en forme d'enveloppe.

Dans l'équation de B.1,  $A_f$  présente l'aire de la section du renfort composite, elle est égale à  $A_f = 2t_f w_f$ ,  $\beta$  présente l'angle entre l'orientation des fibres et l'axe longitudinal de la poutre, pour des feuilles composites avec une section continue la valeur de l'espacement entre les bandes et la valeur de la largeur du renfort sont identiques.

Le modèle recommande que  $V_f$  doit être inférieur ou égale à  $\left( \frac{2\sqrt{f'_c} b_w d}{3} - V_s \right)$ ,  $V_s$

présente la résistance en cisaillement rapportée par l'armature transversale.

Finalement le modèle propose pour le calcul de la résistance en cisaillement totale de la poutre en béton armé renforcée par des matériaux composites, la résistance en cisaillement rapportée par le composite doit être multipliée par un facteur de réduction  $\phi = 0.7$  (Khalifa et coll., 1999).

### 3- Modèle d'Omar Chaallal, Mohsen Shahawy et Munzer Hassan, 2002

Dans ce modèle, la contribution du matériau composite  $V_f$  pour une poutre renforcée en cisaillement est déterminée par la formule suivante:

$$V_f = f(a/d)(A_f / s_f)E_f d_f \varepsilon_{fe} \quad (\text{B.11})$$

Avec:

$f\left(\frac{a}{b}\right)$ : Une fonction qui dépend de la longueur de cisaillement et de la hauteur

utile de la section, elle est déterminée par l'équation suivante:

$$f\left(\frac{a}{b}\right) = \frac{1 + 2\frac{a}{d}}{12} \quad (\text{B.12})$$

$A_f$ : La section du renfort composite,  $A_f = 2Nt w_f$  (N est le nombre des couches du renfort utilisé, t est l'épaisseur de ce renfort,  $w_f$  est la largeur de ce renfort)

$s_f$ : L'espacement entre les bandes composite.

$E_f$ : Module d'élasticité du renfort composite

$d_f$ : Profondeur du renfort composite

$\varepsilon_{fe}$ : Déformation effective du renfort composite, qui est déterminée par l'équation suivante:  $\varepsilon_{fe} = 3 \times 10^{-5} \times \rho_{tot}^{-0.6522}$  (B.13)

Avec  $\rho_{tot}$  le taux total du renforcement en cisaillement, il est égal à:  $n\rho_f + \rho_s$ , n est un coefficient qui présente le rapport entre le module d'élasticité du renfort composite et le module d'élasticité de l'armature transversale existante,  $n = \frac{E_f}{E_s}$   $\rho_s$  est le taux du renforcement en cisaillement des armatures transversales qui est déterminé comme suit:

$$\rho_s = \frac{A_{sv}}{bd} \quad (\text{B.14})$$

$\rho_f$  est le taux du renforcement en cisaillement du renfort composite qui est déterminé comme suit:

$$\rho_f = \frac{2t_f}{sbd} \quad (\text{B.15})$$

Pour les poutres profondes un nouveau coefficient est pris en compte  $f\left(\frac{a}{b} + \rho_{tot}\right)$ , il est déterminé par l'équation suivante:

$$f\left(\frac{a}{b} + \rho_{tot}\right) = \frac{1 + 2\frac{a}{d}}{12} + (1000\rho_{tot} - 0.6) \quad (\text{B.16})$$

La valeur de ce coefficient ne doit pas dépasser 1 et doit être plus grand que la valeur du coefficient utilisée pour les poutres non profondes  $f\left(\frac{a}{b}\right)$ .

Le modèle considère le cas où le rapport a/d est égal à 2, il a été utilisé pour des poutres en béton armé profondes renforcées avec des tissus en carbone et une configuration en U.

