

UNIVERSITE D'ARTOIS

**THESE**

Pour obtenir le grade de

**Docteur de l'université**

**Spécialité : Sciences pour l'ingénieur**

**Option : Génie Civil**

Présentée et soutenue publiquement par

**Maamoun SAADE**

<p><b>Étude du comportement des voûtes en maçonnerie renforcées par matériaux composites – application aux ouvrages d'assainissement</b></p>
--

Soutenue le 27 Juin 2012 devant la commission d'examen composée de :

Rapporteurs :	M. Luc TAERWE M. Yves DELMAS	Professeur des universités, Université de Gand Professeur des universités, LGC, Université de Reims
Examineurs :	M. François BUYLE-BODIN Mme Nathalie DOMEDE M. Lotfi HAMITOUCHE	Professeur des universités, Université Lille 1 Maître de Conférences, LMDC, INSA Toulouse Docteur-Ingénieur R&D, Structure & Réhabilitation
Directrice de thèse : Co-encadrant :	Mme Chafika DJELAL-DANTEC M. Stéphan KESTELOOT	Professeur des universités, LGCgE, Université d'Artois Maître de Conférences, LGCgE, Université d'Artois
Invités :	M. Idriss BENSLIMANE M. Pascal REMY	PDG, Structure & Réhabilitation Directeur R&D, Structure & Réhabilitation

## NOTATIONS

$f_c$	Résistance à la compression de l'existant
$d$	Densité volumique apparente
$\omega$	Teneur en eau
$f_{cf}$	Résistance à la flexion
$\sigma_A$	Contrainte d'adhérence
$\sigma_t$	Résistance en traction
$f_{ctm}$	Résistance à la traction
$f_{ctk0,05}$	Valeur inférieure de la résistance caractéristique à la traction
$f_{ctk0,9}$	Valeur supérieure de la résistance caractéristique à la traction
$E_m$	Module de Young
$c (\Delta l/L)$	Variation de longueur
$E_L$	Module d'élasticité longitudinale
$E_b$	Module d'élasticité du béton [MPa]
$E_f$	Module d'élasticité du composite [MPa]
$A_f$	Section du composite [mm <sup>2</sup> ]
$\nu$	Coefficient de Poisson
PdD	Piédroit droit
PdG	Piédroit gauche

## Sommaire

Introduction Général .....	7
----------------------------	---

<b>Partie I: Les Ouvrages d'assainissement/Utilisation des matériaux composites/Caractérisations des matériaux</b>
--

### Chapitre 1 : les ouvrages d'assainissement

Introduction .....	13
1. Ouvrages d'assainissement en maçonnerie.....	14
1.1 Histoire des égouts de Paris.....	14
1.2 Les ouvrages d'assainissement.....	15
1.3 Matériaux de construction des collecteurs en maçonnerie .....	16
2. Types de dégradation .....	19
2.1 Les défauts des pierres.....	20
2.2 Les altérations des joints : le déjointoiement .....	20
2.3 Fissurations.....	21
3. Techniques d'auscultation .....	21
3.1 Inspection visuelle.....	21
3.2 Auscultation par radar géophysique .....	21
3.3 Impédance mécanique .....	22
3.4 Système Avari .....	22
3.5 Vérinage interne .....	23
4. Techniques de réhabilitation .....	24
4.1 Injections de collage .....	24
4.2 Projection de béton armé.....	24
4.3 Eléments préfabriqués .....	25
Conclusion.....	26
Bibliographie.....	27

### Chapitre 2 : Utilisation des matériaux composites dans les structures en maçonnerie

Introduction .....	30
1. Matériaux composites .....	31
1.1 Qu'est-ce qu'un matériau composite ? .....	31

1.2	Les grandes familles de matériaux composites .....	31
1.2.1	Classification selon leurs performances .....	31
1.2.2	Classification selon la nature de la matrice .....	32
1.2.3	Les différents types de renfort.....	32
1.3	Les propriétés des matériaux composites .....	33
1.3.1	Propriétés générales.....	33
1.3.2	Propriétés mécaniques.....	33
1.4	Les domaines d'application des composites dans le Génie Civil.....	33
2.	Renforcement de structures planes .....	35
2.1	Essais sur les surfaces planes non renforcées .....	36
2.2	Essais sur les surfaces planes renforcées .....	36
3.	Etude des structures courbes .....	39
3.1	Comportement des structures courbes .....	39
3.2	Renforcement des structures en courbe .....	40
3.3	Essais réalisés sur des arcs renforcés.....	41
	Conclusion.....	56
	Bibliographie.....	58

### **Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux et des interfaces**

	Introduction .....	62
1.	Le Mortier fibré : Enduit hydraulique.....	63
1.1	Essai de flexion 3 points .....	63
1.2	Essai de compression simple .....	64
1.3	Essai d'arrachement.....	65
1.4	Essai en traction par fendage .....	67
1.5	Module de Young .....	68
1.6	Essai de retrait .....	69
	Synthèse des essais de caractérisation .....	72
2.	Meulière .....	72
2.1	Essai de compression.....	73
2.2	Essai d'arrachement.....	73
2.3	Module d'élasticité .....	74
3.	Mortier de liaison .....	75
4.	Matériaux composites .....	75
4.1	Caractéristiques des lamelles et des tissus de carbone .....	76
4.2	Caractéristiques des adhésifs .....	76
5.	Essais du complexe meulière/mortier .....	77
6.	Essais de glissement.....	79
6.1	Présentation des essais .....	79
6.2	Adaptation de l'essai à notre cas .....	80
6.3	Phase de préparation .....	81

6.4	Résultats des essais .....	82
6.5	Interprétation et analyse des résultats .....	85
	Conclusion.....	86
	Bibliographie.....	87

<b>Partie II: Essais sur voûtes non renforcées et renforcées</b>
--

### **Chapitre 4 : Essais sur voûtes non renforcées**

Introduction .....	91
1. Comportement mécanique des ouvrages d'assainissement .....	92
2. Simulation numérique des ouvrages d'assainissement .....	94
2.1 Hypothèses générales .....	94
2.1.1 Géométrie retenue .....	94
2.1.2 Conditions d'appui .....	94
2.1.3 Constitution de la voûte.....	94
2.1.4 Caractéristiques des matériaux.....	94
2.1.5 Chargement .....	95
2.1.6 Etat de référence .....	95
2.2 Calculs préliminaires .....	95
3. Construction des voûtes .....	96
4. Essais de rupture sur les voûtes .....	97
4.1 Résultats des essais - Voûtes non enduites-Famille A .....	98
4.2 Résultats des essais- Voûtes non enduites-Famille B.....	100
4.3 Mode de rupture.....	101
Conclusion.....	102
Bibliographie.....	104

### **Chapitre 5 : Chemisage mince non armé par mortier fibré**

Introduction .....	106
1. Mise en place du mortier fibré .....	107
2. Résultats des essais .....	108
2.1 Mortier fibré A .....	108
2.2 Mortier fibré B .....	111
2.3 Mortier fibré C .....	112
2.4 Mortier fibré D.....	115

3. Synthèse .....	117
4. Mode de rupture .....	118
Conclusion.....	120
Bibliographie.....	121

## **Chapitre 6 : Réhabilitation par des matériaux composites**

Introduction .....	121
1. Principe des essais.....	122
2. Résultats d'essai sur une voûte renforcée par mortier fibré.....	122
3. Application des matériaux composites .....	123
3.1 Mise en place des plats de carbone.....	123
3.2 Mise en place des tissus de carbone .....	124
4. Résultats des essais .....	125
4.1 Résultats des essais sur deux voûtes renforcées par plats de carbone .....	125
4.2 Résultats des essais sur deux voûtes renforcées par tissus de carbone.....	129
5. Synthèse .....	134
6. Etude comparative avec le procédé de réhabilitation traditionnel .....	136
6.1 Mise en œuvre du béton projeté.....	136
6.2 Résultats des essais .....	138
6.3 Mode de rupture .....	138
6.4 Comparaison .....	139
Bibliographie.....	141
Conclusion & Perspectives.....	142
Bibliographie.....	146

## **Annexes : Fiches techniques des matériaux**

Annexe 1 : Mortier hydraulique SIKA.....	147
Annexe 2 : Mortier hydraulique LANKO .....	151
Annexe 3 : Mortier hydraulique FREYSSINET .....	153
Annexe 4 : Mortier hydraulique WEBER & BROUTIN .....	156
Annexe 5 : Tissus de Carbone.....	158
Annexe 6 : Plats de Carbone .....	165
Annexe 7 : Essais de glissement .....	172
Annexe 8 : Calcul aux éléments finis.....	174

## Introduction Général

La France est dotée d'un patrimoine important en ouvrages d'assainissement construits à la fin du 19<sup>ème</sup>, début du 20<sup>ème</sup> siècle. Ces ouvrages d'assainissement peuvent être de forme circulaire, ovoïdale, voûte plein cintre,... et sont généralement construits en tranchée ou en souterrain.

La préservation de ces ouvrages anciens, toujours en service, est une des premières priorités des maîtres d'ouvrages. Elle est conditionnée par la réalisation de travaux de réhabilitation spécifiques, souvent coûteux. En effet, ces ouvrages sont soumis à des sollicitations mécaniques diverses. On peut distinguer les sollicitations engendrées par les charges permanentes, comme les poids propres (poids de l'ouvrage, poussées des terres, poids des bâtiments...), les sollicitations hydrauliques dues aux pressions d'effluents, les surcharges de surfaces statiques (immeuble d'habitation,...) et les sollicitations dynamiques (routière, tramway, train...) ou encore la pression hydrostatique d'une nappe d'eau,...

Par leur intensité, ces chargements peuvent engendrer des dégradations d'ordre structurel pouvant aller jusqu'à la ruine totale de l'ouvrage. Le renforcement de ces ouvrages devient donc indispensable. Les techniques de réhabilitation sont diverses et variées : chemisage par béton projeté armé, coques préfabriquées, etc...

La technique couramment utilisée est la réalisation d'un chemisage en béton projeté armé de 6 à 8 cm d'épaisseur sur toute la section du collecteur. Les inconvénients majeurs de cette technique sont la réduction de la section hydraulique, la corrosion des armatures dans le temps, le flambement de l'acier et la difficulté de mise en œuvre [1].

Dans un souci de réduction des coûts et de définition de travaux de réhabilitation adaptés aux pathologies de ces ouvrages, plusieurs investigations ont été menées. Les travaux les plus importants portent sur la recherche de nouveaux matériaux pour le renforcement de ces ouvrages.

Il existe depuis les années 1990 en France, une technique de restructuration partielle utilisée dans le domaine du bâtiment. Il s'agit d'une réhabilitation par collage de plats ou de tissus composites à base de fibres de carbone. La technique de réhabilitation par plats composites a été transposée aux ouvrages d'assainissement en béton (armé ou non) à l'initiative de la société Structure & Réhabilitation. Cette technique a été mise au point au laboratoire dans le cadre d'une thèse réalisée par Kesteloot [2]. L'étude révèle une diminution des coûts de réparation de l'ordre de 50% par rapport aux techniques utilisées habituellement, ainsi qu'un accroissement de la capacité portante de 45%. Ce procédé fait actuellement l'objet d'une expérimentation sur un collecteur du Val-de-Marne de 10 m de longueur depuis janvier 2005. Aucune dégradation n'a été constatée à ce jour.

Le projet RESAME (REstructuration par chemisage mince sans réduction de section hydraulique et Sans Armatures MEtalliques) initié par un bureau d'études (Structure & Réhabilitation) et plusieurs entreprises françaises (Sika, Freyssinet, Lanko, Weber et Broutin) a pour but pour les ouvrages d'assainissement en maçonnerie visitables :

- De réduire les coûts de réhabilitation
- D'améliorer la durabilité des réparations (sans armatures métalliques)
- De diminuer le temps d'intervention sur le site.

Au cours de ces trente dernières années, les chercheurs ont étudié la possibilité d'utiliser de nouveaux matériaux, tels que les enduits à haute performance, et plus récemment les matériaux composites pour le renforcement d'ouvrages en maçonnerie [3].

Cette thèse est la continuité de la thèse de doctorat réalisé par Khoufache [4]. Après avoir présenté l'histoire et la construction des égouts de Paris dans la première partie de sa thèse, une étude paramétrique sur le comportement des ouvrages d'assainissement en maçonnerie a été effectuée. Des essais de caractérisation mécanique d'un mortier fibré ont été réalisés avant l'application à l'intrados sur les voûtes. Un essai de rupture sur une voûte renforcée par des tissus de carbone a donné et un gain de 185% par rapport aux voûtes non renforcées a été obtenu.

Le procédé de réhabilitation par mortier fibré est utilisé dans les cas de fissurations superficielles et de problème lié à l'étanchéité. Ce procédé a un coût de réparation moins élevé par rapport à la méthode de béton projeté de 6 cm et elle diminue que de très peu la section hydraulique.

Le procédé de renforcement par des matériaux composites est utilisable dans le cas des fissurations structurelles. Dans le cas des ouvrages en maçonnerie, la technique de collage des matériaux composites n'est pas applicable directement à ces ouvrages du fait de l'irrégularité du support. Il est nécessaire de réaliser un chemisage mince de 2 cm ayant les caractéristiques nécessaires pour transmettre les efforts de la maçonnerie aux matériaux composites.

Cette nouvelle étude concernent la mise au point du procédé pour des ouvrages d'assainissement en maçonnerie par :

- béton projeté armé de 6 cm (méthode standard)
- mortier fibré de 3 cm
- mortier fibré de 2 cm
- mortier fibré de 2 cm renforcés par des plats de carbone
- mortier fibré de 2 cm renforcés par des tissus de carbone.

La thèse s'articule autour de deux grandes parties :

La première partie (divisée en 3 chapitres) permet de faire le point sur la construction des ouvrages d'assainissement, l'utilisation des matériaux composites et la caractérisation des matériaux utilisés.

La seconde partie à caractère essentiellement expérimental est divisée en trois chapitres. Elle s'attachera à définir les paramètres d'études, à caractériser les matériaux et en particulier



l'interface enduit/colle. L'objectif principal de cette partie de l'étude est l'apport des renforts composites.

Le premier chapitre donne les différentes étapes de la construction des ouvrages d'assainissement visitables et des différents types des dégradations. Puis, les techniques d'auscultations et de réparations sont succinctement explicitées. La mise en évidence de l'absence de réparation ponctuelle, montre la nécessité de mettre au point un chemisage ponctuel mince avec renforcement par collage des matériaux composites.

Le deuxième chapitre présente les travaux de différents laboratoires sur les matériaux composites, leur application sur des structures planes ou courbes.

Le troisième chapitre donne les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés (mortier fibré haute performance, meulière, mortier liaison, plats et tissus de carbone) avant l'application sur des voûtes en maçonnerie.

Le quatrième chapitre étudie le comportement mécanique des ouvrages d'assainissement. Suite à cette compréhension, une simulation numérique des ouvrages d'assainissement est réalisée pour déterminer la géométrie des corps d'épreuves.

Les différentes étapes de la construction des voûtes en maçonnerie sont présentées avant les essais à la rupture des voûtes en maçonnerie non renforcées.

Les deux chapitres suivants décrivent les essais menés sur les voûtes renforcées par du mortier fibré (4 produits testés) et à l'aide de matériaux composites (tissus et lamelles de carbone). L'ensemble des procédés de renforcement sera comparés à une technique traditionnelle (béton projeté).

Enfin la conclusion résume les résultats obtenus lors de la thèse d'un point de vue scientifique, mais aussi technologique. Les perspectives de notre recherche seront énumérées.

## **Bibliographie**

[1] Restructuration des collecteurs visitables (2002, 2004), Guide technique, Tomes 1&2, Projet National RERAU.

[2] Kesteloot S. (2005), Réhabilitation des ouvrages d'assainissement par matériaux composites - Etude expérimentale et dimensionnement par calculs numériques », Thèse de Doctorat, Université d'Artois, Mars 2005.

[3] CNR-DT 2002/2004 (2004), Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, Rome, CNR July 13<sup>th</sup>.

[4] N. Khoufache (2008), Contribution à la restructuration des ouvrages d'assainissement en maçonnerie au moyen de matériaux composites, Thèse de Doctorat, Université d'Artois, Décembre 2008.

# Partie I

# Chapitre 1 :

## Les ouvrages d'assainissement

### Sommaire

Introduction .....	13
1. Ouvrages d'assainissement en maçonnerie.....	14
1.1 Histoire des égouts de Paris.....	14
1.2 Les ouvrages d'assainissement.....	15
1.3 Matériaux de construction des collecteurs en maçonnerie .....	16
2. Types de dégradation .....	19
2.1 Les défauts des pierres.....	20
2.2 Les altérations des joints : le déjointoiement.....	20
2.3 Fissurations .....	21
3. Techniques d'auscultation .....	21
3.1 Inspection visuelle .....	21
3.2 Auscultation par radar géophysique .....	21
3.3 Impédance mécanique .....	22
3.4 Système Avari.....	22
3.5 Vérinage interne .....	23
4. Techniques de réhabilitation .....	24
4.1 Injections de collage .....	24
4.2 Projection de béton armé .....	24
4.3 Eléments préfabriqués .....	25
Conclusion.....	26
Bibliographie .....	27

## Introduction

Les ouvrages d'assainissement sont constitués de différents matériaux (béton ou maçonnerie). Ils sont circulaires ou ovoïdaux. L'étude s'intéresse aux ouvrages d'assainissement visitables de forme ovoïde en maçonnerie. Les ovoïdes sont constitués d'une voûte, de piédroits et d'un radier.

Les structures en maçonnerie sont constituées de blocs de moellons et de joint de mortier. De part leur dimension, nous pouvons distinguer les collecteurs dont la hauteur intérieure est inférieure à 1,30 m, appelés collecteurs non visitables et les collecteurs dont la hauteur intérieure est supérieure à 1,30 m, appelés collecteurs visitables.

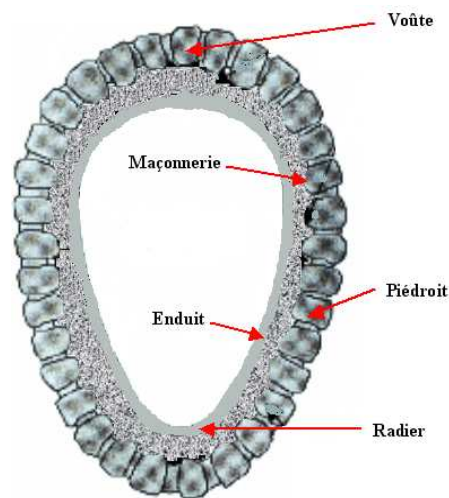


Fig. I- 1 : ovoïde en maçonnerie

A Paris, les premiers égouts furent ceux de Lutèce, où les Gallo-romains avaient capté des sources, et installé des thermes reproduisant le mode de vie des romains en plus petit [1]. Deux mille ans plus tard, le réseau d'égouts parisiens fait plus de 2000 km de long, auxquels s'ajoutent encore plusieurs milliers de kilomètres de canalisations dans le reste de l'agglomération parisienne. Une synthèse de l'histoire des égouts de Paris est donnée dans la thèse de Khoufache [2].

Au cours de leur vie, ces ouvrages peuvent se dégrader ou être amenés à changer de conditions d'exploitation. Les dégradations se traduisent par des fissures structurales dont l'origine peut être due à différentes causes :

- Modifications des charges d'exploitation : une augmentation des poids roulants entraînent une dégradation des ouvrages.
- Humaines : erreurs de conception ou d'exécution des ouvrages.

Ce chapitre s'intéresse d'une part aux définitions des ouvrages d'assainissement en maçonnerie et d'autre part aux matériaux de construction (mortier de liaison, meulière,...). Les pathologies propres aux réseaux d'assainissement de type visitable en maçonnerie, les techniques d'auscultation et enfin les techniques de réparation sont également abordées dans ce chapitre.

## 1. Ouvrages d'assainissement en maçonnerie

Les égouts de Paris ont fait l'objet de nombreux travaux descriptifs et historiques. Victor Hugo lui-même a consacré de longues pages dans les Misérables à magnifier l'horreur de ce que l'on pourrait appeler les intestins de la capitale [1]. M. Belgrand [3] en 1877 et M. Bechmann en 1888 [4] ont écrit des volumes très complets d'une clarté et d'une précision parfaites sur les égouts de Paris.

### 1.1 Histoire des égouts de Paris

L'histoire des égouts parisiens commence avec celle de la Lutèce gallo-romaine [1,5]. En 52 avant Jésus Christ, les romains, eux-mêmes grands consommateurs d'eau et experts en travaux hydrauliques, captent l'eau des sources situées dans la région de Cachan et la transportent à Paris. Les infrastructures souterraines étaient peu existantes. Ces ouvrages seront détruits par les Barbares en 285.

Dix siècles plus tard, les descriptions faites du Paris au Moyen âge [6], sont toujours aussi effarantes en matière d'hygiène. La première évocation dans les archives parisiennes d'un égout qui ne soit pas à l'air libre date de 1325 : il s'agit d'une galerie en voûte, l'égout l'Evêque, circulant sous l'Hôtel-Dieu pour déboucher dans la Seine. Ainsi, construit en 1374, le premier égout médiéval couvert longeait la rue Montmartre sur quelques centaines de mètres pour se déverser dans les fossés de l'enceinte de Charles V, eux-mêmes en communication avec la Seine. D'autres ouvrages, aussi modestes et inégalement couverts, ont été relevés rue du Ponceau, rue Meslay, rue de Turenne, rue Saint Antoine.....

En 1851, sur les propositions de l'ingénieur Mille, il fut adopté un nouveau type d'égout, déjà employé en Angleterre où il donnait toute satisfaction. Cet égout à section ovoïde était d'un gabarit suffisant pour que les ouvriers puissent y circuler aisément (Fig. I-2).

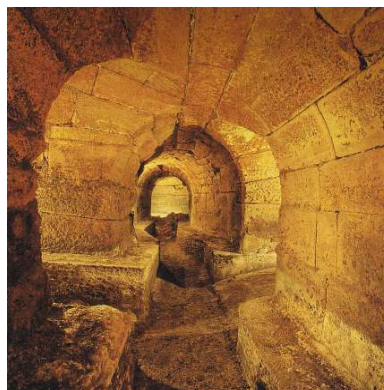


Fig. I- 2: collecteurs d'assainissement en meulière

Napoléon III prépara durant ses longues années d'exil à Londres, des plans d'aménagement de la ville. Arrivé au pouvoir en 1848, il compta sur la fidélité, la ténacité et l'audace de son Préfet de Seine, George Eugène Haussmann, pour lui permettre d'entreprendre ce qui pendant plusieurs décennies allait constituer le plus grand chantier du monde et permettre la

métamorphose de Paris. Celui-ci nomma l'ingénieur Eugène Belgrand, Directeur des Eaux et des Egouts de Paris.

Belgrand s'inspira de la « Cloaca maxima » de la Rome Antique. L'objectif de cette époque n'est il pas de faire de Paris « la vraie Rome du temps présent ». Haussmann et Belgrand réussirent à concevoir ce nouveau concept d'égouts grâce à l'aide de savants et de quelques médecins [7]. Ils discernèrent avec eux le rôle des matières organiques et des infiniment petits dans le développement des épidémies, avec Pasteur pour allié. Le projet Belgrand rompt délibérément avec les conceptions du passé.

De nos jours, l'évidence est que les équipements d'assainissement ont la propriété de durer et que les politiques mises en œuvre ne peuvent être rapidement infléchies en réponse aux nouvelles demandes de la société. Bien qu'ils soient masqués et de l'ordre du déchet, les réseaux d'assainissement font clairement partie de ces infrastructures qu'il faut gérer et entretenir dans la durée. Malgré les coûts induits, les collectivités doivent maintenir la pérennité de leur parc. Celui-ci commence seulement à être partiellement remis en cause.

### ***1.2 Les ouvrages d'assainissement***

Chaque année, un linéaire minimal de collecteur visitable de section moyenne 180 x 100 (T180) de 30 000 mètres est réhabilité [8]. A Paris intra-muros, plus de 1000 kms d'ouvrages vont être à réhabiliter dans les années à venir. La technique la plus souvent utilisée pour la réhabilitation de la majorité de ces ouvrages consiste à réaliser un chemisage en béton projeté armé de 6 à 8 cm d'épaisseur sur toute la section du collecteur.

Dans son « Traité pratique de la construction des égouts », Hervieu [9] explique la façon dont les ouvrages d'assainissement en maçonnerie doivent être construits en particulier en région parisienne, ainsi que les règles suivies pour la réalisation de ce type d'ouvrages. Ceux-ci sont construits en majeure partie avec de la meulière, compte tenu de ses qualités de résistance et de légèreté, ainsi que sa parfaite cohésion avec les mortiers. De plus, la plupart des carrières de meulière sont proches de Paris.

### ***1.3 Matériaux de construction des collecteurs en maçonnerie***

Selon la définition du groupe de travail n° 14 de l'AFTES [10], la maçonnerie est « un mode d'assemblage des moellons de pierres ou de briques se différenciant par leur appareillage, c'est-à-dire, le détail de la forme et la disposition des pierres ou briques dans un ouvrage. Par extension, cela s'applique aux ouvrages en béton non armé. »

La maçonnerie est un matériau composite ayant comme constituants des briques ou moellons et des joints. Ce matériau a des caractéristiques mécaniques propres et est influencé fortement par son environnement et sa mise en place. La maçonnerie a une bonne résistance à la compression et une faible résistance à la traction [11]. La caractéristique principale de la maçonnerie est sa souplesse due à l'assemblage des blocs liés par mortier, susceptible de se déformer avec une amplitude relativement grande.

Dans son ouvrage, Emile Gérard [1] donne quelques caractéristiques des maçonneries :

- Densité : 1800 à 2350
- Résistance à l'écrasement avec un mortier normal: 20 à 50 kg/cm<sup>2</sup>

#### **1.3.1 La meulière**

La meulière ou pierre meulière est une roche sédimentaire silicieuse [12], [13], [14] issue de la dissolution du calcaire et de la concrétion de silice. Elle est poreuse, ou à porosité fermée. C'est-à-dire qu'il n'y a pas de communication entre les pores, ce qui en fait une excellente pierre pour la construction. Cette pierre est extraite de carrières [15]. Elle se présente sous forme de blocs irréguliers dans une couche d'alluvions à peu près horizontale. Les qualités de cette pierre sont d'avoir le grain, fin homogène, de texture uniforme et compacte. Elle résiste à l'humidité et à la gelée. Elle n'éclate pas en cas d'incendie. De plus, elle présente de bonnes qualités de résistance et de légèreté ainsi qu'une parfaite cohésion avec les mortiers. C'est pour ces raisons que le service municipal de Paris avait décidé l'emploi exclusif de la meulière pour l'établissement du réseau d'assainissement parisien [16]. Le département de Paris, quoiqu'il soit le moins étendu en superficie est celui où il se trouve le plus grand nombre de carrières qui occupent presque toute son étendue [16]. Les pierres que l'on en retire sont disposées par lits ou bancs de différentes épaisseurs et duretés. Elles se présentent en blocs uniformes, ce qui implique des règles particulières de mise en œuvre. Il est indispensable de lui ôter ses impuretés, en particulier de la terre incluse dans les cavités, par un lavage ou un brossage ou alors la disposer d'avance plusieurs mois aux intempéries.

La recherche bibliographique sur les meulières met en évidence des textes qui relatent la technique de fabrication des meules ou les caractéristiques géologiques de la pierre mais ne donnent pratiquement pas les caractéristiques mécaniques de celles-ci. Duriez [17] fournit la courbe des normes Afnor en vigueur en 1969 ainsi que la courbe proposée par Mesnager. Les formules empiriques lissant ces courbes permettent d'estimer a priori la valeur de la résistance à la compression  $f_c$  en fonction de la densité volumique apparente  $d$ .

Selon Mesnager :

$$f_c = 15 \frac{d - 0.83}{2.82 - d} \quad (1)$$

Selon les normes AFNOR :

$$f_c = 12 \times 2^{(d - 1.97)} \quad (2)$$



### 1.3.2 La chaux

Bien que l'industrialisation de la fabrication du ciment se développe en France à partir de 1850, la chaux reste largement utilisée pour la construction des ouvrages, tout au long du XIX<sup>ème</sup> siècle [18]. Les chaux sont le produit de la cuisson de calcaire naturel issu d'une carrière.

Il existe deux types de chaux : les chaux aériennes et les chaux hydrauliques.

- Les chaux aériennes font prises uniquement au contact de l'air et donc jamais sous l'eau (les chaux dites « grasses » et « maigres » entrent dans cette catégorie).
- Les chaux hydrauliques peuvent faire prise sous l'eau et terminent leur durcissement au contact de l'air.

Les chaux aériennes contiennent uniquement du calcaire alors que les chaux hydrauliques contiennent en majorité de l'argile. C'est cette argile qui confère aux chaux leur caractère « hydraulique ».

Dans le cas des ciments de chaux, le mélange de calcaire et d'argile se fait artificiellement en proportion choisi avant cuisson. La différence entre la chaux et le ciment vient en grande partie de la température atteinte dans le four : de l'ordre de 1000°C dans le cas des chaux et jusqu'à 1400°C dans le cas des ciments.

Afin que la chaux, livrée en poudre dans des sacs plombés, soit admise pour son utilisation sur les chantiers municipaux de Paris, la pâte était mise sous l'eau au bout d'une heure et devait faire prise dans un délai maximum de trois jours. Vicat proposa la première classification des chaux suivant leur teneur en argile en 1818. Cette classification évolua plusieurs fois jusqu'à celle donnée par Durand-Claye. Ces chaux sont qualifiées par leur indice d'hydraulicité [18]. Cet indice est défini comme étant le rapport de l'argile aux carbonates de chaux.

Nature du calcaire	i1=argile/ carbonate de chaux	i2=argile/ chaux	Quantité d'argile contenue dans le calcaire en %	Prise [jours]
Faiblement hydraulique	0,05 à 0,09	0,10 à 0,16	5,3 à 8,2	16 à 30
Moyennement hydraulique	0,09 à 0,17	0,16 à 0,31	8,2 à 14,8	10 à 15
Simplement hydraulique	0,17 à 0,22	0,33 à 0,42	14,8 à 19,1	5 à 9
Eminemment hydraulique	0,22 à 0,28	0,42 à 0,50	19,1 à 21,8	2 à 4

Tableau I- 1: classification des chaux selon Durand-Claye.

En 1981, A. Lootvoet [18] a rassemblé les essais de Vicat et de Rondelet et a indiqué que les mortiers de chaux ayant servi à hourder la plupart des maçonneries du XIX<sup>ème</sup> siècle ont une résistance comprise entre 20 et 60 kg/cm<sup>2</sup>. A la même époque, le SETRA a publié son dossier pilote VOUTE [10] et à partir des mêmes éléments, a conclu que la résistance des mortiers de chaux en compression simple est comprise entre 2 et 7 MPa.

### 1.3.3 Le ciment

#### 1.3.3.1 Les ciments de Vassy et de Portland

Pour les égouts en particulier, la substitution du mortier de ciment au mortier de chaux a fortement permis de réduire l'épaisseur des structures en maçonneries. Les ouvrages d'assainissement en maçonnerie formant le réseau parisien sont construits de meulière hourdée au mortier de ciment de Vassy, de Portland ou de laitier. Les enduits de voûtes et de piédroits sont confectionnés en mortier analogue d'un dosage différent. Ceux des parties exposées au contact permanent de l'eau (cunette, banquettes, murs et radiers, etc.) sont réalisés en utilisant du mortier de ciment de Portland [9].

#### 1.3.3.2 Le ciment de laitier

A l'époque de la fabrication des égouts, la découverte du ciment de laitier ne remontait qu'à quelques années. La composition des laitiers employés pour la fabrication des ciments, serait représentée par la formule  $2 \text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, 3 \text{CaO}$ . A sa sortie du four, le laitier est plongé dans l'eau. Il se désagrège et prends l'aspect du sel marin, sous cet état, il est appelé laitier granulé. Après dessiccation et réduction en poudre fine, ce laitier est mélangé avec de la chaux éteinte dans une proportion correspondant à 30 à 40% de chaux pour 60 à 70% de laitier. Le ciment de laitier présente une densité de 2,7 à 2,8. Le mélange de sable et de ciment de laitier fait prise assez lentement et le durcissement sous l'eau ne se fait qu'au bout de 15 à 20 heures. Ces mortiers donnent de bons résultats pour les travaux sous l'eau ou en contact avec l'air humide.

### 1.3.4 Le mortier

Les mortiers sont des mélanges pâteux destinés à relier entre eux les matériaux constitutifs des maçonneries : ils sont en général composés de chaux, de sable qui a la propriété de durcir, d'unir fortement les pierres et de faire corps avec elles.

Le sable possède un rôle purement mécanique. Il augmente le volume du mortier et réduit son prix de revient. Il s'oppose au retrait provenant de la prise des liants. Il augmente la résistance du mortier.

### 1.3.5 La maçonnerie

Thépot [19] écrit que d'une manière générale, la résistance à la compression de la maçonnerie décroît avec celle des pierres et des mortiers. Il propose des valeurs de résistance de compression en fonction de la résistance à la compression des pierres et du mortier qui sont résumés dans le tableau I- 2. Les valeurs de résistance sont comprises entre 2 et 7 MPa. Il s'agit de maçonnerie à joints de mortier peu épais, en compression perpendiculairement au lit.

Résistance caractéristique à la compression simple des pierres [MPa]	Résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie suivant sa composition [MPa]			
	Mortier M4 (2,5 MPa)	Mortier M3 (5 MPa)	Mortier M2 (10 MPa)	Mortier M1 (20 MPa)
2	1,3	1,4	1,4	1,4
5	2,9	3,3	3,4	3,5
10	4,1	4,7	5,3	6,2
15	5,1	5,9	6,7	8,2
20	6,1	6,9	8,0	9,7
30	7,2	8,6	10,2	12,0

Tableau I- 2 : résistance caractéristique à la compression simple des maçonneries (Recommandations Internationale pour les Structures en maçonnerie) [8]

La résistance à la traction de la maçonnerie est souvent négligée car elle n'intervient pas dans la stabilité des ouvrages habituels (voûtes, murs, piliers). La rupture en traction de la maçonnerie est brutale (rupture fragile) et par conséquent délicate à mesurer. Les valeurs de résistance en traction sont plus dispersées que celles en compression. Toutefois, la stabilité des ouvrages enterrés dépend aussi de la résistance en traction de la maçonnerie.

## 2. Types de dégradation

Une enquête sur l'état de dégradations des ovoïdes visitables en maçonnerie de meulière, situés en région parisienne, a été effectuée par Khoufache [2] à partir d'études réalisées par la société Structure & Réhabilitation [20]. Cette enquête est basée sur une trentaine d'études de diagnostic et préconisation de travaux réalisées depuis une dizaine d'années.

Les pathologies des collecteurs d'assainissement sont nombreuses [8]. Ces anomalies se traduisent principalement par des fissures longitudinales au niveau des piédroits et en voûte. Ces défauts sont souvent accompagnés de fissures transversales. Ces dégradations peuvent être la conséquence de plusieurs facteurs [8] comme les surcharges, les attaques chimiques et la vétusté des ouvrages. Avant d'entreprendre des travaux de réparation, il est donc nécessaire de connaître les pathologies mais aussi leurs origines.

Ces dernières sont obtenues à partir d'auscultations visuelles, géométriques ou mécaniques. La plupart des essais mécaniques sont basés sur des essais de vérinage intérieur qui consistent à ovaliser la conduite testée et permettent de mesurer la rigidité globale du collecteur et d'en déduire le module de Young. Ces essais sont accompagnés de prélèvements par carottages pour valider la qualité de la maçonnerie. Les pathologies communes aux ouvrages d'assainissement en maçonnerie et en béton [8] sont :

- les dégradations superficielles : faïençage, usure de revêtement, décollement d'enduit,
- les dégradations dues aux attaques chimiques notamment en présence d' $H_2S$ ,
- les dégradations structurelles : affaissement de voûte, divergence ou convergence des piédroits, affaissement du radier, éclatement de l'ouvrage,
- les déformations : déversement de l'ouvrage, affaissement localisé de l'ouvrage,

- les défauts d'étanchéité : déversement de l'ouvrage, affaissement localisé de l'ouvrage,
- les défauts d'étanchéité : infiltration, exfiltration, suintements, concrétions,
- les fissurations : longitudinales, transversales, obliques, annulaires.

Les dégradations principales des ouvrages d'assainissement visitables en maçonnerie sont décrites ci-dessous.

### ***2.1 Les défauts des pierres***

Les pierres matériaux constitutifs des réseaux d'assainissement en meulière peuvent subir deux types d'altérations suite à des infiltrations d'eau dans le collecteur (Fig. I- 3) : les alvéolisations et les desquamations. Les alvéolisations sont des altérations continues. La pierre perd sa cohésion en surface sur quelques millimètres de profondeur : la couche sous-jacente restant saine, la couche désagrégée tombe en poudre ou en grains et l'altération se poursuit en profondeur. L'alvéolisation peut affecter les mortiers de joints.

Les desquamations (ou maladie en plaques) sont des altérations cycliques dont la symptomatologie apparaît plus fluctuante que celle des alvéolisations. A la surface des pierres, se forme une croûte dure souvent appelée « calcin » qui peut avoir une épaisseur très variable de quelques dixièmes de millimètres à plusieurs centimètres. Derrière cette croûte se forme une zone poudreuse ou sableuse très peu cohérente d'épaisseur variable. Après un certain temps, la plaque externe se fissure ou se cloque et fini par tomber en entraînant la chute de la zone pulvérulente. Ce cycle peut se reconstituer ensuite sur une nouvelle surface.



Fig. I- 3: défauts des pierres en présence d'infiltrations d'eau

### ***2.2 Les altérations des joints : le déjointoiement***

Le déjointoiement (Fig. I- 4) est une disparition totale ou partielle du mortier constituant les joints d'un ouvrage en maçonnerie non enduite. Ce phénomène s'accompagne généralement d'une érosion des pierres. Il peut se produire une désagrégation du mortier de hourdage par les eaux d'infiltration.



Fig. I- 4 : déjoints de maçonnerie

### ***2.3 Fissurations***

Pour les ouvrages en maçonnerie, il est important de distinguer les fissures soulignant l'enduit et les joints de liaison de celles affectant les éléments de structure de la maçonnerie (blocs). Les premières sont des discontinuités mécaniques partielles ou totales, les secondes sont liées à des dépassements de la limite de résistance des éléments. Les fissures affectant l'enduit sont généralement superficielles et ne présentent pas de préjudices vis à vis de la tenue structurelle de l'ouvrage.