#### 4- Modèle de J. F. Chen et J. G. Teng, 2003

Dans ce modèle, la contribution du matériau composite  $V_f$  pour une poutre renforcée en cisaillement est déterminée par la formule suivante:

$$V_f = 2 \frac{f_{FRP,ed}}{\gamma_{FRP}} t_{FRP} w_{FRP} \frac{h_{FRP,e} (\sin \beta + \cos \beta)}{s_{FRP}} \quad (B.17)$$

Les auteurs considèrent que l'angle formé par le plan de fissuration et l'axe longitudinal de la poutre  $\theta = 45^\circ$  et le facteur de sécurité  $\gamma_{FRP} = 1.25$

Dans l'équation B.17 on a:

$h_{FRP,e}$  : La hauteur effective du renfort composite  $h_{FRP,e} = 0.9d - (h - d_{FRP}) - d_{FRP,l}$ ;

$s_{FRP}$  : L'espacement entre les bandes composites;

$\gamma_{FRP}$  : Facteur de sécurité, dans ce modèle il est égal à 1.25;

$f_{FRP,ed}$  : Contrainte effective du composite, elle dépend de la contrainte maximale du renfort composite  $\sigma_{FRP,max}$  et du coefficient de distribution des déformations dans le composite  $D_{FRP}$ .

Ce facteur est pris en compte pour démontrer que la distribution des déformations dans les bandes composite n'est pas uniforme le long des fissures critiques de cisaillement, les auteurs précisent que cette distribution des déformations est très difficile à mesurer par les tests car au début de chargement la position des fissures critiques de cisaillement est inconnue et le processus de rupture est soudain et très rapide. Cette contrainte effective est définie comme suit:

$$f_{FRP,ed} = D_{FRP} \sigma_{FRP,max} \quad (B.18)$$

Les auteurs proposent deux modèles pour la détermination des ces deux paramètres  $D_{FRP}$  et  $\sigma_{FRP,max}$ , tous en distinguant les deux types du mode de rupture soient la délamination du renfort composite ou sa rupture

Modèle pour une rupture du renfort composite (Chen and Teng, 2003 a)

La contrainte maximale du composite est déterminée avec les équations suivantes:

$$\sigma_{FRP,max} = \begin{cases} 0.8f_{FRP} & \text{Dans le cas } \frac{f_{FRP}}{E_{FRP}} \leq \varepsilon_{max} \\ 0.8\varepsilon_{max} E_{FRP} & \text{Dans le cas } \frac{f_{FRP}}{E_{FRP}} > \varepsilon_{max} \end{cases} \quad (B.19)$$

$f_{FRP}$ : Présente la résistance en traction du composite et  $\varepsilon_{max}$  présente la déformation maximale prise dans ce modèle égale à 1.5%.

Le facteur de réduction (0.8) est introduit pour prendre en compte les paramètres qui réduisent la résistance maximale en traction du composite dans les tests de traction classiques.

La formule qui détermine le coefficient de distribution des déformations dans le composite  $D_{FRP}$  tiens compte d'un autre coefficient  $\zeta$  qui

$$D_{FRP} = \frac{1+\zeta}{2} \quad (B.21)$$

$$\text{Avec } \zeta = \frac{d_{FRP,l}}{0.9d + d_{FRP,l} + h} \quad (B.22)$$

Pour un renfort collé en forme de U ou en enveloppe ce coefficient  $\zeta$  est égal à 0, et

$$D_{FRP} = 0.5$$

Les différents paramètres utilisés dans ce modèle sont présentés dans la figure 30:

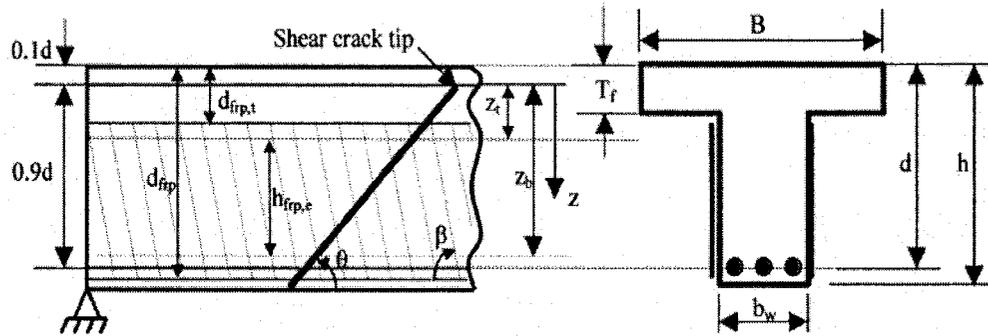


Figure 30 Différents paramètres utilisés dans le modèle rupture du renfort composite (Adaptée de Chen et Teng, 2003-a)

Pour des renforts collés en bandes, l'espacement entre les bandes ne doit pas dépasser une valeur maximale  $s_{FRP,max}$  :

$$s_{FRP,max} = \frac{h_{FRP,e} (\sin \beta + \cos \beta)}{2} \quad (B.23)$$

Modèle pour une délamination du renfort composite: (Chen and Teng, 2003 b)