Un simple traitement de ces fissures est souvent préconisé. Par contre, les fissures affectant les éléments de structure d'un ouvrage en maçonnerie sont le signe d'un dysfonctionnement du comportement mécanique de l'ouvrage. Un renforcement structurel est recommandé dans ce cas. Les types de fissures rencontrés dans le cas des ouvrages en maçonnerie sont identiques à ceux des ouvrages en béton.

Avant d'entreprendre des travaux de réparation, il est donc nécessaire de connaître les pathologies mais aussi leurs origines. Ces dernières sont obtenues à partir d'auscultations visuelles, géométriques ou mécaniques. La plupart des essais mécaniques sont basés sur des essais de vérinage intérieur qui consistent à ovaliser la conduite testée et permettent de mesurer la rigidité globale du collecteur et d'en déduire le module de Young. Ces essais sont accompagnés de prélèvements pour valider la qualité de la maçonnerie.

## **3. Techniques d'auscultation**

### ***3.1 Inspection visuelle***

Dans le cas des études des canalisations non visitables, les ingénieurs effectuent leurs inspections à l'aide de robots. Pour les ouvrages inaccessibles (centrale nucléaire, barrage, viaduc,...), des drones sont utilisés. Dans le cas des ouvrages visitables, ils effectuent des inspections visuelles à l'œil. Les résultats des inspections détaillées sont donnés sur planches graphiques, documents photographiques, supports vidéo et informatiques.

### ***3.2 Auscultation par radar géophysique***

Le principe est basé sur la réflexion d'ondes électromagnétiques rencontrant des hétérogénéités. Le radar géophysique (Fig. I- 5), méthode à haut rendement, est couramment

appliqué à l'auscultation des ouvrages souterrains (tunnels, galeries, voûtes...) en béton ou en maçonnerie dans le cadre d'un diagnostic d'état avant ou après travaux.

L'auscultation RADAR peut être effectuée à partir de la surface du sol, à l'intérieur des ouvrages enterrés ou dans les structures de génie civil.

Le radar permet :

- L'auscultation des maçonneries dans leur épaisseur et en continu
- La détection de vides ou de décollements à l'extrados des galeries au niveau de leur contact avec le terrain
- Le repérage d'anomalies dans l'environnement proche de l'ouvrage (cavités, fissures, zones argileuses ou humides, terrain hétérogène)



Fig. I- 5 : auscultation par radar géophysique

### ***3.3 Impédance mécanique***

Le principe consiste à appliquer un choc sur l'élément de la structure à tester à l'aide d'un marteau équipé d'un capteur de force et mesurer la vibration induite à l'aide d'un accéléromètre (Fig. I- 6). L'essai permet de détecter les vides à l'extrados des structures et de qualifier le contact sol/structure. Il s'applique à des matériaux homogènes et est difficilement applicable à des maçonneries.



Fig. I- 6 : impédance mécanique

### ***3.4 Système Avari***

Ce système est basé sur le principe d'impédance mécanique (Fig. I-7). La structure est sollicitée par l'émission d'un choc et l'analyse des déplacements dynamiques induits en un

certain nombre de points. L'essai permet de détecter les vides à l'extrados des structures, de qualifier la nature et l'épaisseur des structures.



Fig. I- 7 : système Avari

### ***3.5 Vérinage interne***

Ce procédé d'auscultation mécanique est un essai in situ qui consiste à soumettre l'ouvrage à un effort d'ovalisation à l'aide d'un vérin (Fig. I- 8). L'essai est instrumenté avec des capteurs de déplacement. Ce procédé est adapté à l'appréciation des caractéristiques mécaniques des structures enterrées. L'essai permet de qualifier la qualité des interfaces sol-structure et de détecter les zones vides à l'extrados. Cette technique est particulièrement adaptée pour le contrôle des travaux d'injection des ouvrages enterrés.

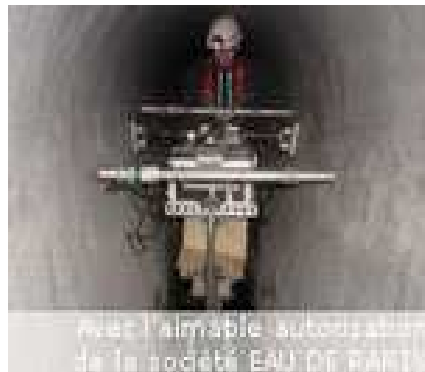


Fig. I- 8: vérinage interne

Les principaux travaux effectués pour la réhabilitation [19] des collecteurs présentant les pathologies rencontrées dans notre enquête, consistent en la réalisation d'injections de collage avec effet de régénération, visant à consolider les parties affectées, puis la restructuration de ces ouvrages par la réalisation de chemisages en béton armé en voûte et piédroits, soit la majeure partie de la section intérieure, même si des parties ne présentent pas des dégradations. Une autre technique de réparation consiste à utiliser des éléments préfabriqués. Ces techniques induisent des réductions significatives de la section hydraulique des collecteurs. De ce fait, la mise en place d'un renforcement ponctuel sur les zones concernées par la dégradation, pourrait permettre de diminuer les coûts des réhabilitations.

#### 4. Techniques de réhabilitation

Plusieurs types de réhabilitation existent [8] :

- Les injections
- Projection du béton armé de 6 cm à 10 cm d'épaisseur
- Pose des éléments préfabriqués

##### 4.1 Injections de collage

Le but de ce procédé est d'améliorer les caractéristiques mécaniques du milieu traité et de rétablir la liaison de l'ouvrage avec le terrain en traitant l'interface sol/structure. L'injection est un procédé largement utilisé dans les travaux de réhabilitation des ouvrages dont les caractéristiques mécaniques sont très faibles (Fig. I- 9). Le procédé consiste à injecter dans le sol, à l'aide d'une technique appropriée, à partir des forages, un coulis dont la composition (ciment, bentonite, adjuvants, eau,...) et les caractéristiques sont bien déterminées, suffisamment fluide pour pénétrer dans le réseau poreux du sol [8].

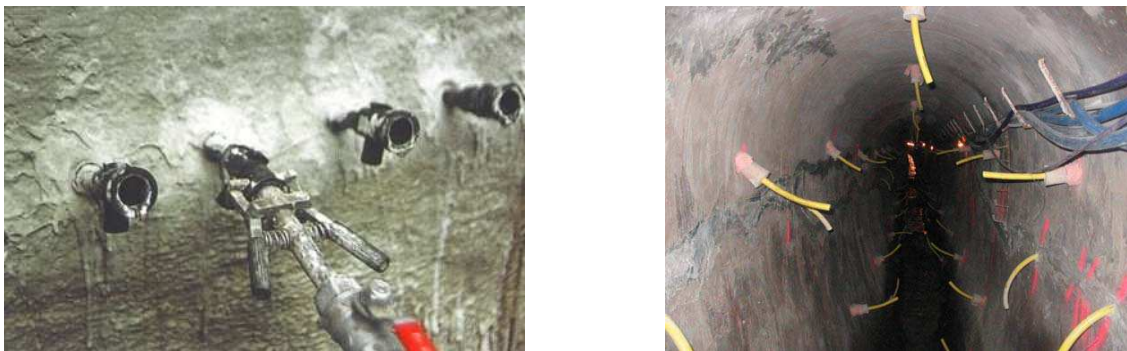


Fig. I- 9 : mise en place des canules d'injections

##### 4.2 Projection de béton armé

Un béton projeté est constitué d'un mélange de granulats, de ciment et d'eau et projeté à l'aide d'air comprimé. Le but de ce procédé est d'améliorer la résistance mécanique de l'ouvrage en place. Il faut distinguer deux techniques de projection (Fig. I- 10), suivant le moment d'introduction de l'eau dans la chaîne :

- Voie sèche : sans ou avec pré-mouillage. L'eau ne sera introduite qu'au niveau de la lance (voie sans pré mouillage), ou bien plus en amont dans la conduite de transport (voie avec pré mouillage). Cette technique est couramment utilisée dans les ouvrages d'assainissement.
- Voie mouillée : à flux dense ou à flux dilué. L'eau est introduite au malaxage du béton. Pour le flux dense, on introduit l'air comprimé à l'extrémité de la conduite de projection, et pour le flux dilué, on introduit l'air comprimé à la sortie de la machine.



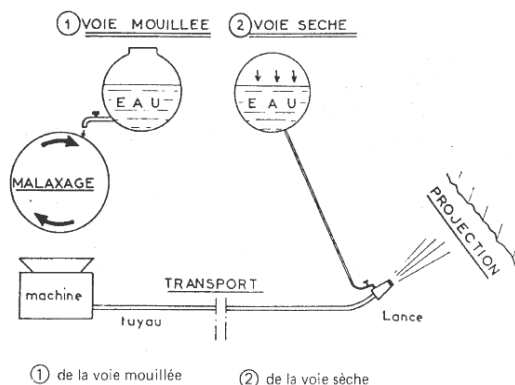


Fig. I- 10: voie sèche et mouillé



Fig. I- 11 : ouvrage renforcé par béton projeté [21]

Les inconvénients majeurs de cette technique sont la réduction de la section hydraulique, la corrosion des armatures avec le temps et le flambement de l'acier (Fig. I- 11).

### 4.3 Eléments préfabriqués

Afin d'améliorer et de rétablir les performances de l'ouvrage, des éléments préfabriqués sont mis en place sur tout ou partie de la section (Fig. I- 12). Cette technique est composée de deux phases : la mise en place d'éléments préfabriqués rigides ou flexibles puis la mise en œuvre d'un matériau de blocage entre les éléments préfabriqués et l'ouvrage existant. Les éléments de coques préfabriqués destinés à la réhabilitation par tubage avec ou sans espace annulaire comprennent :

- des coques entières de formes circulaires ou non,
- des cunettes ou coques partielles.

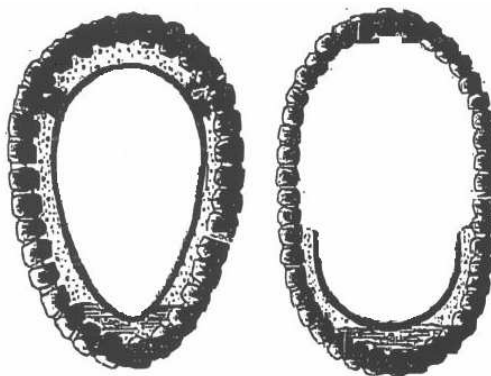


Fig. I- 12 : principe de réhabilitation par coque complète et partielle

Le système de coques préfabriquées est utilisé pour des rénovations sans tranchée, d'ouvrages visitables ou non notamment en brique, ciment, meulière, béton armé ou non et assurant le transport d'eaux pluviales, usées ou industrielles. Les ouvrages réhabilités peuvent être préfabriqués ou non et de sections variables, normalisées ou non.

Après préparation de l'ouvrage à réhabiliter, la mise en place des coques PRV est effectuée selon les règles précises et comprend au minimum les phases suivantes (Fig. I- 13) :

- Calage et étaieement selon les recommandations en prenant soin d'en respecter le nombre, l'emplacement et de ne pas déformer ou abîmer les coques ;
- Remplissage du vide annulaire par injection de coulis ;
- Fermeture des trous d'injection à l'aide des bouchons livrés à cet effet ou par scellement à l'époxy des carottes récupérées lors du perçage ;
- Injection du vide annulaire à l'aide d'un coulis à base de ciment. L'injection s'effectue à débit et pression contrôlée et en plusieurs phases. Dans certains cas un étaieement intérieur vertical et/ou horizontal peut s'avérer nécessaire.

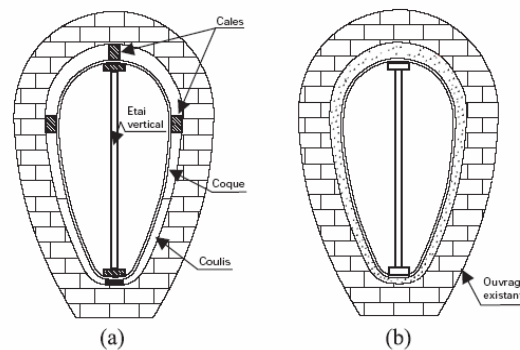


Fig. I- 13 : principe de calage de coques complètes avec étaie vertical

## Conclusion

Les techniques de construction et les matériaux ont pu être évoquées dans ce chapitre. Les matériaux utilisés en maçonnerie pour notre étude, sont la pierre meulière présente aux alentours de Paris. La bibliographie cite quelques valeurs de résistance à la compression. Une étude expérimentale est nécessaire pour déterminer les lois de comportement des différents matériaux et valider les procédés de réhabilitation.

Le chapitre suivant définit les matériaux composites et montre l'utilité de ces matériaux dans le renforcement des ouvrages en maçonnerie.

## **Bibliographie**

- [1] E. Gérard (1908), Paris souterrain, Edition Sides, réédité en 1991.
- [2] N. Khoufache (2008), Contribution à la restructuration des ouvrages d'assainissement en maçonnerie au moyen de matériaux composites, Thèse de Doctorat, Université d'Artois, Décembre 2008.
- [3] E. Belgrand (1887), les travaux souterrains de Paris V, deuxième partie-les égouts de Paris, Dunod.
- [4] Gérard Bechmann (1888), salubrité urbaine, distribution d'eau, assainissement, Encyclopédie des travaux publics, Paris, Baudry et Cie.
- [5] A. Clément et Gilles Thomas (2001), Atlas du Paris Souterrains. La doublure sombre de la ville lumière. Editions Parigramme.
- [6] J. Favier (1997), Paris deux mille ans d'histoire, Edition Fayard, p. 214-227.
- [7] M. F. Pointeau (1995), Rendre l'eau à la vie, 1970,1995, 25e anniversaire du SIAAP, Editions CEP Euro.
- [8] Restructuration des collecteurs visitables (2002, 2004), Guide technique, Tomes 1&2, Projet National RERAU.
- [9] J. Hervieu (1897), Traité Pratique de la Construction des Egouts, Paris BAUDRY & CIE Editeurs.
- [10] Nomenclature des parties d'ouvrages des tunnels (1980), AFTES Groupe travail n°14. Avril 1980.
- [11] Emile Olivier (1999), Les maçonneries, Technologie des méthodes de construction, T. 2, Lavoisier, p.6-12.
- [12] Jean Baptiste Rondelet (1868), Traité théorique et pratique de l'art de bâtir, Atlas, p. 162-172.
- [13] Jean Jung (1969), Précis de Pétrographie, Masson et CIE, Editeurs, p. 54 à 154.
- [14] Lucien Cayeux (1929), Les roches sédimentaires de France – Roches siliceuses, Paris, Imprimerie Nationale, p.621-661.
- [15] Agapain (2002), Les meuliers – Meules et pierres meulières, Presses du village, p.35 -47 Et p.111-150.

- [16] Michel Prat (1997), Calcul des ouvrages généraux de construction, Hermès.
- [17] Marius Duriez, Jean Arrambide (1962), Traité de matériaux de construction, T. 1, p.40.
- [18] Nathalie Domede (2006), Méthode de requalification des ponts en maçonnerie, Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse.
- [19] Olivier Thépot (2004), Prise en compte des caractéristiques en petites déformations des sols dans l'étude du comportement des collecteurs enterrés, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [20] Structure & Réhabilitation, Bureau d'études techniques, laboratoire d'essais et de contrôle, Bagnolet.
- [21] Kesteloot Stephan (2005), « Réhabilitation des ouvrages d'assainissement par matériaux composites: Etude expérimentale et dimensionnement par calculs numériques », Thèse de Doctorat, Université d'Artois.

## Chapitre 2 :

### Utilisation des matériaux composites dans les structures en maçonnerie

#### Sommaire

Introduction .....	30
1. Matériaux composites .....	31
1.1 Qu'est-ce qu'un matériau composite ? .....	31
1.2 Les grandes familles de matériaux composites .....	31
1.2.1 Classification selon leurs performances .....	31
1.2.2 Classification selon la nature de la matrice .....	32
1.2.3 Les différents types de renfort.....	32
1.3 Les propriétés des matériaux composites .....	33
1.3.1 Propriétés générales.....	33
1.3.2 Propriétés mécaniques.....	33
1.4 Les domaines d'application des composites dans le Génie Civil.....	33
2. Renforcement de structures planes .....	35
2.1 Essais sur les surfaces planes non renforcées .....	36
2.2 Essais sur les surfaces planes renforcées .....	36
3. Etude des structures courbes .....	39
3.1 Comportement des structures courbes .....	39
3.2 Renforcement des structures en courbe .....	40
3.3 Essais réalisés sur des arcs renforcés.....	41
Conclusion.....	56
Bibliographie.....	58

## Introduction

La recherche de nouveaux procédés de restructuration afin de réduire les coûts de réparation, amène à réfléchir sur l'application des méthodes ponctuelles de réhabilitation. L'objectif du renforcement par des nouvelles techniques (mortier fibré haute performance et matériaux composites) est de rendre à l'ouvrage existant son état structural initial et d'accroître sa capacité. Ce type de réhabilitation permet d'éviter la pose d'aciers en milieu agressif et également de conserver la section hydraulique de l'ouvrage, contrairement à la technique de mise en place d'un chemisage en béton projeté armé d'une épaisseur importante (6 à 8 cm) avec risque de corrosion des armatures. En outre les durées de remise en service de l'ouvrage sont diminuées.

Kesteloot [1] a réalisé une étude relative au renforcement des ovoïdes en béton armé à l'aide des matériaux composites, un gain de charge de 50% a été obtenu par rapport aux ovoïdes en béton armé non renforcés. Les résultats de cette étude ont montré l'adaptabilité et les avantages apportés par l'application de ce nouveau procédé sur les collecteurs en béton armé visitables de forme ovoïdales. Ce procédé a été appliqué sur un chantier à Saint Maur des fossés dans le département du Val-de-Marne (94) en 2005. Aucune dégradation n'a été constatée à ce jour (Fig. II- 1).



Fig. II- 1: ouvrages renforcées par matériaux composites

Cependant cette technique de collage de plats composites n'est pas applicable directement aux ouvrages d'assainissement en maçonnerie du fait de l'hétérogénéité, en terme de forme et de résistance du support. En effet, il est nécessaire de valider la réalisation d'un chemisage mince ayant les caractéristiques nécessaires pour transmettre les efforts de la maçonnerie aux matériaux composites.

L'objectif principal de notre étude est de mettre au point deux nouveaux procédés de restructuration par chemisage mince non armé et par collage de matériaux composites (lamelles et tissus à base de fibre de carbone). Pour l'application des renforts composites à base de fibres de carbone, il est nécessaire du fait de l'hétérogénéité des matériaux constitutifs et les problèmes liés aux nombreuses interfaces de réaliser une étude approfondie avant d'effectuer les essais à l'échelle 1 en laboratoire.

Dans ce chapitre, une définition des matériaux composites et leurs applications sont présentées. Des essais réalisés dans différents laboratoires sur le renforcement des structures planes et courbes par des matériaux composites.

## 1. Matériaux composites

De nos jours, les matériaux composites à base de fibres et de matrices sont utilisés dans de nombreux secteurs industriels : le transport aérien, maritime et ferroviaire, l'aérospatial, les sports et loisirs, mais ils trouvent également leur application dans le domaine du Génie Civil. Nous nous intéresserons principalement dans cette partie, aux matériaux composites employés dans le secteur du BTP et présenterons les notions requises à une bonne compréhension de la suite de l'étude.

### 1.1 Qu'est-ce qu'un matériau composite ?

Un matériau composite résulte d'un assemblage de deux ou plusieurs matériaux : l'assemblage obtenu présentant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs.

Tous les matériaux composites présentent la même constitution :

- un renfort, qui joue le rôle d'ossature et assure la tenue mécanique,
- une matrice, qui a un rôle de liant et permet ainsi la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort.

Dans le domaine du bâtiment, le matériau composite le plus connu est le béton armé : l'acier qui représente le renfort, et le béton correspondant à la matrice.



Fig. II- 2: mise en œuvre de béton armé [2]

### 1.2 Les grandes familles de matériaux composites

#### 1.2.1 Classification selon leurs performances

On distingue deux grands types de matériaux composites :

- les composites « Grande Diffusion », notés GD,
- les composites « Haute Performance », notés HP.

Les composites GD sont les plus couramment utilisés, et sont en général des plastiques armés ou plastiques renforcés.

Les composites HD sont quant à eux, employés dans le domaine aéronautique ou aérospatial. Le coût de ce type de matériaux est très élevé en raison du pourcentage de renforts présents (>50%) : ils présentent ainsi des propriétés mécaniques supérieures aux composites GD.

Dans le cadre de notre étude, le matériau que nous avons utilisé appartient à la famille des composites « Grande Diffusion », en raison du faible coût financier qu'il représente au vue des composites HP et vis-à-vis de son domaine d'application, le BTP [3].

### 1.2.2 Classification selon la nature de la matrice

Les matériaux composites peuvent être classés en trois grandes familles, en fonction de la nature de la matrice qui les compose :

- les composites à Matrices Organiques, notés CMO,
- les composites à Matrices Céramiques, notés CMC,
- les composites à Matrices Métalliques, notés CMM.

Les composites à Matrices Organiques, famille à laquelle appartient le matériau que nous avons utilisé, regroupent deux matrices différentes :

- les thermodurcissables (résine polyester insaturé, résine époxy, résine phénolique...),
- les thermoplastiques (polypropylène, polyamide ...).

Lors de notre étude, nous avons utilisé un matériau composite constitué à partir d'une matrice de résine époxy, qui correspond donc aux thermodurcissables : c'est-à-dire que le matériau se transforme après traitement thermique, via une réaction de polymérisation, pour donner un produit fini solide [4].

### 1.2.3 Les différents types de renfort

Il existe différents types de renfort parmi lesquels les plus employés dans le domaine du Génie Civil sont [5]:

- les fibres de verre : les fibres de verre sont les plus utilisées de nos jours, en raison du faible coût de production qu'elles représentent.
- les fibres de carbone : les fibres de carbone, dont le coût est un peu plus élevé, sont généralement employées pour des applications structurantes : c'est ce type de renfort qui constitue le matériau composite utilisé lors de nos essais.
- les fibres d'aramide : les renforts, type fibres d'aramide, se retrouvent traditionnellement dans les protections balistiques, telles que les protections pare-balles.



Fig. II- 3 : fibre de verre [5]



Fig. II- 4 : fibre de carbone [6]



Fig. II- 5 : fibre d'aramide [7]



### 1.3 Les propriétés des matériaux composites

#### 1.3.1 Propriétés générales

Les avantages et inconvénients des matériaux composites, énoncés dans le tableau ci-dessous, présentent les propriétés générales de ces matériaux.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"><li>- Masse très faible (par rapport aux aciers) → Facilité de mise en œuvre → Coût de construction/réparation moins élevé</li><li>- Pas de corrosion (sauf contact aluminium-fibres de carbone)</li><li>- Insensibilité aux produits chimiques (graisses, peintures, solvants) → sauf décapants de peinture avec résines époxydes</li><li>- Isolation électrique et transparente aux ondes électromagnétiques → utilisation possible en milieu corrosif ou milieu électronique</li><li>- Toutes sections et longueurs possibles (coloration également envisageable dans le cas de résines)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Coût de fabrication assez élevé (par rapport aux matériaux traditionnels)</li><li>- Résistance aux impacts et aux chocs très moyenne (&lt; aux matériaux métalliques)</li><li>- Température d'utilisation limitée (cas des matrices plastiques)</li><li>- Vieillessement sous l'effet des rayons UV</li><li>- Tenue au feu assez réduite</li><li>- Recyclage impossible (pour la plupart des matériaux)</li><li>- Durabilité méconnue</li></ul>

Tableau II- 1 : comparaison entre les matériaux composites [8]

#### 1.3.2 Propriétés mécaniques

En raison des différents procédés de fabrication qui existent pour les composites, ces matériaux sont généralement « anisotropes ». Le principal intérêt d'utiliser des matériaux composites est qu'ils présentent des propriétés mécaniques nettement supérieures aux matériaux pris séparément.

En effet, les matériaux composites ont une très grande résistance à la fatigue : ils présentent une tenue deux fois plus élevée que celle des aciers à haute résistance. Cependant, ils ne présentent aucune caractéristique plastique : il y a donc rupture brusque et soudaine des matériaux composites lorsqu'ils ont atteint leur limite élastique.

### 1.4 Les domaines d'application des composites dans le Génie Civil

Dans le secteur du BTP, les matériaux composites sont habituellement employés pour la réparation ou le renforcement d'ouvrages. En effet, compte tenu de leurs propriétés

mécaniques très élevées, les composites permettent de renforcer des éléments de structure. Le choix du renfort utilisé pour le composite se porte généralement sur les fibres de carbone puisqu'elles présentent une bonne résistance à la traction et à la compression, et un module d'élasticité assez élevé [9].

Les renforcements structuraux constitués de carbone s'appliquent à des structures en béton armé ou précontraint, en bois, en maçonnerie de briques ou encore aux maçonneries de pierres.

Les domaines d'application des matériaux composites sont :

- **l'accroissement de la résistance des structures aux moments de flexion**



Fig. II- 6 : mise en place des lamelles sur une poutre [9]

- **l'accroissement de la rigidité des structures en bois**



Fig. II- 7: mise en place des lamelles sur une structure bois [9]

- **l'accroissement de la résistance de parois en briques aux efforts sismiques**



Fig. II- 8 : mise en place des lamelles sur un mur en briques [9]

– **l'accroissement de la résistance à l'effort tranchant**



Fig. II- 9 : mise en place d'équerres de renforcement sur une poutre en Té [9]

– **le renforcement de piles et poteaux**



Fig. II- 10: mise en place de lamelles de carbone autour d'un poteau [9]

Comme nous l'avons présenté ci-dessus, les matériaux composites sont couramment employés pour le renforcement d'éléments structuraux (poutres, poteaux, dalles ...). Il peut s'agir de travaux de réhabilitation de bâtiments, de parkings, de canalisations ... mais les composites sont également utilisés dans le renforcement d'ouvrages d'art.

Les caractéristiques mécaniques finales des matériaux composites dépendent de celle des fibres. Une étude de comparaison qualitative entre les fibres de carbone, d'aramide et de verre a été menée par Meier [10]. Cette étude prend en compte un ensemble de critères (résistance à la traction, à la compression, module d'élasticité, comportement à la fatigue...), qui doivent satisfaire une opération de renforcement. Il résulte que les fibres de carbone présentent les meilleurs critères.

De plus la résistance aux agressions chimiques évite toute dégradation à long terme du matériau composite par corrosion. Les fibres de carbone sont donc les mieux adaptées aux problèmes de renforcement de structures. Ils existent sous formes de tissus ou plats.

Une recherche bibliographique sur des structures en maçonnerie (plans ou courbes) a été menée afin de définir les paramètres de la campagne expérimentale.

## **2. Renforcement de structures planes**

Différents laboratoires ont travaillé sur des murets non renforcés puis renforcés afin de comprendre le comportement et le mécanisme de ruine des structures maçonnées.

### **2.1 Essais sur les surfaces planes non renforcées**

Gabor [11], dans le cadre d'une étude sur le comportement d'ouvrages en maçonnerie situés en zone sismique, a réalisé des essais de compression diagonale sur des panneaux en briques creuses de dimension (87 x 84 x 10 cm<sup>3</sup>). Construits suivant les recommandations techniques de la RILEM, les murs ont été testés après 28 jours de cure à température ambiante. Les angles de la diagonale ont été encastrés. Trois cas ont été étudiés avec des conditions aux limites différentes : un panneau avec  $r = L/10$  et les deux autres avec  $r = L/6$  ( $r$  représentant la longueur d'encastrement d'angle et  $L$  la longueur du mur).

Dans le cas où  $r = L/10$ , la rupture est localisée par le glissement et l'écrasement des joints au voisinage de la zone d'appui. Cette rupture est apparue pour une force de chargement égale à 160 kN. Pour éviter ce type de rupture localisée, les conditions aux limites ont été changées en augmentant la longueur d'encastrement à  $r = L/6$ .

Quand  $r = L/6$ , la rupture s'est produite sur toute la longueur diagonale du mur par un glissement des joints de mortier et une rupture par traction des briques, comme le montre la Fig. II- 11. La charge à la rupture est égale à 215.3 kN pour le premier mur et à 251.8 kN pour le second.

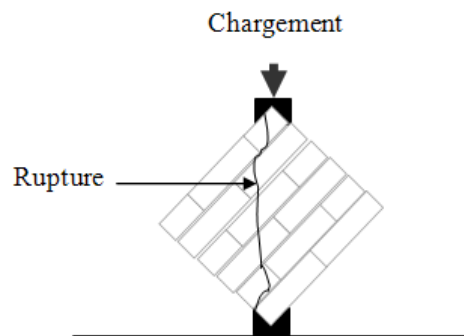


Fig. II- 11: Essai de compression diagonale sur un mur en maçonnerie [11]

### **2.2 Essais sur les surfaces planes renforcées**

Dans le cadre de la même étude, Gabor [11] a renforcé ces mêmes murs avec des matériaux composites. Trois types de renforts ont été utilisés : fibres de verre, de carbone et de tissu de verre. Une orientation perpendiculaire des fibres du renfort à la diagonale comprimée a été retenue. Ces murs ont fait l'objet d'essais de compression comme pour les murs non renforcés.

Dans un premier temps, et avant l'application des composites, des murs ont été enduits par un mortier. La rupture s'est produite par un décollement du complexe mortier-composite sans endommagement du renfort. Pour éviter ce défaut d'adhésion, une couche de résine de 3 mm a été utilisée à la place de cette couche de mortier pour la suite des essais.

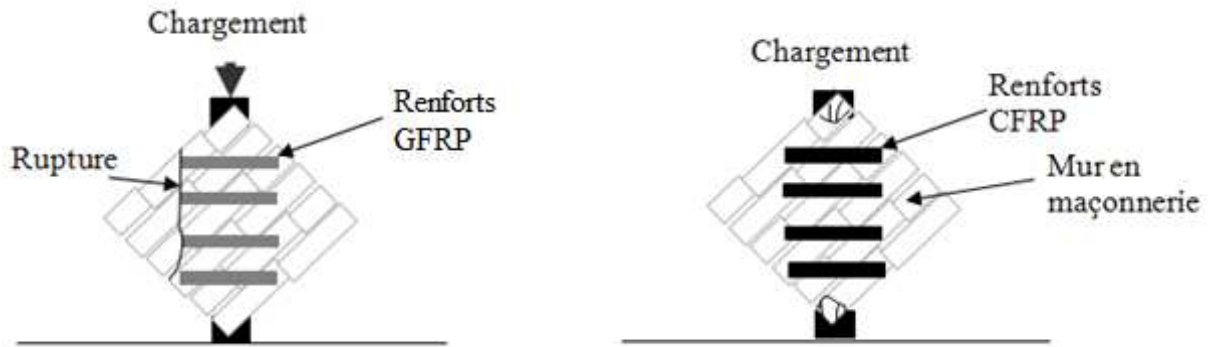


Fig. II- 12: ruptures des murs renforcés – Gabor [11]

Les résultats des essais sur les murs renforcés et la comparaison avec les murs non renforcés révèlent un gain considérable en terme de résistance : 50% pour les renforts de fibres de verre et jusqu'à plus de 75% pour les tissus de verre et fibres de carbone. De plus, il a été remarqué des gains importants au niveau de la capacité de déformation sans modification de la rigidité du mur.

Le mode de rupture par traction diagonale a été observé uniquement dans le mur renforcé par les fibres de verre. La ligne de rupture est parallèle à la diagonale comprimée et se situe à l'extrémité des quatre bandes de renfort appliquées. L'explication de l'auteur pour l'apparition de ce type de rupture est double : les déformations du renfort et de la maçonnerie sont les mêmes, et la capacité de déformation du composite est plus importante que celle de la maçonnerie. La rupture est apparue au niveau où cette différence se manifeste, soit à l'extrémité des renforts.

Pour les autres murs renforcés par les fibres de carbone et tissu de verre, la rupture est apparue dans les zones d'appui par écrasement de la maçonnerie. Cette rupture provient du fait que la résistance est alors très fortement augmentée, ce qui évite la rupture par traction diagonale.

Une étude sur le comportement des murs en maçonnerie renforcés par les matériaux composites a été réalisée par Albert et al. [13]. Les auteurs ont effectué des essais de compression, sous chargement uniformément distribué, sur des murs en maçonnerie de brique renforcés par les matériaux composites à base de fibres de verre et de carbone.

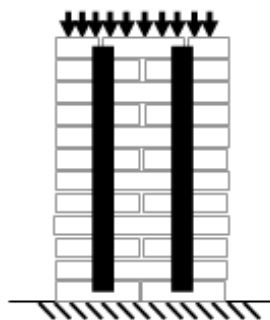


Fig. II- 13: essais de compression sur des murs renforcés par les matériaux composites.



s'est produite par écrasement de la maçonnerie en zones comprimées, et le renfort est resté collé au panneau jusqu'à la rupture.

*Dans le cas des ouvrages d'assainissement en maçonnerie, un enduit est obligatoire afin de ne pas détériorer les joints entre les blocs de meulière et d'éviter toute exfiltration des effluents dans le sol.*

### 3. Etude des structures courbes

Parmi les éléments structurels en maçonnerie, les arcs et les voûtes méritent une attention particulière (ouvrages anciens souvent chargés d'histoire). En raison de leur âge ou pour causes accidentelles (tels que les tremblements de terre), ces structures peuvent subir plusieurs types de dégâts, de sorte que la contribution des matériaux de renforcement peuvent être nécessaires pour rétablir leurs performances et empêcher la ruine des ouvrages.

Les ouvrages d'assainissement ont une partie en forme de voûte, c'est pour cette raison que nous nous sommes intéressés aux structures en arcs afin d'étudier le comportement des arcs renforcés et le gain dû à l'application des matériaux composites.

#### 3.1 Comportement des structures courbes

La stabilité et la sécurité des structures courbes sous une condition de chargement donnée dépendent fortement de la géométrie des structures et des caractéristiques mécaniques des matériaux constitutifs. La résistance de traction de la maçonnerie est négligeable, de sorte que la condition de sécurité des arcs est obtenue lorsque la ligne de poussée coïncide avec le polygone funiculaire et est maintenue à l'intérieur de chaque section de l'arc lui-même [15].

La conséquence est la formation d'une rotule en plastique qui représente l'écrasement d'une partie limitée de la maçonnerie à l'extrémité de l'arc comprimé. Lorsque le nombre des rotules plastiques est égal ou supérieur à quatre, la structure devient instable et l'effondrement survient. La figure II-15 montre l'évolution de la ligne de poussée et le mode de rupture d'un arc non renforcé sous deux différentes conditions de charge : charge verticale  $Q$  concentrée dans le milieu de l'arc [Fig. II- 15(a et b)] dans le cas d'une voûte ou appliquée à  $1/4$  au milieu de l'arc [Fig. II- 15(c et d)] dans le cas d'un ouvrage d'art (pont).

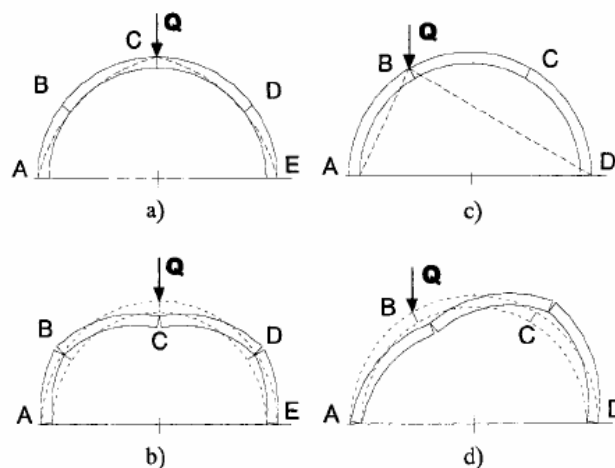


Fig. II- 15 : mode de rupture

La conséquence de ces hypothèses est que la rupture d'un arc en maçonnerie se produit théoriquement par la formation d'un nombre suffisant de rotules et transforme l'arc en un mécanisme instable. La stabilité sous des charges données, dépend essentiellement de la géométrie de la structure.

### 3.2 Renforcement des structures courbe

Du point de vue cinématique, l'apport des matériaux composites est d'empêcher la formation de rotules. Au niveau du renforcement, aucune rotule ne peut être créée. Selon la surface renforcée et la localisation des parties renforcées, la formation des rotules peut être modifiée ou complètement évitée. Par conséquent, la capacité de l'arc peut être contrôlée par des mécanismes de rupture locale selon les propriétés des matériaux, tels que l'écrasement de la maçonnerie, le glissement de joints de mortier et le décollement ou rupture des matériaux composites.

Du point de vue statique, la présence des matériaux composites permet à la ligne de poussée de se situer en dehors de l'épaisseur de l'arc en introduisant la résistance à la traction. L'importance réside dans le fait que la ligne de poussée théorique ne doit pas être la ligne de poussée réelle.

La présence des matériaux composites appliquée à l'intrados ou à l'extrados des voûtes modifie le mécanisme de formation des rotules, car ces matériaux peuvent supporter les contraintes survenant aux bords. Dans les sections comme pour les structures en béton, la résistance dépend de la résistance à la compression de la maçonnerie et la résistance à la traction. Dans tous les cas, le mécanisme de résistance est amélioré.

Les effets de l'application des matériaux composites à l'extrados ou à l'intrados de la structure sont décrits ci-dessous [16].

Dans le cas de la Fig. II- 16, la ligne de poussée peut se situer en dehors de la bordure inférieure de la voûte sans l'effondrement de la structure.

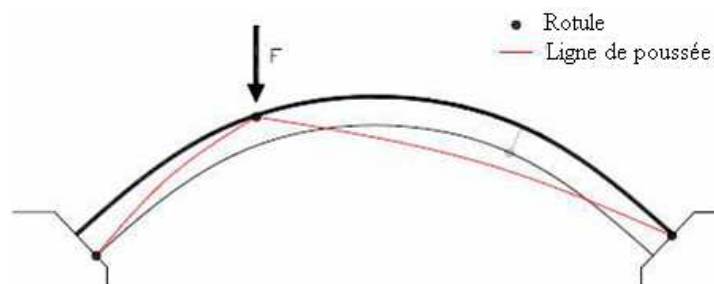


Fig. II- 16: ligne de poussée pour le renforcement de l'extrados [16]

En conséquence, la voûte devient une structure isostatique (il s'agit d'un arc à trois rotules) composée de deux poutres courbes renforcées sur leurs faces supérieures (Fig. II-17). Un tel dispositif permet d'obtenir les paramètres des contraintes dans chaque section de la structure par relations géométriques simples.