Pour ce modèle, la contrainte maximale du composite est déterminée avec les équations suivantes

$$\sigma_{FRP,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{FRP} \\ 0.427 \beta_w \beta_L \sqrt{\frac{E_{FRP} \sqrt{f'_c}}{t_{FRP}}} \end{array} \right. \quad (B.24)$$

$$0.427 \beta_w \beta_L \sqrt{\frac{E_{FRP} \sqrt{f'_c}}{t_{FRP}}} \quad (B.25)$$

$\beta_w$  et  $\beta_L$  sont des coefficients qui présentent l'influence de la longueur du renfort et l'influence du rapport entre la largeur du renfort et la largeur du béton dans le spécimen testé  $b_{FRP} / b_c$  respectivement.

$$\beta_L = \begin{cases} 1 & \text{Pour } \lambda \geq 1 \\ \sin \frac{\pi \lambda}{2} & \text{Pour } \lambda < 1 \end{cases} \quad (\text{B.26})$$

Le coefficient  $\lambda$  présente le rapport entre la longueur d'adhérence maximal du renfort composite  $L_{\max}$  et sa longueur d'adhérence effective  $L_e$ .

$$\lambda = \frac{L_{\max}}{L_e} \quad (\text{B.28})$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_{FRP} I_{FRP}}{\sqrt{f'_c}}} \quad (\text{B.29})$$

$$L_{\max} = \begin{cases} \frac{h_{FRP,e}}{\sin \beta} & \text{Pour une configuration en U} \\ \frac{h_{FRP,e}}{2 \sin \beta} & \text{Pour des bandes collées sur les deux surfaces de la poutre} \end{cases}$$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - w_{FRP} / (s_{FRP} \sin \beta)}{1 + w_{FRP} / (s_{FRP} \sin \beta)}} \quad (\text{B.30})$$

La formule qui détermine le coefficient de distribution des déformations dans le composite  $D_{FRP}$  dans ce deuxième cas est la suivante:

$$D_{FRP} = \begin{cases} \frac{2}{\pi\lambda} \times \frac{1 - \cos \frac{\pi}{2} \lambda}{\sin \frac{\pi}{2} \lambda} & \text{Pour } \lambda \leq 1 \end{cases} \quad (\text{B.31})$$

$$1 - \frac{\pi - 2}{\pi\lambda} \quad \text{Pour } \lambda > 1 \quad (\text{B.32})$$

Le module d'élasticité, la résistance en traction du renfort composite et la résistance en compression du béton sont en méga pascal, l'épaisseur du renfort composite est en millimètres.

### 5- Modèle de Carlo Pellegrino et Claudio Modena, 2002

Dans ce modèle, la contribution du matériau composite  $V_f$  pour une poutre renforcée en cisaillement est déterminée par la formule suivante:

$$V_f = 0.9 \rho_f b_w d R f_{fu} (\sin \beta + \cos \beta) \quad (\text{B.33})$$

C'est la même équation proposée dans le modèle de Khalifa et coll. en 1999 avec les mêmes paramètres qui entrent dans le calcul de la résistance en cisaillement rapportée par le matériau composite, la seule différence est la méthode qui détermine la valeur du coefficient R.

Les auteurs proposent l'ajout d'un nouveau coefficient de réduction  $R^*$  dans le cas d'une rupture par délamination qui dépend du rapport de rigidité entre les deux matériaux acier transversal et le matériau composite qui composent la poutre renforcée en cisaillement, la valeur de ce nouveau coefficient varie entre 0 et 1, mais pour des petites valeurs ce coefficient est égal à 1.

Pour une rupture du renfort composite les auteurs ont adopté la formule proposée par Miller en 1999 qui diffèrent de celle proposée dans le modèles Khalifa et coll. en 1999:

$$R = 0.5622(\rho_f E_f)^2 - 1.218 \rho_f E_f + 0.778 \quad (\text{B.34})$$

Cette équation est valide pour un  $\rho_f E_f < 0.7 \text{GPa}$

Pour une délamination du renfort composite on a:

$$R = R^* \left\{ 0.0042 (f_c')^{2/3} w_{fe} / \left[ (E_f t_f)^{0.58} \varepsilon_{fu} d \right] \right\} \quad (\text{B.35})$$

$$R^* = -0.53 \ln \rho_{s,f} + 0.29 \text{ avec } 0 \leq R^* \leq 1 \quad (\text{B.36})$$

$$\rho_{s,f} = \frac{E_s A_{sw}}{E_f A_f} \quad (\text{B.37})$$

Avec  $A_f$  Aire des lamelles composites et  $A_{sw}$  l'aire de la section d'acier transversal

Également le coefficient de réduction  $R$  ne doit pas dépasser le coefficient maximal  $R_{\max} = 0.006 / \varepsilon_{fu}$  (B.38)

$\varepsilon_{fu}$  présente la déformation ultime produit par le renfort composite.

Pour le calcul de la longueur d'adhérence effective qui entre dans le calcul de la largeur effective du composite  $w_{fe}$  Les auteurs ont proposé de prendre l'équation adoptée par Maeda et coll. en 1997  $L_e = e^{6.134 - 0.58 \ln(t_f E_f)}$ .

La valeur prise pour le calcul de la valeur de  $V_f$  présente la valeur minimale des trois facteurs calculée par les équations (B.34, B.35, B.38).

Ce modèle est proposé pour des poutres en béton armé avec un renforcement en bandes collées sur les deux faces seulement, mais les auteurs disent qu'ils peuvent être appliqués pour d'autres configurations. Le type de fibre à utiliser dans le renforcement n'est pas indiqué dans ce modèle contrairement au modèle khalifa et coll.

Finalement les auteurs recommandent la nécessiter de plusieurs recherches expérimentales qui penchent sur l'influence des paramètres qui entre dans le calcul de la résistance en cisaillement pour ce modèle comme les différentes configurations, l'orientation des fibres, la résistance à la compression du béton et le rapport entre la longueur de cisaillement et la hauteur utile de la section ( $a/d$ ) pour la compréhension du mécanisme complexe du cisaillement ainsi que la validation de ce modèle.

### 6- Modèle de Cheng-Tzu Thomas Hsu et Jon Moren, Zhichao Zhang, 2004

Dans ce modèle la formule qui détermine la résistance à l'effort tranchant est similaire à celle utilisée dans le modèle Khalifa et coll. (1999).

$$V_f = \frac{A_{frp} d_{frp} f_{frp-e} (\sin \beta + \cos \beta)}{s_{frp}} \quad (B.39)$$

Avec  $f_{frp-e} = R f_{frp-u}$ , R est un coefficient de réduction, il est déterminé par la formule suivante:

$$R = \frac{\tau_{max} L_e}{2 f_{frp-u} t_f} \leq 1$$

$\tau_{max}$  présente la contrainte maximale en cisaillement entre le béton et le renfort composite,  $L_e$  la longueur d'adhérence effective calculée par la même formule utilisée dans Khalifa et coll. (1999) et  $f_{frp-u}$  la résistance en traction du renfort composite.

$$L_e = e^{6.134 - 0.58 \ln(t_f E_f)}$$

$$\tau_{max} = 7.64 \times 10^{-4} \times f_c'^2 - 2.73 \times 10^{-2} \times f_c' + 6.38 \quad (B.39)$$

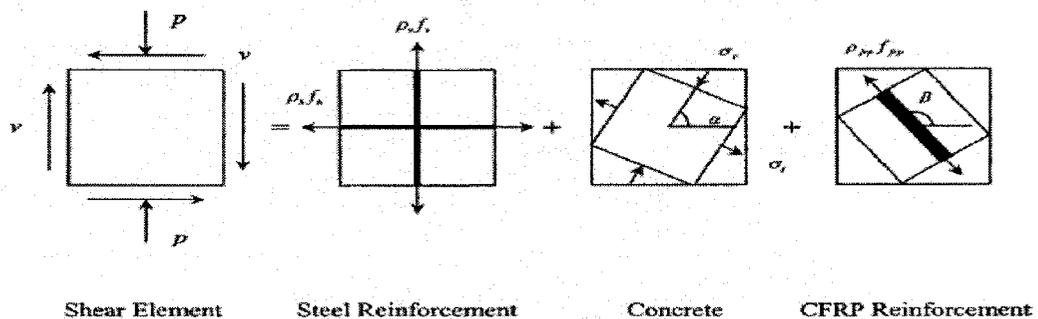


Figure 31 Contraintes dans un élément en cisaillement

(Adaptée de Zhichao et coll., 2004)