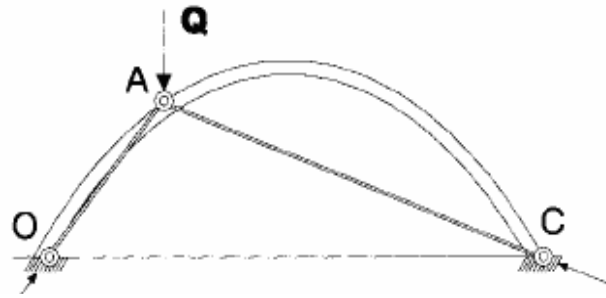


Fig. II- 17: schéma statique pour le renforcement à l'extrados

Dans le cas d'une structure renforcée à l'intrados, la distribution des contraintes est très différente. Comme le montre la Fig. II- 18, la courbe de pression tombe en dehors du bord supérieur de la structure et les fibres préviennent la formation de la rotule pour le point d'application de la charge.

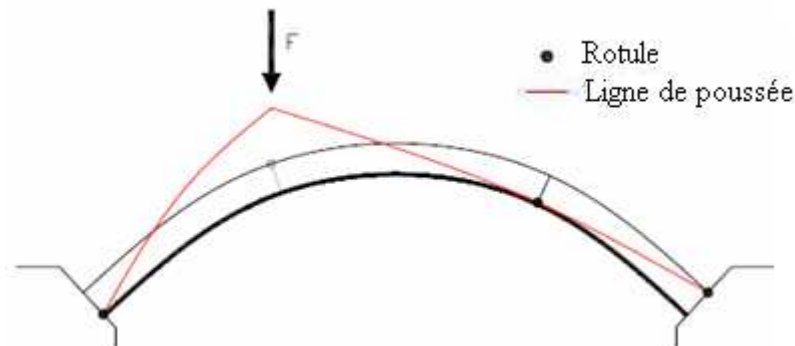


Fig. II- 18: ligne de poussée pour le renforcement à l'intrados



Fig. II- 19: schéma statique pour le renforcement à l'intrados

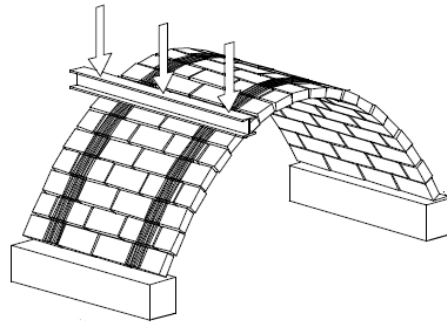
### 3.3 Essais réalisés sur des arcs renforcés

Des essais sur des structures en forme de voûtes non renforcées et renforcées par plusieurs matériaux (tissus et plats de carbone ou verre) ont été réalisés lors de différentes campagnes expérimentales menées par Valluzi et Modena [16], Bati [21], Como [22], Foraboschi, [23] Sanchez [24], Cancelliere [25],...

Plusieurs essais de chargement vertical centrés ou excentrés, représentant les charges roulantes, ont été réalisés sur des voûtes en maçonnerie de brique non renforcées. Ceux-ci représentent « la référence » pour les essais sur les voûtes renforcées afin d'évaluer l'apport en terme de résistance de ces matériaux et obtenir le mode de ruine.

### 3.3.1 Essais réalisés par Valluzi et Modena

M.R Valluzi et C. Modena [16] ont étudié le comportement des voûtes en maçonnerie de briques non enduites, renforcées par des matériaux composites. L'influence du type de fibre (carbone, verre) ainsi que le niveau d'application du renforcement (intrados ou extrados), ont été étudiés à l'aide d'essais expérimentaux en laboratoire. Des voûtes en briques d'une épaisseur de 5 cm ont été renforcées et testées sous des charges verticales appliquées à un  $\frac{1}{4}$  au milieu de la voûte. Des largeurs de 20 et 7 cm ont été adoptées respectivement pour les bandes de fibre de verre et de carbone.



Largeur : 2m  
Hauteur : 73cm  
Longueur: 1,02m  
Epaisseur : 5,5cm

Fig. II- 20: voûtes en maçonnerie de briques

Les auteurs indiquent que la rupture fragile de ces structures causée par la formation des rotules peut être évitée ou modifiée par l'application des matériaux composites.

#### 3.3.1.1 Renforcement à l'extrados

Pour les voûtes renforcées à l'extrados avec différents types de fibres utilisées (carbone, verre), les arcs s'effondrent à cause d'un glissement le long d'un joint de mortier. Par ailleurs, l'effondrement se produit sans aucun avertissement lorsque le point faible de la structure est très proche des rotules [16], [17].



Fig. II- 21 : le glissement le long d'un joint de mortier

L'application d'une plus grande largeur des bandes de fibres permet une meilleure zone de résistance capable d'empêcher le glissement. Il est constaté que l'augmentation des charges ultimes est de 1215%, 1484% et 1808%, respectivement, pour 1,25 ; 2,5 et 5 cm de largeur des renforts en carbone [18].

Dans des situations réelles, la présence d'un remblai latéral peut modifier le mécanisme de défaillance des voûtes. Le remplissage peut causer l'élévation du point de formation de la charnière en plastique sans modifier la capacité de la charge de la structure. Par ailleurs, il est

observé que la distance entre les bandes et leur largeur peut influencer le mécanisme de rupture [19], [20].

Dans le cas du renforcement par des tissus de carbone, un effet secondaire de confinement excessif a été observé avec une déformation transversale conséquente. La combinaison de la faible largeur des bandes et du module d'élasticité élevé des fibres provoque une répartition inégale des contraintes à la concentration dans la zone limitée située sous les renforts. Un tel phénomène contribue à une diminution de la résistance globale [18]. Le glissement le long d'un joint de mortier a été observé dans le cas des voûtes renforcées à l'extrados.

### 3.3.1.2 Renforcement à l'intrados

En ce qui concerne les cas d'application des matériaux composites à l'intrados des voûtes, le détachement des renforts dans la proximité de la section chargée est détecté comme un mécanisme de rupture dans la phase ultime de chargement. La structure n'a pas atteint un état d'effondrement car les fibres ont contribué à la tenue de la maçonnerie [18]. Comme la résistance ultime de la structure dépend de l'adhésion entre les fibres et la maçonnerie, il est nécessaire de vérifier la possibilité de détachement du système avant son application.

La figure II- 22 montre le mode de rupture pour les arcs renforcés à l'intrados. La rupture par détachement du complexe colle/renfort est située dans une zone limite et correspond à un faible décollement de brique.



Fig. II- 22 : détachement des fibres

La composante perpendiculaire aux fibres, qui est responsable de la rupture est proportionnelle à la tension dans les fibres. Il convient de mieux utiliser des fibres n'ayant pas une résistance élevée et d'augmenter la largeur des bandes. En comparant à la charge de l'arc non renforcé, la charge d'effondrement présente une augmentation de 691%, 904% et 1362%, ce qui correspond respectivement à une largeur de 1,25 ; 2,5 et 5 cm de fibre de carbone [16]. Le décollement des renforts est le mécanisme prédominant dans le cas des voûtes renforcées à l'intrados.

Une comparaison entre le renforcement à l'intrados et à l'extrados avec la même largeur de composite, souligne que les arcs renforcés à l'extrados sont plus rigides que les arcs renforcés

à l'intrados. Les charges à la rupture de voûtes renforcées à l'extrados sont plus importantes que pour les voûtes renforcées à l'intrados [16].

D'après les auteurs, ces mécanismes de rupture peuvent être évités par l'augmentation de la largeur des bandes de composite surtout au niveau de l'application des charges.

Ainsi, pour les structures renforcées, selon la position et la quantité du renfort, les mécanismes d'effondrement peuvent être :

- l'écrasement de la maçonnerie ;
- le décollement des renforts ;
- le glissement le long d'un joint de mortier.

### 3.3.2 Essais réalisés par Bati

Briccoli Bati et al. [21] ont proposé un modèle numérique de consolidation des voûtes de maçonnerie par les matériaux composites appliqués à l'intrados ou à l'extrados. Ce modèle a été validé expérimentalement par des essais de chargement centré jusqu'à l'effondrement. Ces essais ont été réalisés sur trois voûtes en maçonnerie. Les voûtes construites en briques non enduites (figure II- 23) présentent une largeur ( $L = 150$  cm), une hauteur ( $H = 43,25$  cm) et une épaisseur ( $e = 10$  cm).

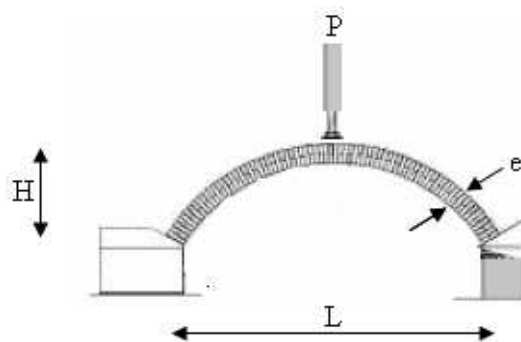


Fig. II- 23: essais sur voûtes renforcées non enduites

Deux voûtes ont été renforcées par des matériaux composites après endommagement. L'une de ces voûtes est renforcée à l'intrados et l'autre à l'extrados. Des lamelles de fibres de carbone de 1,25 cm de largeur ont été appliquées transversalement sur toute la largeur des voûtes renforcées. Une troisième voûte non renforcée a servi de témoin.

Pour une charge de 450 N appliquée au centre de la voûte, trois rotules sont apparues : la première en clé et les deux autres à l'intrados près de l'appui. La rupture est due au détachement de CFRP en clé sous cette charge qui est maximale (poussée aux vides).

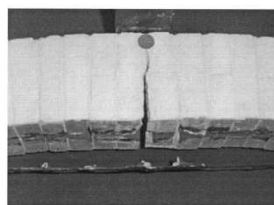


Fig. II- 24: rupture de la voûte renforcée à l'intrados

La comparaison entre le modèle expérimental et numérique (Fig. II- 25) montre une concordance des résultats, à l'exclusion des valeurs près de la charge maximale où la réduction de la rigidité du modèle expérimental est due à l'endommagement de la maçonnerie.

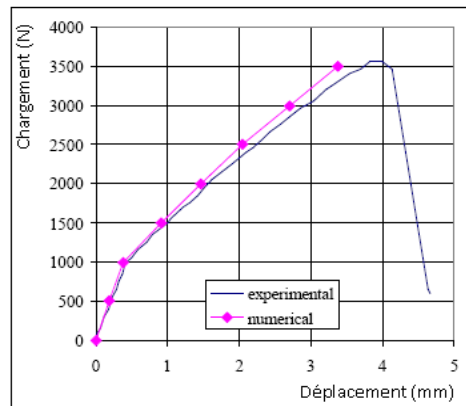


Fig. II- 25: diagrammes charge/déplacement d'une voûte renforcée à l'intrados

### 3.3.3 Essais réalisés par Como

M. Como et al. [22] ont réalisé une étude sur l'évaluation de la résistance des arcs en maçonnerie renforcés par des matériaux composites (FRP). Ces matériaux sont appliqués à l'intrados et/ou à l'extrados. Les arcs sont sollicités par une charge ponctuelle centrée (appliquée en clé de voûte), ou excentrée (appliquée à  $\frac{1}{4}$  de la distance entre les appuis en naissance de voûte).

Le point de départ de cette recherche est l'influence de l'application des bandes de FRP sur les mécanismes classiques de rupture des arcs en maçonnerie :

- Pour un arc renforcé à l'intrados et sollicité verticalement en clé ou en naissances de voûtes par une charge ponctuelle, il y a apparition des fissures en naissances de voûte à l'extrados et aux niveaux des appuis à l'intrados, et donc la formation de rotules à l'intrados aux naissances, c.à.d. la section renforcée.

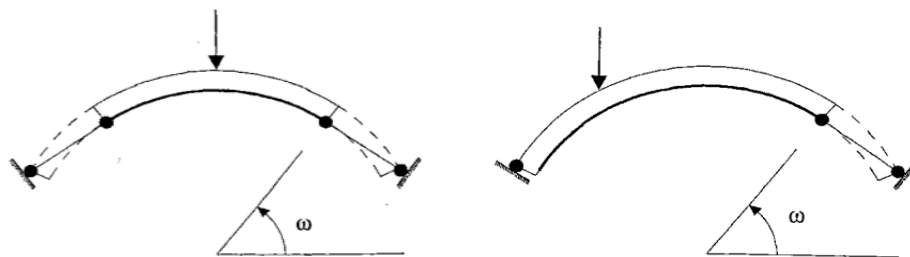


Fig. II- 26: arcs renforcés à l'intrados par les matériaux composites

- Si le renforcement est effectué à l'extrados, avec une sollicitation verticale en clé ou en naissance par une charge ponctuelle, il y a apparition des fissures :
  - \* Pour la charge centrée : fissures en clé et au niveau des appuis à l'extrados ;
  - \* Pour les charges excentrées : présence de fissures à l'extrados au niveau de l'appui près du point de chargement ( $\frac{1}{4}$  de la largeur entre appuis), ainsi que des fissures à l'intrados au niveau de l'application de la charge et au niveau du deuxième appui.



Fig. II- 27: arcs renforcés à l'extrados par les matériaux composites

### 3.3.4 Essais réalisés par Foraboschi

P. Foraboschi [23] a réalisé une étude sur le renforcement des arches en maçonnerie par matériaux composites. A cet effet, des voûtes en briques non enduites ont été utilisées. Ces voûtes ont été renforcées par les matériaux composites puis testées jusqu'à effondrement sous des charges verticales appliquées à un  $\frac{1}{4}$  de la largeur entre les appuis. Des lamelles de carbone de 50 mm de largeur ont été utilisées. Trois bandes de lamelles, espacées de 2,05 cm, ont été appliquées par collage sur l'intrados des voûtes.

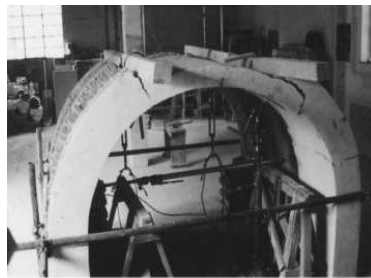


Fig. II- 28: essais sur des arches renforcés

L'analyse des résultats a révélé une augmentation de la charge d'effondrement (14 fois plus importante). La rupture des voûtes est obtenue suite à la formation d'un mécanisme de quatre rotules.

De même, des coupôles en maçonnerie de briques ont été construites. Deux de ces coupôles ont été renforcées respectivement à 45 et 25 % de la surface à l'extrados par les matériaux composites. Ces spécimens ont été soumis à un chargement appliqué au centre. La rupture s'est produite par écrasement de la maçonnerie et les charges ultimes d'effondrement ont été respectivement augmentées de 2,5 et 2,1.



Fig. II- 29: essais sur des coupôles renforcées

### 3.3.5 Essais réalisés par Sanchez

Sanchez [24] a réalisé une étude sur le comportement structural complexe des arcs en maçonnerie renforcée par des matériaux composites. Douze arcs en briques ont été testés. Les arcs ont une forme semi-circulaire d'une portée de 1,462 m. L'épaisseur est égale à la hauteur de briques soit 50 mm. Les arcs ont un diamètre de 1,50 m et une largeur de 0,45 m.

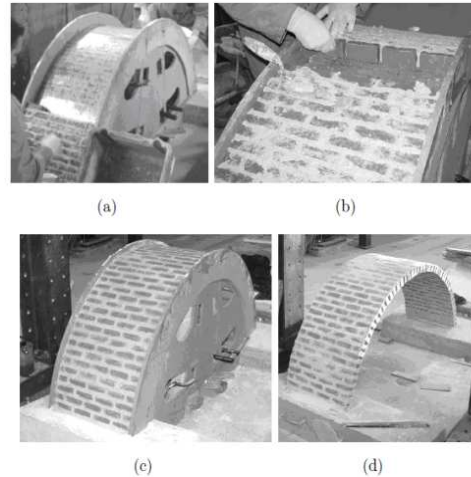
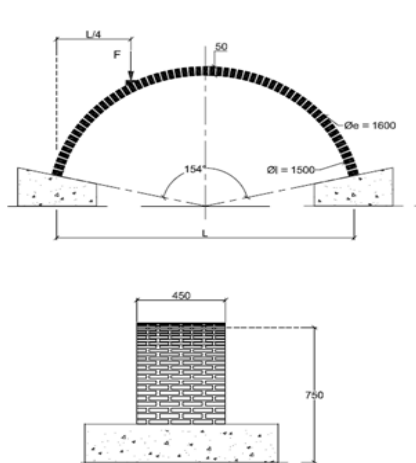


Fig. II- 30 : géométrie de l'arc      Fig. II- 31 : différents phases de la construction

Plusieurs essais ont été effectués suivant cet ordre :

Arcs	Types des feuilles et conditions de l'application	Nom de l'essai
Arcs non renforcés	-	US-1, US-2
Arcs renforcés localisés	2 feuilles de GFRP d'une largeur de 80 mm simultanément à l'intrados et à l'extrados	LS-1, LS-2
Arcs renforcés à l'extrados	2 x 50 mm d'une feuille de GFRP 2 x 80 mm d'une feuille de GFRP	CSE-1, CSE-2, CSE-3, CSE-4
Arcs renforcés à l'intrados	2 x 50 mm d'une feuille de GFRP sans ancrage 2 x 50 mm d'une feuille de GFRP avec ancrage	CSI-1, CSI-2, CSI-3, CSI-4

Tableau II- 2: différents types de renforcement

Les résultats des essais des arcs non renforcés, renforcés localisés, renforcés à l'extrados et à l'intrados sont donnés ci-dessous.

#### 3.3.5.1 Arcs non renforcés

Les deux arcs non renforcés US1 et US2 ont présenté le même comportement structural caractérisé essentiellement par la formation des quatre rotules.

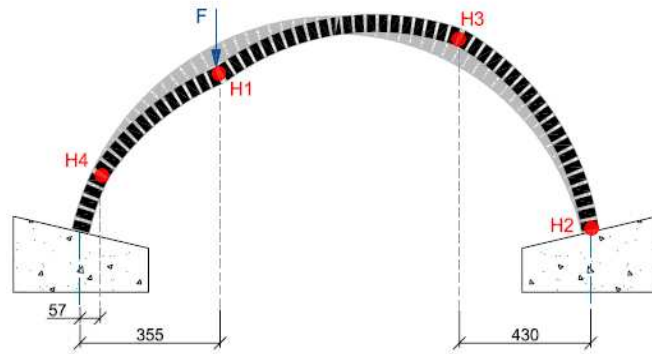


Fig. II- 32: mode de ruine

### 3.3.5.2 Arcs renforcés

Trois types de renforcement ont été réalisés [24]. Les résultats sont examinés en termes de :

- variation des charges maximales
- changements des modes de ruine
- performances des dispositifs d'ancrage.

Pour chaque configuration, deux essais ont été préparés et testés.