### 7- Modèle de S. Y. Cao, J. F. Chen, J. G. Teng, Z. Hao et J. Chen, 2005

Dans ce modèle, la contribution du matériau composite  $V_f$  pour une poutre renforcée en cisaillement est déterminée par la formule suivante:

$$V_f = 2t_{frp} w_{frp} E_{frp} \varepsilon_{frp,max} \frac{h_{frp} D_{frp}}{s_{frp} \tan \theta} \quad (B.40)$$

Dont  $h_{frp}$  hauteur effective du renfort composite, elle est équivalente à 0.9d dans ce modèle,  $\theta$  l'angle formé par le plan de fissuration et l'axe longitudinal de l'élément,  $D_{frp}$  facteur de distribution de la déformation dans le composite et  $\varepsilon_{frp,max}$  la déformation maximum du renfort composite.

Cette équation est applicable pour une rupture par délamination du renfort composite colle avec des bandes isolées seulement.

Pour  $\theta = 45^\circ$ , l'équation de la résistance à l'effort tranchant rapportée par le renfort composite devient comme suit:

$$V_f = 2t_{frp} w_{frp} E_{frp} \varepsilon_{frp,max} \frac{h_{frp} D_{frp}}{s_{frp}} \quad (B.41)$$

$$\varepsilon_{frp,max} = \frac{0.427 \beta_w \sqrt{f'_c} L_e}{E_{frp} t_{frp}} = \frac{0.427 \beta_w \sqrt[4]{f'_c}}{\sqrt{E_{frp} t_{frp}}} \quad (B.42)$$

Dans l'équation (B.42), la formule qui calcule  $L_e$  est similaire à l'équation utilisée par

Chen et Teng (2003)  $L_e = \sqrt{E_{frp} t_{frp} / \sqrt{f'_c}}$ .

$\beta_w$  est un coefficient qui a été introduit dans le calcul de la déformation maximal du renfort composite dans le cas d'une rupture avec délamination pour prendre compte de l'effet de la largeur des bandes, la formule qui calcul ce coefficient est comme suit :

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - w_{fpp} / s_{fpp}}{1 - w_{fpp} / s_{fpp}}} \quad (\text{B.43})$$

$$D_{FRP} = \left(1 - \frac{\pi - 2}{\lambda_{fpp} \pi}\right) \times \begin{cases} 1 & \text{Pour } \lambda \leq 1.4 \\ \frac{1}{1 - 0.2(\lambda - 1.4)^2} & \text{Pour } 1.4 < \lambda < 3 \\ 2.05 & \text{Pour } \lambda \geq 3 \end{cases} \quad (\text{B.44})$$

Les auteurs introduisent le rapport longueur de cisaillement sur la hauteur utile  $\lambda$  dans le calcul de ce coefficient, ils ont remarqué que ce rapport a un effet considérable sur l'angle des fissures critiques du cisaillement  $\theta$  voir figure 32

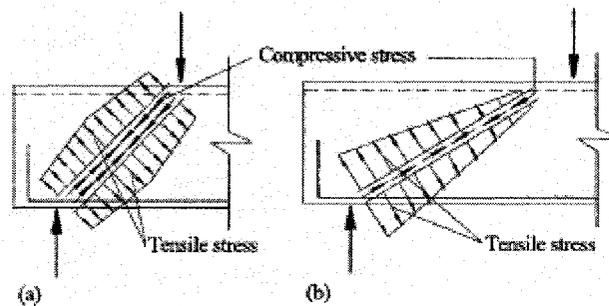


Figure 32 Distribution de la contrainte du composite pour (a)  $\lambda$  petite et (b)  $\lambda$  grande (Adaptée de Cao et coll., 2005)

$\lambda_{frp}$  Présente la longueur d'adhérence normalisée du renfort composite, elle est égale à:

$\lambda_{frp} = L_{max} / L_e$  , la longueur maximale d'adhérence du renfort composite dépend de la configuration de ce renfort, elle est donnée comme suit:

$$L_{max} = \begin{cases} h_{frp} & \text{Pour une configuration en U} \\ h_{frp} / 2 & \text{Pour des bandes collées sur les deux surfaces de la poutre} \\ 0.9d / 2 & \text{Pour une configuration en U} \end{cases}$$

Ce modèle empirique est proposé pour prédire la contribution du matériau composite dans des poutres en béton armé renforcées en cisaillement dont la configuration est en enveloppes et le mode de rupture survenu est une délamination du composite,