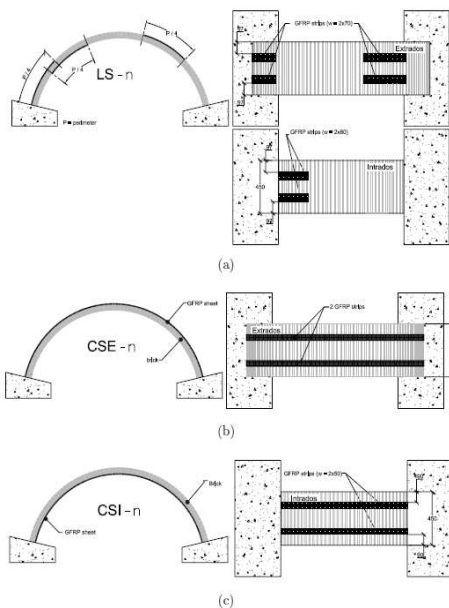


Fig. II- 33: 3 types de renforcement

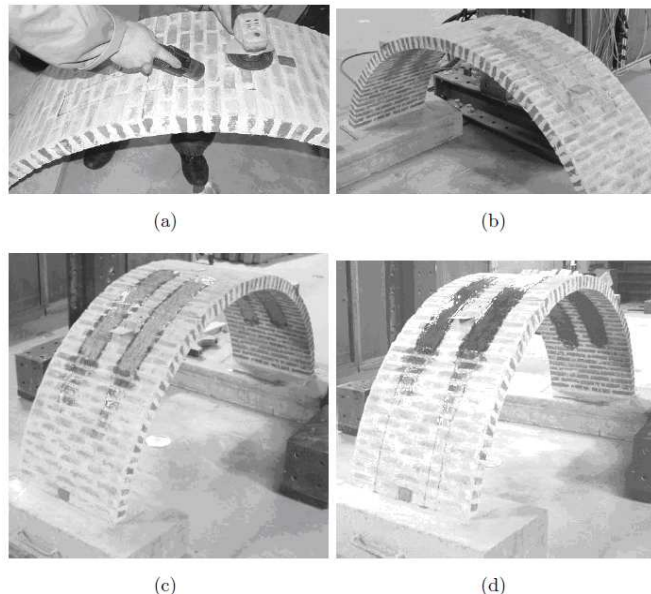


Fig. II- 34: application des feuilles de FRP

### Arcs renforcés localisés

Les arcs ont été renforcés au niveau local, visant à réparer les rotules développées pendant les essais. Cette stratégie est une situation réelle quand la structure endommagée nécessite une intervention structurelle.

Une augmentation de la charge de 76% a été obtenue lors du renforcement des arcs. Le renforcement localisé sur les zones endommagées (à l'intrados et à l'extrados) modifie le



mécanisme d'effondrement des arcs non renforcés et déplace les trois rotules. La figure II-35 montre la déformation des arcs LS, les rotules et la forme générale de l'arc renforcé.

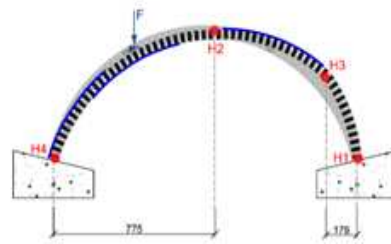


Fig. II- 35: mode de ruine

#### Arcs renforcés à l'extrados

Quatre arcs ont été renforcés à l'extrados par des matériaux composites. Aucun changement important n'est survenu sur la rigidité en comparaison avec les arcs non renforcés. Une augmentation de la charge de 89% a été obtenue lors du renforcement des arcs. Pour les arcs CSE-1 et CSE-2, une ductilité améliorée a été obtenue par rapport aux arcs non renforcés. Trois rotules sont apparues, la première rotule a été formée sous le point de chargement, et les deux autres sont apparues au niveau de la base des arcs.

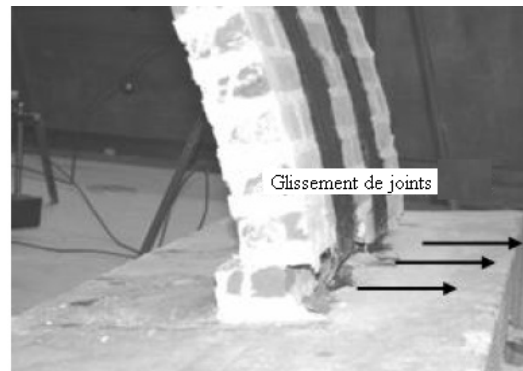
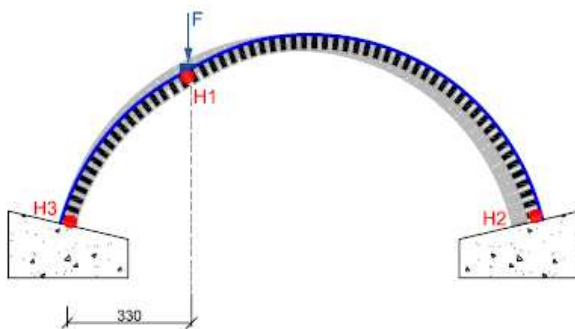


Fig. II- 36: mode de ruine

Le mode de ruine est caractérisé par le glissement de joints situés à l'appui droit, due à la résistance au cisaillement insuffisante.

#### Arcs renforcés à l'intrados

Deux feuilles de fibre de verre de 50 mm de largeur ont été utilisées pour les deux premiers essais, CSI-1 et CSI-2.

Pour les essais CSI-3 et CSI-4, un dispositif d'ancrage a été fabriqué manuellement et est appliqué pour empêcher le détachement des fibres. Pour ces échantillons, quatre fils sont imprégnés de résine et insérés dans des réservations (6 mm de diamètre) préalablement perforés dans les briques.



Fig. II- 37: application des fils pour les essais de CSI-3 et CSI-4

Un détachement des matériaux composites a été détecté lors des essais de CSI-1 et CSI-2. Pour éviter ce type de rupture, des pointes ont été appliquées (ancrage).

Une augmentation de la charge de 165% a été obtenue lors du renforcement des arcs, ainsi qu'une augmentation de la ductilité par rapport aux arcs non renforcés.

Les deux essais CSI-1 et CSI-2 présentent un comportement similaire. Les diminutions brusques de la charge sont dues au décollement des bandes de fibre de verre renforcée sous l'application de la charge. Cela signifie que le mode de ruine, qui s'est produit pour des déformations élevées, a été dicté par le décollement successif des deux bandes de renfort, causé par l'extraction d'une fine couche de brique.

Les essais CSI-3 et CSI-4 ont montré une augmentation de la ductilité et ont stabilisé l'arc à l'aide des matériaux composites de la même largeur en ajoutant un simple dispositif d'ancrage du fil.

Parmi les arcs renforcés à l'intrados, on a pu observer que l'utilisation du système d'ancrage a doublé la capacité des déformations. Pour les essais continus renforcés à l'intrados, le mécanisme observé est illustré à la figure II- 38. Deux des rotules ont été formées au niveau des appuis et la troisième est apparue symétriquement par rapport au point d'application de la charge.

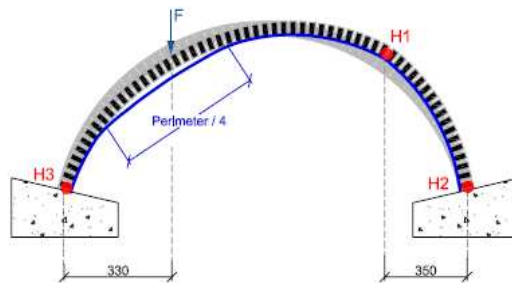


Fig. II- 38: mode de ruine

Les arcs renforcés à l'intrados ont une déformée similaire. Le dispositif d'ancrage a retardé le détachement des matériaux composites mais n'a pas changé le mécanisme de ruine.

Avec le système de dispositif d'ancrage, deux modes de ruine ont été identifiés : la traction et la rupture à la fatigue avec la rupture des matériaux composites.



Fig. II- 39 : mode de rupture



Fig. II- 40: mode de la rupture

Ce tableau donne les résultats des arcs avec les différents paramètres testés (type de renforcement, largeur de feuille de FRP, ...).

Essai	Largeur de FRP (mm)		Système d'ancrage	Charge (KN)		Augmentation de la résistance (%)
	intrados	extrados		max	moyen	
US-1	/	/	/	1,43	1,68	/
US-2	/	/	/	1,92		
LS-1	150		/	3,18	2,96	76
LS-2	150		/	2,73		
CSE-1	/	100	/	2,51	3,17	89
CSE-2	/	100	/	3,82		
CSE-3	/	160	/	3,62	3,44	105
CSE-4	/	160	/	3,26		
CSI-1	100	/	/	4,26	4,45	165
CSI-2	100	/	/	4,63		
CSI-3	100	/	X	5,41	4,61	174
CSI-4	100	/	X	3,81		

Tableau II- 3: résultats des essais de différents types de renforcement

Une augmentation de la charge a été remarquée pour les arcs renforcés par rapport aux arcs non renforcés. La plus grande augmentation de la charge a été obtenue par le renforcement à l'intrados avec le système d'ancrage. Ce qui a permis d'obtenir une plus grande ductilité par rapport aux arcs renforcés à l'extrados et aux arcs non renforcés.

Les résultats des deux séries (CSE-1, le CSE-2 et de l'CSE-3, CSE-4) sont similaires. Cela signifie que la largeur de PRF pour les essais (CSE-1 et CSE-2) était suffisante. Le renforcement à l'intrados avec des fils semble la solution la plus appropriée.

Le renforcement à l'intrados permet l'augmentation de la charge maximale et le renforcement à l'extrados fournit une plus grande ductilité. Le renforcement à l'intrados peut également fournir une ductilité très élevée si les dispositifs d'ancrage sont ajoutés à la même structure.

Le phénomène de décollement ne concerne que les arcs renforcés à l'intrados. Pour les arcs renforcés à l'extrados, un glissement au niveau du joint de mortier a été observé. L'ensemble des résultats obtenus montre que le mécanisme à la rupture dépend du choix du renforcement des structures à l'aide des matériaux composites.

### 3.3.6 Modèle numérique réalisé par Domède

Domède [12] a développé une méthode de requalification des ponts voûtes en maçonnerie par calcul. Les travaux sur une voûte construite en 1870 dans le Tarn présentent trois étapes :

- recherche historique (connaissance précise de la constitution de l'ouvrage) ;
- étude expérimentale (détermination de la loi de comportement homogénéisée des maçonneries et de la loi d'interface entre différents constituants) ;
- calcul aux éléments finis d'un ouvrage en 3D.

Trois modèles ont été étudiés :

- Modèle 1 : élasto-plastique avec un critère de Von Mises;
- Modèle 2 : modèle élasto-plastique avec un critère de Drucker-Prager;
- Modèle 3 : modèle élastique endommageable type Mazars.

Les essais sur des murets sont présentés sur la figure II- 41.



Fig. II- 41 : essais sur maçonnerie brique-mortier

La figure II-42 présente les résultats expérimentaux et le modèle proposé pour la brique pleine et le mortier de chaux vieilli.

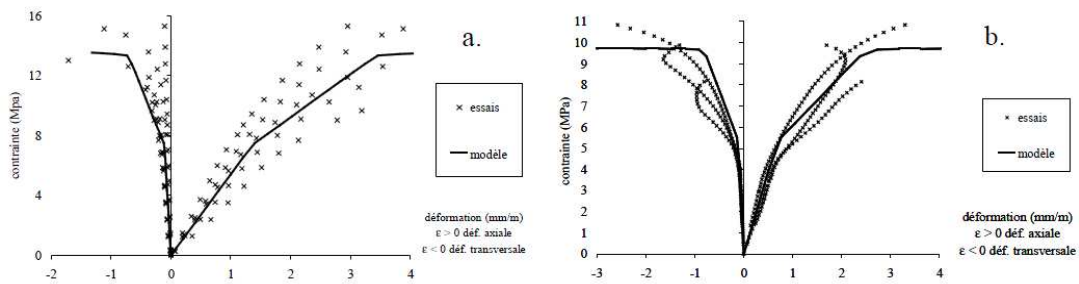


Fig. II- 42 : a) essais et modélisation des briques et ; b) mortier de chaux.

Une comparaison entre les essais réels et les simulations numériques a montré les avantages et les inconvénients de chaque modèle en fonction des courbes (contrainte-déformation) des murets. L'utilisation de CASTEM a conduit à des simplifications. Aucune difficulté n'a été remarquée lors des simulations numériques pour les deux premiers modèles, contrairement au modèle 3. Le modèle 1 a été adopté pour la suite de la recherche.

Le calcul par CASTEM est mené après avoir rassemblé tous les éléments (plans du pont, les lois de comportement des matériaux,...). L'ouvrage a été soumis à son poids propre (10 MN) et un poids d'un véhicule non centré longitudinalement (figure II- 43). C'est un tandem d'essieux dont la géométrie est conforme au type TS de l'EUROCODE 1 (2x300kN en service).

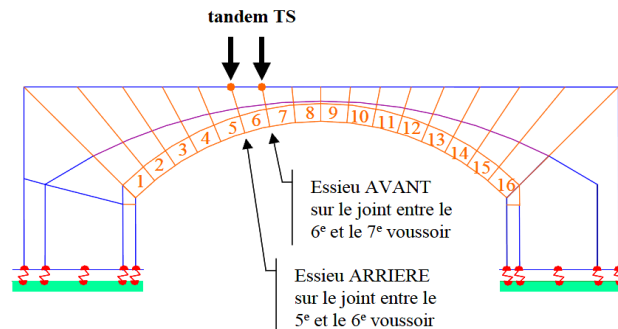


Fig. II- 43 : chargement du pont, position du tandem sur l'ouvrage.

Afin d'ouvrir les fissures dans la structure, des éléments numériques de type « joints », capables de s'ouvrir et de glisser, ont été placés dans la structure Figure II- 44.

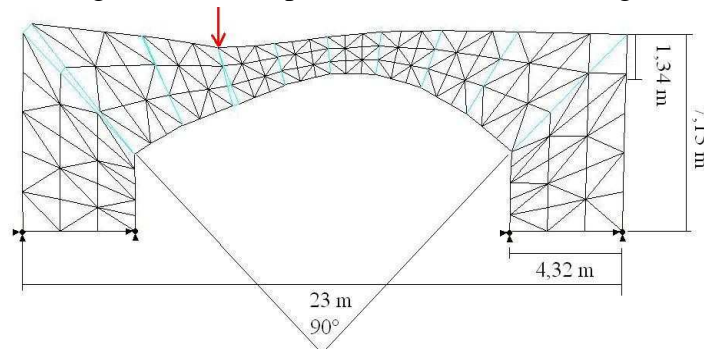


Fig. II- 44 : les fissures s'ouvrent dans les joints d'interface

Les simulations ont mis en évidence des tractions internes transversales qui sont à l'origine des fissures longitudinales observées sur les ouvrages. Ces tractions augmentent lorsque la charge est excentrée vers l'extérieur de la voie de circulation. La méthode présentée permet de décrire le comportement d'un pont en maçonnerie et d'apprécier l'impact des modifications qui pourraient être apportées à l'ouvrage.

### 3.3.7 Modèle numérique réalisé par Stablon

Stablon [28] a réalisé un modèle numérique pour évaluer le comportement des ouvrages en maçonnerie de grande taille. Des investigations (carottages pour caractériser individuellement les matériaux, bloc et mortier) et relevés de fissures sur le site du viaduc de St Ouen ont été réalisés afin de modéliser le comportement des maçonneries constituant le pont.

Le comportement des voûtes réalisées par Sanchez [24] et le calcul numérique réalisé par Stablon [28] présentent le même comportement structurel [29].

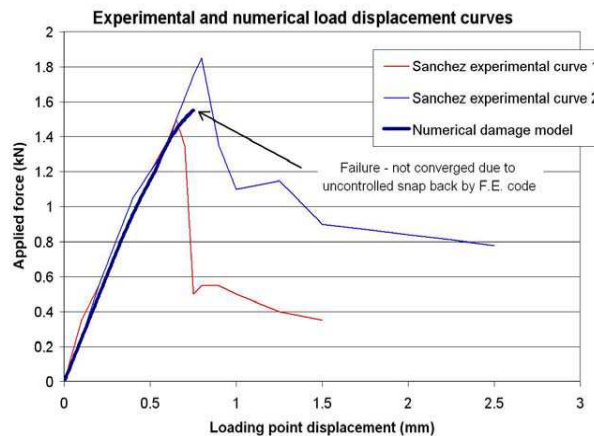


Fig. II- 45: comparaison entre les essais réalisés par Sanchez et le modèle numérique réalisé par Stablon [29]

### 3.3.8 Essais réalisés par Cancelliere

Dans une étude réalisée par Cancelliere [25], des arcs en briques ont été testés. L'arc est semi-circulaire avec une largeur de 0,255 m, une hauteur de 0,51 m et un rayon de 0,456 m. La résistance moyenne de compression du mortier et de la brique est de 8,8 MPa et 31,12 MPa. Le module de Young du mortier et de la brique est de 3100 MPa et 16000 MPa.

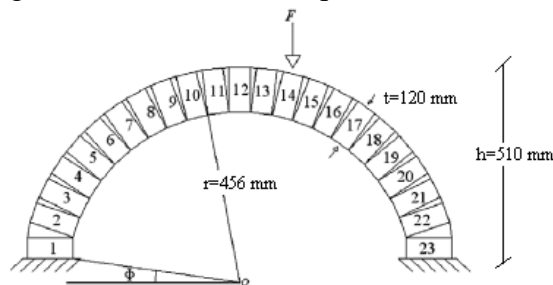


Fig. II- 46 : arcs en brique

Les variations de la charge en fonction de la flèche sont représentées sur la figure II- 47.

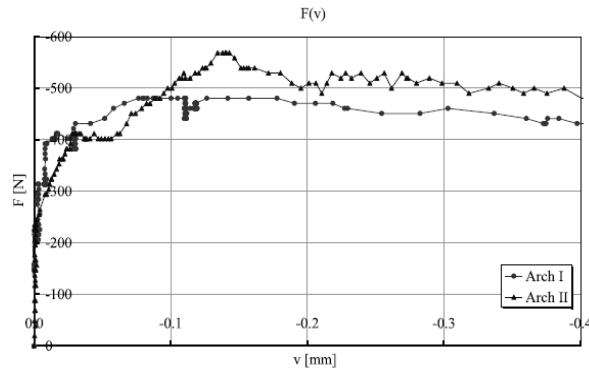


Fig. II- 47 : comportement des arcs non renforcés

Les essais montrent que la charge d'apparition de la première fissure est quasiment la même. La différence est due à la construction des arcs et à l'hétérogénéité de leur fabrication. Les premières fissures sont apparues dans les joints du mortier. Dans cette première étape, les déformations répondent sensiblement aux lois de la résistance des matériaux (brique, mortier de liaison).



Fig. II- 48 : fissuration dans les joints du mortier

### 3.3.9 Essais réalisés par Khoufache

Khoufache [27] a réalisé des essais de rupture sur des voûtes en maçonnerie non renforcées et renforcées par des tissus de carbone. L'épaisseur des ouvrages d'assainissement visitables en maçonnerie varie entre 10 à 20 cm. L'épaisseur des voûtes [27] est de 20 cm. Lors de ces essais, les voûtes renforcées n'ont pas été menées à leur rupture du fait de la limite de la capacité du vérin.

La première fissure a eu lieu à 115 kN pour la voûte non renforcée et à 235 kN pour la voûte renforcée.