### 8- Modèle de Zhichao Zhang et Chen-Tzu Thomas Hsu, 2005

Dans ce modèle, la contribution du matériau composite  $V_f$  pour une poutre renforcée en cisaillement est similaire à celle utilisé par Khalifa en 1999, elle est déterminée par la formule suivante:

$$V_f = \frac{A_f E_f \varepsilon_{fe} (\sin \beta + \cos \beta) d_f}{s_f} \quad (\text{B.45})$$

Dans cette équation:

$A_f$ : Section du renfort composite;

$E_f$ : Module d'élasticité du renfort composite utilisé;

$\beta$ : Angle entre l'orientation des fibres et l'axe longitudinal de la poutre;

$d_f$ : Profondeur du renfort composite;

$s_f$ : Espacement entre les bandes composites pour une configuration en bandes;

$\varepsilon_{fe}$ : Déformation effective du renfort composite obtenue après la rupture de la poutre renforcée en cisaillement, cette déformation est une fraction de la déformation ultime de ce renfort ( $\varepsilon_{fu}$ ), elle est donnée comme suit:

$$\varepsilon_{fe} = R \varepsilon_{fu} \quad (\text{B.46})$$

R est un facteur de réduction, il est considéré dans ce modèle comme le paramètre le plus important pour la détermination de la résistance en cisaillement rapportée par le matériau composite.

Les auteurs proposent d'utiliser deux approches pour le calcul de ce facteur, une basée sur un modèle par calibration des paramètres expérimentaux et l'autre fondée sur le

mécanisme d'adhérence qui se trouve entre le matériau composite et le béton, la valeur la plus petite obtenue par ses deux approches sera utilisée pour le calcul de la déformation effective.

Modèle par calibration des paramètres expérimentaux:

Dans ce modèle le facteur de réduction dépend de deux principaux paramètres, la rigidité axiale du matériau composite et la résistance à la compression du béton, il est déterminé par l'équation suivante:

$$R = 1,4871(\rho_f E_f / f_c')^{-0,7488} \quad (\text{B.47})$$

Cette équation est obtenue par calibration des données des essais effectuées par les auteurs. Pour cela les auteurs recommandent que d'autres recherches expérimentales doivent être faites dans le futur pour évaluer ce modèle et ajuster cette équation pour être approprié aux différents paramètres des tests.

Modèle du mécanisme d'adhérence FRP-béton:

Dans ce modèle le facteur de réduction dépend de plusieurs paramètres comme la longueur d'adhérence du matériau composite et la contrainte maximale en cisaillement, il est déterminé par l'équation suivante:

$$R = \frac{\tau_{\max} L_e}{2 f_{fu} t_f} \leq 1 \quad (\text{B.48})$$

Dans cette équation:

$f_{fu}$  : Résistance ultime en traction de composite;

$t_f$  : Épaisseur du renfort composite utilisée dans le renforcement;

$L_e$  : Longueur d'adhérence du matériau composite, les auteurs considèrent la même valeur proposée par khalifa et coll. en 1999 soit 75 mm et recommandent d'autre recherche dans le future pour estimer sa valeur;

$\tau_{\max}$  : Contrainte maximale en cisaillement, elle dépend essentiellement de la résistance à la compression du béton, deux équations empiriques sont proposées, une en MPa et l'autre en psi, dans notre étude nous avons adopté celle qui est donnée en MPa:

$$\tau_{\max} = (7.64 \times 10^{-4} \times (f'_c)^2) - (2.73 \times 10^{-2} \times f'_c) + 6.38 \quad (\text{B.49})$$

Les auteurs adoptent ce modèle car dans les essais effectués avec une rigidité axial inférieur ou égale à 0.55 GPa, le mode de rupture observé été une rupture du renfort composite et il n'existe pas une équation du modèle précédent qui peuvent donner une explication logique.

Finalement les auteurs proposent deux cas qui dépendent du type de la section du renfort composite pour le calcul de la résistance en cisaillement rapportée par le matériau composite:

Pour un renfort composite dont la section est continue:

$$V_f = w_{fe} t_f f_{fe} \sin^2 \beta \leq \left( \frac{2\sqrt{f'_c} b_w d}{3} - V_s \right) \quad (\text{B.50})$$

Pour un renfort composite dont la section est en bandes collées en surface de la poutre:

$$V_f = \frac{A_f f_{fe} (\sin \beta + \cos \beta) d_f}{s_f} \leq \left( \frac{2\sqrt{f'_c} b_w d}{3} - V_s \right) \quad (\text{B.51})$$

Avec  $f_{fe}$  la contrainte effective en traction du renfort composite déterminée comme suit:  $f_{fe} = Rf_{fu}$  (B.52)

Les auteurs proposent d'utiliser la valeur 0.4 comme une valeur maximale pour le facteur R.

$w_{fe}$  présente la largeur effective du tissu composite, elle est calculée par les mêmes équations présentées dans le modèle khalifa et coll. en 1999:  $w_{fe} = d - L_e$  pour des bandes en forme de "U" sans ancrage et  $w_{fe} = d + 2L_e$  pour des bandes isolées.

## BIBLIOGRAPHIE

ACI-318 (2005). Building Code Requirements for Structural Concrete. Framington Hills, Michigan: American Concrete Institut.

ACI Committee 440.2R-02. (2002). "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP System for Strengthening Concrete Structures." Amerian Concrete Institute.

Al-Sulaimani, Sharif, G.J., Basanbul, A., Baluch, I.A., Baluch, M.H., B.N., Ghaleb (1994). "Shear Repair for Reinforced Concrete by Fiberglass Plate Bonding." ACI Structural Journal 91(3), pp. 458-464.

Arduini, M., Nanni, A. (1997). "Behavior of precracked RC beams strengthened with carbon FRP sheets." ASCE Journal of Composites for Construction, May 1997, pp. 63-70.

ASCE-ACI, Task Committee 445 (1998). "Recent Approaches to Shear Design of Structural Concrete." Journal of Structural Enginering ASCE, 124 (12), pp. 1375-1417.

Bakis, C.E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesko, J.J., Machida, A., Rizkalla, S.H., Triantafilou, T.C. (May 2002). "Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction-State-of-Art Review." Journal of composites for construction vol. 6, No 2: 14 pp.

Bimal, B.A. and Mutsuyoshi, H. (2004). "Behavior of Concrete Beams Strengthened in Shear with Carbon-Fiber Sheets." Journal of Composites for Construction ASCE /May/June, pp. 258-264.

Bousselham, A. (2005). Comportement des Poutres en Béton Armé Renforcées en Cisaillement à l'aide de Matériaux Composites Avancés. Génie de la Construction. Montréal, École de Technologie Supérieure. Thèse de Doctora: 404 pp.

Bousselham, A. and Chaallal, O. (2006). "Behavior of RC T-Beams Strengthened in Shear with CFRP: An Experimental Study." *ACI Structural Journal* 103 (3): pp. 339-347.

Cao, S.Y., Chen, J.F., Teng, J.G., Hao, Z., Chen, J. (2005). "Debonding in RC Beams Shear Strengthened with Complete FRP Wraps." *Journal of Composites for Construction* 9(5)(ASCE): pp. 417-428.

Chaallal, O. and Bousselham, A. (2005). "Contribution à l'étude du Renforcement en Cisaillement des Poutres en Béton Armé à l'aide de matériaux composites avancés." *Canadian journal Civil Engineering CNRC Canada*: 13 pp.

Chaallal, O., Shahawy, M., Hassan, M. (2002). "Performance of Reinforced Concrete T-Girders Strengthened in Shear with CFRP Fabrics." *ACI Structural Journal* 99 (3), pp. 335-343.

Chaallal, O., Nollet, M.J., Perraton, D. (1998). "Shear Stengthening of RC Beams by Externally Bonded Side CFRP Strips." *Journal of Composites for Construction ASCE*, 2 (2), pp. 111-114.

Chen, J.F., Teng, J.G. (2003-a). "Shear Capacity of FRP Strengthened RC Beams:FRP rupture. *Journal of Structural Engineering.*" *ASCE Journal of Composites for Construction* 129 (5), pp. 615-625.

Chen, J.F., Teng, J.G. (2003-b). "Shear Capacity of FRP Strengthened RC beams:FRP Debonding." *Construction and Building Material* 17 (1), pp. 27-41.

Chen, J.F., Lam, L., Teng, J.G. (2004). "Shear Strengthening of RC Beams with FRP Composites." *Program Structure Engineering Master*: 12 pp.

Collins, M.P., Mitchell, D. (1991). *Prestressed Concrete Structures*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 766 pp.