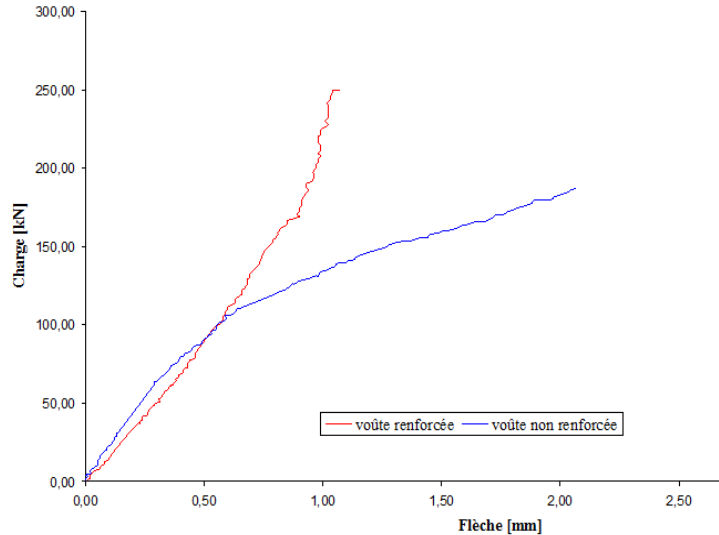


Fig. II- 49: courbe charge-déplacement pour les voûtes testées

La présence de l'enduit à l'interface enduit/colle/composite n'a pas posé de problème particulier. Le collage du tissu composite à base de fibres de carbone sur une voûte en maçonnerie enduite s'est avéré adapté au renforcement de celle-ci. La présence du tissu, a permis de retarder l'ouverture des fissures (doublement de la charge) et de réduire la flèche.

### 3.3.10 Synthèse des essais

Tous les essais réalisés sur des structures renforcées par des matériaux composites ont révélé que :

- l'application des matériaux composites modifie le mécanisme classique de rupture ;
- l'utilisation des renforts composites induit une augmentation importante en termes de résistance et de la charge de ruine. Cette augmentation est supérieure à 50% dans pratiquement tous les essais ;
- la formation de rotules se produit dans les sections renforcées ;
- le décollement du renfort composite se produit dans le cas du renforcement à l'intrados des voûtes ;
- la rupture par glissement le long d'un joint de mortier se produit dans le cas d'un renforcement à l'extrados.
- l'utilisation des ancrages a doublé la capacité des déformations.

### Conclusion

L'utilisation des matériaux composites pour le renforcement des structures présente un intérêt particulièrement intéressant. Les matériaux composites sont légers et ont des caractéristiques mécaniques élevées.

Un aspect important est de rappeler que les recherches ont été effectuées uniquement sur des essais en laboratoire avec des matériaux homogènes sans défaut, contrairement aux structures



réelles (les maçons utilisaient différentes compositions de mortier et les matériaux existants in situ sont vétustes).

Le renforcement des structures historiques est plus crucial. Les résultats des essais en laboratoire ne sont pas entièrement applicables (la procédure de renforcement des structures historiques peut être différente pour des problèmes d'architecture).

En outre, la surface des structures anciennes ne peut pas convenir pour l'application des matériaux composites dans de nombreux cas. Chaque structure est unique. Aussi, il n'est pas possible de conclure quelle technique est la meilleure car cela dépend du type de structure et de leur condition physique et mécanique. Il est important de noter que le renforcement uniquement au moyen de matériaux composites n'est pas une bonne solution. Ce renforcement doit être couplé avec d'autres techniques.

Le gain est plus important lors de l'utilisation de renforts à base de fibres de carbone que pour les fibres de verre. Le procédé de renforcement par les matériaux composites est donc réalisable sur les structures en maçonnerie en forme de voûte. On constate que le procédé de renforcement par matériaux composites est applicable aux ouvrages d'assainissement en béton présentant des courbures, ainsi qu'aux ouvrages en maçonnerie de brique ou en maçonnerie également voûtés.

Un autre aspect important est que leur rendement ne dépend pas seulement des propriétés mécaniques, mais également des propriétés physiques de la maçonnerie. Par conséquent, compte tenu de la grande variété de matériaux généralement utilisés pour les constructions en maçonnerie, les propriétés de ces matériaux peuvent différer considérablement d'un ouvrage maçonné à un autre [26].

Les ouvrages d'assainissement sont des structures enterrées. De ce fait, la seule possibilité de renforcement sera celle d'un renforcement à l'intrados.

Une obligation d'enduire les ouvrages d'assainissement pour éviter l'étanchéité et l'irrégularité avant la réhabilitation par des matériaux composites (mortier fibré, lamelles et tissus de carbone) est nécessaire. Dans le cas de structure en maçonneries enduites, les études antérieures ont montré une rupture prématurée des structures par décollement du complexe enduit/renforcement. De ce fait, l'enduit classique a été remplacé par une résine époxydique.

Dans le chapitre 3, nous nous intéressons à caractériser 4 mortiers fibrés pour valider les matériaux, puis une validation de la géométrie du corps d'épreuve (voûte) est présentée dans le chapitre 4.

Le chemisage mince non armé par mortier fibré sera détaillé dans le chapitre 5. Cette technique permettra de réaliser les essais sur des voûtes renforcées par matériaux composites.

Dans le chapitre 6, le chemisage renforcé par des matériaux composites (lamelles et tissus de carbone) est abordé. Une comparaison des deux procédés est effectuée avant de valider les procédés de renforcement mis au point au cours de cette thèse.

## **Bibliographie**

- [1] S. Kesteloot (2005), Réhabilitation des ouvrages d'assainissement par matériaux composites: Etude expérimentale et dimensionnement par calculs numériques, Thèse de Doctorat, Université d'Artois
- [2] « Expertise structures béton armé », [www.lamy-expertise.fr](http://www.lamy-expertise.fr)
- [3] « Chapitre 0 – Cours Matériaux Composites », [www-ipst.u-strasbg.fr](http://www-ipst.u-strasbg.fr)
- [4] « Matériau composite », [www.techno-science.net](http://www.techno-science.net)
- [5] « La fibre de verre : présentation et applications », [www.gralon.net](http://www.gralon.net)
- [6] « Des fibres de carbone plus résistantes à la compression ? », [www.techno-science.net](http://www.techno-science.net)
- [7] « Aramide », [fr.academic.ru](http://fr.academic.ru)
- [8] E. David (1999), « Comportement mécanique de poutres en béton armé renforcées ou réparées par collage de matériaux composites – Etude expérimentale et modélisation », Thèse de Doctorat, Université d'Artois
- [9] « Systèmes de renforcement structuraux SikaCarboDur – Technologies et concepts », Documentation Technique SIKA
- [10] U. Meier (1995), Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites, Construction and Building Materials, Vol. 9, No.6
- [11] A. Gabor. (2002) "Contribution à la caractérisation et à la modélisation des maçonneries non-renforcées et renforcées par matériaux composites". Thèse Doctorat, Lyon 1
- [12] Nathalie Domede (2006), Méthode de requalification des ponts en maçonnerie, Thèse de doctorat, INSA de Toulouse.
- [13] Albert, M. L., A. E. Elwi, and J. J. R. Cheng (2001), "Strengthening of Unreinforced Masonry Walls Using FRP," ASCE Journal of Composites for Construction, v. 5, no. 2, pp. 76-84.
- [14] M. Corradi et al. « Strengthening techniques tested on masonry structures struck by the Umbria–Marche earthquake of 1997–1998 »
- [15] Heyman, J. (1982). The masonry arch, Ellis Horwood, Ltd., New York.

- [16] valluzzi M.R., Valdemarca M., Modena C. (2001), “Behavior of brick masonry vaults strengthened by FRP laminates”, *ASCE Journal of Composites for Construction*, August 2001, vol. 5, n°3.
- [17] Bati Silvia Briccoli and Rovero Luisa (2008), “ Towards a methodology for estimating strength and collapse mechanism in masonry arches strengthened with fibre reinforced polymer applied on external surfaces”, *Materials and Structures- Volume 41, Number 7* (2008), 1291-1306.
- [18] M.R Valluzi and C. Modena (2001), « Experimental analysis and modelling of masonry vaults strengthened by FRP » *Proc., 3rd Int. Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions*, P. B. Lourenco, ed., University of Minho, Guimarães, Portugal, 1023-1032.
- [19] Blasi, C., and Foraboschi, P. (1994), “Analytical approach to collapse mechanisms of circular masonry arches.” *J. Struct. Eng.*, 120 (8), 2288–2309.
- [20] Foraboschi, P., and Blasi, C. (1996), “Closure to Analytical approach to collapse mechanisms of circular masonry arch”. *Journal of Structural Engineering*, 122 (8), 979–980.
- [21] Briccoli Bati, S., and Rovero, L. (2001), “Experimental validation of a proposed numerical model for the FRP consolidation of masonry arches.” *Proc., 3rd Int. Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions*, P. B. Lourenco, ed., University of Minho, Guimarães, Portugal, 1057–1066.
- [22] M. Como et al. (2001), « On the structural capacity of masonry arches strengthened by FRP » *Arch'01. International arch bridges conference N°3, FRANCE (19/09/2001)*, pp. 277-282- 996, (10 ref.) ISBN 2-85978-347-4].
- [23] P. Foraboschi (2004), « Strengthening of Masonry Arches with Fiber-Reinforced Polymer Strips » *J. Composites Constructions*, 8, 191.
- [24] Sanchez I. (2001), *Strengthening of arched masonry structures with composite materials*. University of Minho, Department of Civil Engineering, Azurem, 4800-058 Guimaraes, Portugal and the Portuguese Science and Technology Foundation (FCT).
- [25] Ilaria Cancelliere, Maura Imbimboa, and Elio Sacco (2010), «Experimental tests and numerical modeling of reinforced masonry arches», (DiMSAT, Department of Mechanical, Structural and Environmental Engineering, School of Engineering, University of Cassino, Via G. Di Biasio 43, 03043 Cassino, FR, ITALIE.
- [26] Corradi M., Grazini A. and Borri A. (2007), “Confinement of brick masonry columns with CFRP materials”, *Composites Science and Technology* 67 (9) (2007) pp. 1772–1783- ISSN: 0266-3538.

[27] N. Khoufache (2008), Contribution à la restructuration des ouvrages d'assainissement en maçonnerie au moyen de matériaux composites, Thèse de Doctorat, Université d'Artois.

[28] Thomas Stablon (2011), Méthodologie pour la requalification des ponts en maçonnerie, Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse.

[29] Stablon, T., Sellier, A., Domède, N., Plu, B., Dieleman, L. (2010) A numerical damage model for masonry structures. Structural Faults and Repair. Edinburgh, 13 papers.

## Chapitre 3 :

### Caractérisation des matériaux et des interfaces

#### Sommaire

Introduction .....	62
1. Le Mortier fibré : Enduit hydraulique.....	63
1.1 Essai de flexion 3 points.....	63
1.2 Essai de compression simple .....	64
1.3 Essai d'arrachement.....	65
1.4 Essai en traction par fendage .....	67
1.5 Module de Young .....	68
1.6 Essai de retrait .....	69
Synthèse des essais de caractérisation .....	72
2. Meulière .....	72
2.1 Essai de compression.....	73
2.2 Essai d'arrachement.....	73
2.3 Module d'élasticité .....	74
3. Mortier de liaison .....	75
4. Matériaux composites .....	75
4.1 Caractéristiques des lamelles et des tissus de carbone .....	76
4.2 Caractéristiques des adhésifs .....	76
5. Essais du complexe meulière/mortier .....	77
6. Essais de glissement.....	79
6.1 Présentation des essais.....	79
6.2 Adaptation de l'essai à notre cas .....	80
6.3 Phase de préparation .....	81
6.4 Résultats des essais.....	82
6.5 Interprétation et analyse des résultats .....	85
Conclusion.....	86
Bibliographie.....	87

## **Introduction**

Le but de cette campagne expérimentale est d'obtenir les caractéristiques mécaniques des produits de réparation de chacun des fournisseurs collaborant au projet ainsi que les caractéristiques mécaniques des blocs de meulière et du mortier de liaison entre les blocs.

Concernant les produits hydrauliques, une recherche a été faite sur les produits existants sur le marché. Les produits retenus ont été choisis grâce à leurs caractéristiques mécaniques élevées ainsi que pour leur adaptabilité dans les ouvrages d'assainissement (humidité, attaques de H<sub>2</sub>S, ...). Néanmoins, la composition de chaque mortier fibré est propre au fabricant. Ce mortier fibré représentera l'enduit. Il s'agit d'un mortier de réparation utilisé dans les travaux de ragréage et de reconstitution de forme.

Cette campagne expérimentale comprend différents essais de caractérisation :

- Des essais permettant de connaître les caractéristiques mécaniques sur les mortiers fibrés, de la meulière et du mortier de liaison).
- Des essais sur des murets donnant la résistance à la compression de la maçonnerie.
- La contrainte de cisaillement est obtenue suite aux essais de glissement à double recouvrement.
- Les caractéristiques mécaniques des matériaux composites (plats et tissus de carbone) et leurs colles associées, sont données par le fournisseur.

Un modèle de calcul aux éléments finis sera réalisé par le bureau d'études. Les résultats de l'ensemble de ces essais alimenteront la base de données pour l'élaboration du modèle numérique pour appliquer les procédés in-situ.

## 1. Le Mortier fibré : Enduit hydraulique

Les essais suivants donneront les caractéristiques mécaniques de l'enduit :

- Essai de flexion 3 points ( $f_{cf}$ ) ;
- Essai de compression simple ( $f_{c28}$ ) ;
- Essai d'arrachement ( $\sigma_A$ ) ;
- Essai en traction par fendage ( $\sigma_t$ ) ;
- Module de Young ( $E_m$ ).

Un malaxeur de 50 litres a été utilisé pour fabriquer les éprouvettes. Le temps de malaxage est de 3 minutes. L'eau est introduite lentement en s'assurant que le mélange soit bien homogénéisé. Pour des raisons de confidentialité, les produits sont nommés A, B, C et D. La teneur en eau ( $\omega$ ) est variable et dépend de chaque mortier. Une fourchette des teneurs en eau est imposée par les fiches techniques, afin d'avoir un mortier plus ou moins ferme (selon la mise en œuvre).



Fig. III- 1: principe de fabrication

### 1.1 Essai de flexion 3 points

Le but de l'essai est de connaître la résistance à la flexion  $f_{cf}$  de l'éprouvette prismatique. Trois essais sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ . Ces essais ont été réalisés selon la norme NF EN 12390-5 [1]. Le principe de l'essai est détaillé sur la figure ci-dessous.

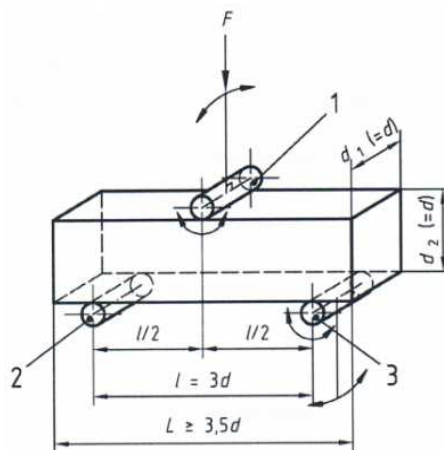


Fig. III- 2: principe de l'essai de flexion 3 points [1] (3)

$$f_{cf} = \frac{3}{2} \times \frac{F \times L}{d_1 \times d_2^2}$$

$f_{cf}$  : résistance en flexion [MPa]

P : charge maximale [N]

L : écartement entre les rouleaux d'appui [106,7 mm]

$d_1$  et  $d_2$  : les dimensions latérales de l'éprouvette ( $d_1 = d_2 = 4$  cm).

Mortier fibré	A	B	C	D
Teneur en eau [%]	14	12	11,2	16
éprouvette	$f_{cf}$ [MPa]	$f_{cf}$ [MPa]	$f_{cf}$ [MPa]	$f_{cf}$ [MPa]
1	7,63	8,38	7,75	5,63
2	8,25	7,50	8,00	5,50
3	7,38	7,50	8,38	6,25
Moyenne [MPa]	7,75	7,79	8,04	5,79

Tableau III- 1: essais de flexion 3 points à 28 jours

Les produits A, B et C présentent une valeur de résistance à la flexion quasi-identique. Le produit D a une résistance plus faible.

### ***1.2 Essai de compression simple***

La connaissance de la résistance à la compression  $f_{c28}$  du matériau est nécessaire afin de qualifier les matériaux. Trois essais sont réalisés à 28 jours sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 11 cm et de hauteur 22 cm, suivant la norme NF EN 12390-3 [2]. Les éprouvettes étudiées sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.



Fig. III- 3 : principe de l'essai de compression (4)

$$f_{c28} = \frac{F}{S}$$

$f_{c28}$  : résistance de compression [MPa]

F : charge maximale [N]

S : surface de contact [100 cm<sup>2</sup>]



Mortier fibré	A	B	C	D
Teneur en eau [%]	14	12	16	11,2
éprouvette	$f_{c28}$ [MPa]	$f_{c28}$ [MPa]	$f_{c28}$ [MPa]	$f_{c28}$ [MPa]
1	62,49	52,3	54,9	34
2	67,49	52,6	54,5	38,9
3	60,49	52	55,3	38,4
Moyenne [MPa]	63,6	52,3	54,9	37,1

Tableau III- 2: Essais de compression à 28 jours

Le produit A a la plus grande valeur de résistance à la compression. Les produits B et C présentent une valeur de résistance à la compression quasi-identique. Le produit D a une résistance plus faible.

### 1.3 Essai d'arrachement

Le but de l'essai est de connaître la contrainte moyenne d'adhérence  $\sigma_A$  afin d'obtenir l'adhésion et donc la capacité du transfert des efforts lors de l'application des renforts (colle/composite). Les essais sont exécutés selon les normes NF EN 1542 [3]. La contrainte d'adhérence doit être supérieure à 1,5 MPa [3]. Cinq essais d'arrachement sont réalisés sur un bloc de mortier fibré.

Les caractéristiques mécaniques sont résumées dans le tableau 3. La colle a été utilisée selon les proportions suivantes:

- ¼ de colle de composition A
- ¾ de colle de composition B



Fig. III- 4: colle de composition A



Fig. III- 5: colle de composition B

Désignation	
Module d'élasticité	12 800 MPa
résistance à la flexion	$\geq 30$ MPa à 2 jours à 20°C
Adhérence sur béton	$\geq 4$ MPa (rupture dans le support)

Tableau III- 3 : caractéristiques des colles

Le principe consiste à appliquer sur une épaisseur égale à 1 mm la colle sur support sec, afin de maintenir une dalle, appelée couramment pastille. Après durcissement de la colle, la pastille est "arrachée" par traction directe. Les essais sont réalisés 24h après le collage des pastilles sur le support. Ce collage doit être réalisé de façon très soignée, puisqu'il conditionne directement les résultats des essais.

L'appareillage utilisé est le suivant:

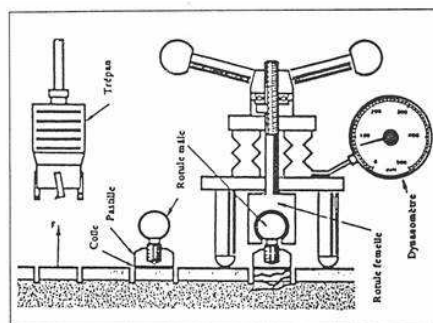


Fig. III- 6: dispositif expérimental des essais d'arrachement par traction directe

Les forces d'arrachement par traction directe sont mesurées directement à l'aide d'un manomètre. La contrainte d'adhérence  $\sigma_A$ , calculée en prenant en compte la surface d'application, est calculée. De plus, il est nécessaire de connaître la zone de rupture (interface pastille/support, support,...) pour valider le support afin qu'il puisse transmettre les efforts lors d'un renforcement par collage de matériaux composites. Le mode de rupture est décrit selon les recommandations de l'AFGC [4].



Fig. III- 7: principe de l'essai d'arrachement

Pour les 5 essais, nous avons remarqué un mode de rupture identique par décohésion du support (rupture dans le mortier fibré).