CSA, Committee A23.3. (2004). *Design of Concrete Structures*. Rexdale, Ontario: Canadian Standards Association.

CSA, Committee S806. (2002). "Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced-Polymer." Rexdale, Ontario: Canadian Standards Association.

Deniaud, C. and Cheng, J.J. (2001). "Review of Shear Design Methods for Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber Reinforced Polymer Sheets." *Canadian journal Civil Engineering NRC Canada*: 11 pp.

fib-TG9.3. (2001). *Design and Use of Externally Bonded Fiber Polymer Reinforcement (FRP EBR) for Reinforced Concrete Structures*. Technical Report Prepared by EBR Working Party of Task Group 9.3, Bulletin 14.

Hamelin, P. (2002). "Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites." *Technique de l'ingénieur AM 5615*: 8 pp.

Isis canada, (2004): [En ligne] <http://www.isiscanada.com/newsletter/Feb04Fr.pdf> consulté le 3 avril 2007, "Isis l'innovateur"

Isis canada, (2005): [En ligne] <http://www.isiscanada.com/newsletter/Feb05Fr.pdf> consulté le 3 avril 2007, "Isis l'innovateur"

Khalifa, A., Gold, W.J., Nanni, A., Abdelaziz, M.I. (1998). "Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of Flexural Members." *Journal of Composites for Construction* 2 (4), ASCE : pp. 195-203.

Khalifa, A., Tumialian, G., Nanni, A., Belarbi, A (1999). "Shear Strengthening of Continuous RC Beams Using Externally Bonded CFRP Sheets." *ACI Structural Journal* SP-188: pp. 995-1008.

Khalifa, A., Nanni, A. (2000). "Improving Shear Capacity of Existing RC T-section Beams Using CFRP Composites." *Cement & Concrete Composites* 22, pp. 165-174.

Kuchma, D., Kim, A.K.Su., Marx, S., Reineck, Karl-Heinz. (2003). "Shear Database for Reinforced Concrete Members Without Shear Reinforcement." *ACI Structural Journal*, 10 pp.

MacGregor, J.G., Barlett, F.M. (2000). *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*. Scarborough., Ont: Prentice Hall, 1st Canadian Edition, 1042 pp.

Pellegrino, C. and Modena, C. (2002). "Fiber Reinforced Polymer Shear Stengthening of RC Beams with Transverse Steel Reinforcement." *Journal of Composites for Construction* 6 (2), ASCE: pp. 104-111.

Rebiez, K.S., Fente, J., Frabizzio, M.A. (2001). "Effect of Variables on Shear Strength of Concrete Beams." *Journal of Materials in Civil Engineering* November/December: pp. 467- 470.

- Regan, P.E. (1993). "Research on Shear: A Benefit to Humanity or a waste of Time?" *The Structural Engineer* 71 (19): pp. 337-347.
- Riskalla, S., Hassan, T., Hassan, N. (2003). "Design recommendations for the use of FRP for reinforcement and strengthening of concrete structures." program Structure. Enging Master: 12 pp.
- Täljsten, B. (2002). "FRP Strengthening of Concrete Structures- Design Guidelines in Sweden." ASCE Engineering Mechanics Conference (Columbia University, New York.).
- Teng, J.G., Chen, J.F. (2002). "Shear capacity of Fiber-Reinforced Polymer-Strengthened Reinforced Concrete Beam:Fiber Reinforced Polymer Rupture." *Journal of Structural Engineering* Vol. 129, No 5: 11 pp.
- Triantafillou, T.C., Antonopoulos, C.P. (2000). "Design of Concrete Flexural Members Strengthened in Shear With FRP." *Journal of Composites for Construction* 4 (4), ASCE: pp. 198-205.
- Wu, Z.Y. (2004). *Étude Expérimentale du Comportement des Poutres Courtes en Béton Armé Pré-fissurées et Renforcées par Matériaux Composites sous Chargement Statique et de Fatigue.* LCPC. Paris, École Nationale des Pont et Chaussées. Thèse de Doctorat: 244 pp.
- Zhang, Z., Hsu, Cheng-Tzu.T., Moren, J. (2004). "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Deep Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates." *Journal of Composites for Construction* 8 (5), ASCE: pp. 403-414.

Zhang, Z., Hsu, Cheng-Tzu,T. (2005). "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams using Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Laminates." *Journal of Composites for Construction* 9 (2), ASCE: pp. 158-168.