Mortier fibré	A	B	C	D
Teneur en eau [%]	14	12	11,2	16
épreuve	$\sigma_A$ [MPa]	$\sigma_A$ [MPa]	$\sigma_A$ [MPa]	$\sigma_A$ [MPa]
1	1,53	2,14	2,7	1,83
2	1,32	2,34	2,7	2,24
3	1,94	2,24	2,6	2,34
4	1,83	2,04	2,7	2,45
5	1,02*	2,24	2,7	2,45
Moyenne [MPa]	1,66	2,2	2,68	2,26

Tableau III- 4: essais d'arrachement à 28 jours

\* à éliminer du fait d'un problème de collage

La contrainte moyenne d'adhérence  $\sigma_A$  pour chaque produit est supérieure à 1,5 MPa. En effet, la contrainte admissible est de 1,5 MPa dans les réseaux d'assainissement. Le mortier fibré sera appliqué à l'intrados des voûtes. La contrainte d'adhérence de produit A est juste

au-dessus de la contrainte  $\sigma_A$  admissible. Cet essai est très important pour connaître la capacité du transfert des efforts lors de l'application des renforts.

#### 1.4 Essai en traction par fendage

Le but de l'essai est de connaître la résistance à la traction du mortier fibré  $\sigma_t$  d'une éprouvette cylindrique. Dans cet essai, on applique à l'éprouvette un effort de compression. Cet effort induit des contraintes de traction dans le plan passant par ces deux génératrices. La rupture, due à ces contraintes de traction, se produit dans ce plan. Le calcul permet de définir la contrainte de traction correspondant à cette rupture. Trois essais sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 11 cm et de hauteur 22 cm âgées de 28 jours selon la norme NF EN 12390-6 [5].

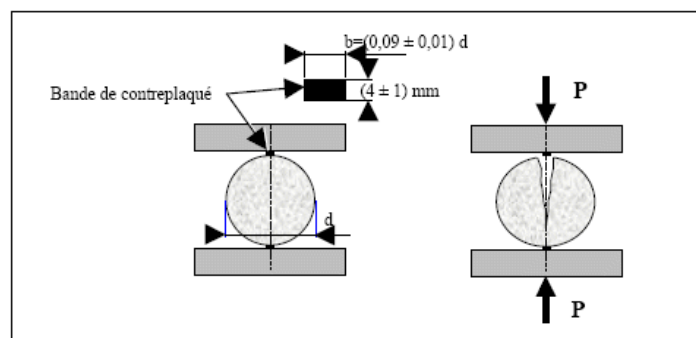


Fig. III- 8 : principe de l'essai de fendage

$$\sigma_t = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d}$$

$\sigma_t$  : résistance en traction par fendage [MPa]

F : charge maximale [N]

L : longueur de la ligne de contact de l'éprouvette [11 mm]

d : diamètre nominal de l'éprouvette [220 mm]

Mortier fibré	A	B	C	D
Teneur en eau [%]	14	12	11,2	16
éprouvette	$\sigma_t$ [MPa]	$\sigma_t$ [MPa]	$\sigma_t$ [MPa]	$\sigma_t$ [MPa]
1	3,44	3,85	5,7	2,58
2	3,4	4,18	4,52	3,82
3	4,79	4,9	6,06	2,58
Moyenne [MPa]	3,84	4,31	5,43	2,99

Tableau III- 5 : essais en traction par fendage

D'après l'Eurocode 2, afin de connaître la résistance à la traction, il est nécessaire d'effectuer le calcul suivant :

$$f_{ct,m} = 0,3 \times f_{ck}^{2/3} \text{ si } f_{ck} < \frac{C50}{60}$$

$$f_{ctm} = 2,12 \ln \left( 1 + \frac{f_{ctm}}{10} \right) \text{ si } f_{ck} \geq \frac{C50}{60}$$

Avec :

$f_{ck}$  : résistance caractéristique en compression du béton, mesurée sur cylindre à 28 jours

$f_{ctm}$  : valeur moyenne de la résistance à la traction

$f_{ctk0,05}$  : valeur inférieure de la résistance caractéristique à la traction

$f_{ctk0,95}$  : valeur supérieure de la résistance caractéristique à la traction

Mortier fibré	A	B	C	D
Teneur en eau [%]	14	12	11,2	16
$f_{ctm}$ [MPa]	4,4	3,2	3,2	4,2

Tableau III- 6 : résistance à la traction

La résistance à la traction dépend de la résistance en compression de l'enduit. Les produits A, D présentent une valeur de résistance à la traction quasi-identique. Les produits B, C donnent une valeur de la résistance plus faible.

### 1.5 Module de Young

Trois essais sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 11 cm et de hauteur 22 cm âgées de 28 jours, suivant la norme NF EN 13286-43 [6]. L'extensomètre utilisé est constitué de deux anneaux rigides, chacun étant fixé à la paroi de l'éprouvette avec trois vis. La distance entre les deux anneaux est égale à 35 mm.



Fig. III- 9: principe de l'essai de Module de Young

Trois capteurs de déplacements sont disposés à 120° sur l'anneau pour mesurer les déplacements sur les éprouvettes. Celles-ci sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La vitesse de chargement est constante pendant toute la durée de l'essai et est égale à 1,9 MPa/s. La courbe Force-Déformation est enregistrée pendant l'essai pour déterminer le module de Young du matériau ( $E_m$ ).

Mortier fibré	A	B	C	D
Teneur en eau [%]	14	12	11,2	16
éprouvette	$E_m$ [MPa]	$E_m$ [MPa]	$E_m$ [MPa]	$E_m$ [MPa]
1	31 206	28 923	35 128	31 097
2	37 098	25 000	32 870	25 830
3	32 800	28 000	36 158	74 594*
Moyenne [MPa]	33 701	27 308	34 719	28 464

Tableau III- 7: détermination du module de Young à 28 jours

Le module de Young ( $E_m$ ) est utilisé pour calculer le taux de travail du mortier fibré (chapitres 5 et 6). Plus le module de Young sera élevé, plus la rigidité sera importante.

### 1.6 Essai de retrait

Le but des essais est de connaître la contrainte  $c$  ( $\Delta l/L$ ), appelée aussi variation de longueur en mm/m ou en %. Trois essais par ambiance sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  équipées de plots (10 mm de longueur et 80 mm de diamètre).

Deux ambiances ont été testées :

- ambiance normalisée ( $\theta=21 \pm 2^\circ$  et  $HR=60 \pm 10\%$ ) ;
- ambiance immergée ( $\theta=20^\circ$  et  $HR=100\%$ ).

Cette seconde ambiance permettra de valider l'utilisation de ces matériaux en ambiance agressive, représentant l'ambiance des ouvrages d'assainissement.

Ces essais ont été réalisés selon la norme NF EN 12617-4 [11]. Trois éprouvettes  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  par ambiance (normalisée et saturée) ont été coulées. Un retractomètre a été utilisé pour déterminer les variations de longueur (Fig III- 10). Les mesures de retrait sont réalisées 1 jour après le démoulage.

#### 1.6.1 Ambiance normalisée ( $\theta=21 \pm 2^\circ$ et $HR=60 \pm 10\%$ )

Les éprouvettes ont été mises dans une armoire climatique à une température de  $\theta=21 \pm 2^\circ$  et d'humidité relative  $HR=60 \pm 10\%$  (Fig III- 11). La distance entre deux éprouvettes est supérieure à 100 mm. La longueur de l'éprouvette est mesurée à 3, 7, 14, 28, 56 et 90 jours.



Fig. III- 10: mesure du retrait



Fig. III- 11: conservation des éprouvettes

Les courbes de chaque mortier fibré (A, B et D) sont présentées Figure III- 2. Les courbes présentent l'évolution des variations de la longueur en fonction du temps. Les résultats

représentés sont la moyenne des valeurs obtenues pour trois éprouvettes. L'erreur liée à la mesure donne un écart de 100  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

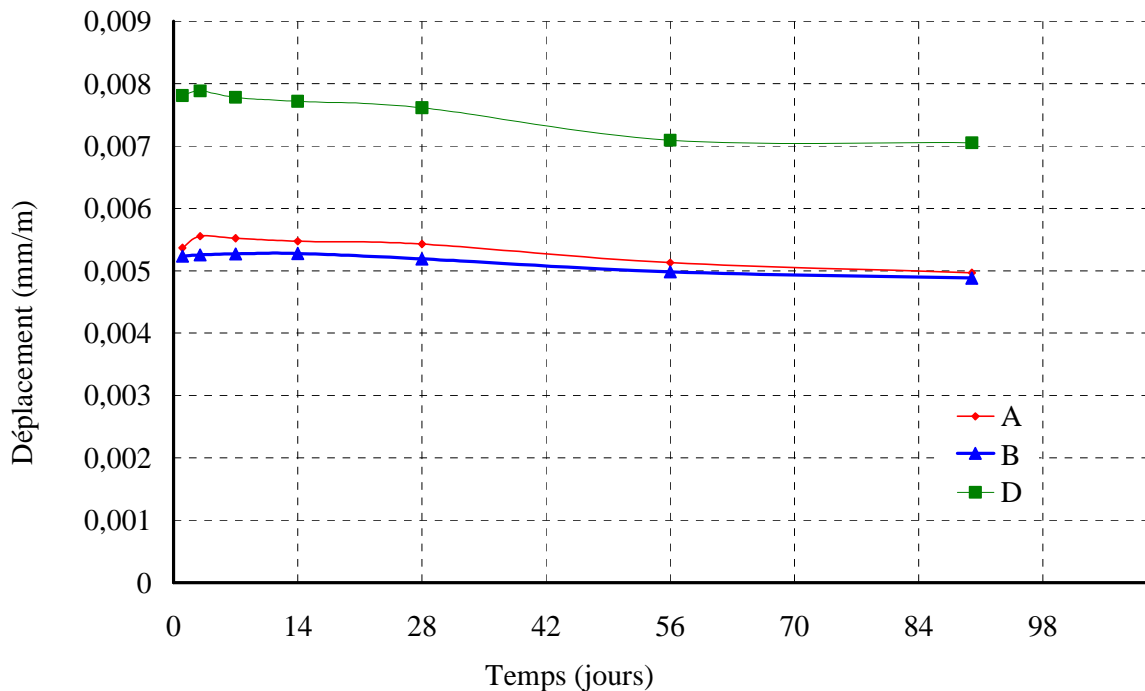


Fig. III- 12: courbe de retrait en fonction du temps

Un gonflement a été remarqué pendant les premiers jours (3 à 7 jours) pour toutes les éprouvettes. Pour les produits A et D, le retrait se produit assez rapidement (7 jours), au contrairement du produit B où l'on remarque un gonflement jusqu'à 14 jours. Ensuite il est constaté un retrait.

Jours	$\Delta l/L$ - A	$\Delta l/L$ - B	$\Delta l/L$ - D
7	0.00552	0.00527	0.00781
28	0.00542	0.00519	0.00761
56	0.00513	0.00498	0.00709
90	0.00496	0.00488	0.00705

Tableau III- 8 : résultats des essais de retrait ( $\Delta l/L$ ) en mm/m

Le tableau ci-dessus donne les variations des dimensions des éprouvettes. Le gonflement puis le retrait mesuré ne sont pas élevés. Il n'y a donc pas de risque de dégradations de l'enduit (fissurations notamment). Afin de valider leurs utilisations dans les réseaux d'assainissement, des essais sont menés en ambiance immergée ; ambiance représentative des réseaux d'assainissement lors du passage des effluents.

### 1.6.2 Ambiance immergée en eau ( $\theta=21 \pm 2^\circ$ et HR=100%)

Les plots des éprouvettes ont été enduits par des graisses avant l'immersion pour éviter le dépôt de sel. Les éprouvettes ont été mises sur une grille métallique dans un bain d'eau

potable d'une température de  $\theta=21 \pm 2^\circ$  (Fig III- 13). La longueur de l'éprouvette est mesurée à 3, 7, 14, 28, 56 et 90 jours.



Fig. III- 13: conservation des éprouvettes

Les courbes de chaque mortier fibré (A, B et D) sont présentées en Fig III- 14. La courbe présente l'évolution des variations de la longueur en fonction du temps. Les résultats sont la moyenne des valeurs obtenues pour trois éprouvettes.

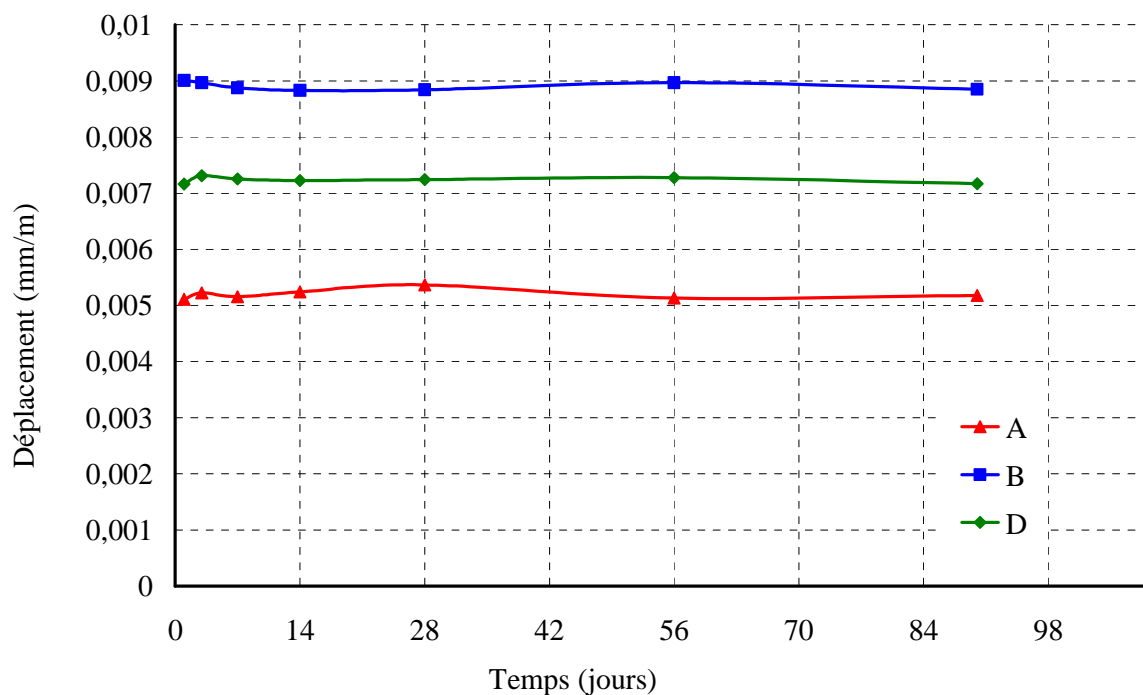


Fig. III- 14: courbe de gonflement en fonction du temps

Lors des premiers jours, de faibles variations ont été constatées. Sur l'ensemble de la durée des essais, les différents enduits ne montrent pas de phases de retrait ou de gonflement. Les matériaux ne montrent donc pas de variations dimensionnelles.

Jours	A	B	D
7	0.00515	0.00887	0.00725
28	0.00536	0.00884	0.00724
56	0.00513	0.00896	0.00727
90	0.00517	0.00885	0.00716

Tableau III- 9: résultats des essais de gonflement ( $\Delta l/L$ ) en mm/m

En ambiance immergée, nous ne pouvons conclure à un retrait ou un gonflement des différents produits hydrauliques. Leur utilisation dans les réseaux d'assainissement est donc possible et n'engendrera pas de fissurations.

### 1.7 Synthèse des essais de caractérisation

Le tableau III-10 donne les caractéristiques mécaniques de chaque mortier fibré.

Mortier fibré	A	B	C	D
Teneur en eau [%]	14	12	11,2	16
Résistance de flexion [MPa]	7,75	7,79	8,04	5,79
Résistance de compression [MPa]	63,60	52,53	51,3	54,90
Contrainte d'adhérence [MPa]	1,66	2,2	2,68	2,26
Résistance en traction par fendage [MPa]	3,84	4,31	5,43	2,99
Module de Young [MPa]	33 701	27 308	34 719	28 464

Tableau III- 10 : caractéristiques mécaniques des mortiers fibrés

Les essais de caractérisation des différents mortiers fibrés ont été réalisés dans le but d'obtenir les caractéristiques mécaniques (la résistance en compression, en flexion, la contrainte d'adhérence, le module de Young) avant d'appliquer le mortier fibré à l'intrados des voûtes. Il apparaît que le produit B présente les meilleures caractéristiques pour notre étude. Néanmoins tous les produits seront testés pour la suite de la campagne expérimentale. Par conséquent, chaque mortier fibré est appliqué à l'intrados sur deux voûtes.

## 2. Meulière

Les blocs de meulière sont issus des carrières de la société COSSUTA S.A, située à Gandelu dans l'Aisne. Depuis plus d'une dizaine d'années, ces pierres, qui sont en grande partie des pierres de récupération, n'ont pas eu le temps de vieillir en tas car elles sont utilisées pour la restructuration des monuments historiques et la rénovation des pavés de nombreux centres villes. Leurs formes et leurs dimensions sont variables.

Du fait de leurs origines diverses, les pierres sont très hétérogènes (couleur marron ou blanchâtre, pores plus ou moins importants, présence ou non de stries). Des échantillons ont été envoyés au Muséum d'Histoire Naturelle, section Géologie, Histoire de la terre pour être analysés. Une analyse pétrographique et une observation au microscope optique sur des échantillons préalablement taillés en lames minces de 0,03 mm d'épaisseur ont été effectuées.



Trois échantillons nommés faciès 1, 2 et 3 ont été observés. Chaque faciès est décrit ci-dessous :

- Le faciès moyennement vacuolaire : Faciès micritique silicifié. De nombreux vides sont remplis de silice de paléosols, remplissage polyphasé. Des rares reliquats d'argiles d'illuviation ont été observés.
- Roche la moins caverneuse, beige : microquartz avec en bordures des vides avec des sphérolites de silice fibreuse. Des reliquats d'argiles d'illuviation brunâtres ont été observés. La zone la plus compacte montre une micrite + ou - silicifiée à cristaux de quartz dispersés dans la micrite et du quartz mosaïque à fibreux dans les vides.
- Roche la plus caverneuse : structure gaufrée colorée par les oxydes de fer la roche est une micrite silicifiée. Les vides sont remplis de silice fibreuse colorée par des oxydes de fer et des argiles.

Les caractéristiques mécaniques ont été réalisées par Khoufache [7] lors de sa thèse.

### 2.1 Essai de compression

Deux séries d'essais ont été réalisées sur des éprouvettes  $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$  selon la norme NF EN 1926 [8]. Les éprouvettes ont été taillées dans des blocs de meulière. Les éprouvettes cubiques font apparaître deux familles de meulière, repérable à leurs couleurs différentes.



Fig. III- 15: essai sur éprouvettes cubiques

Le tableau III-11 présente les résistances à la compression pour les meulières de couleur blanche et marron.

couleur	Eprouvettes	F [kN]	$\sigma$ [MPa]
Blanche	1	68,30	13,94
	2	59,70	12,18
	3	128,60	26,24
Marron	1	24,80	5,06
	2	49,90	10,18
	3	33,30	6,80

Tableau III- 11 : essais de compression sur éprouvettes cubiques

Une grande dispersion des valeurs de la résistance à la compression a été remarquée à cause de l'hétérogénéité des meulières.

### 2.2 Essai d'arrachement

Le but de l'essai est de connaître la contrainte moyenne d'adhérence  $\sigma_A$ . Cinq essais ont été menés directement sur la meulière. Des éprouvettes de 10 cm de haut et 5 cm de diamètre ont

été collées sur une plaque d'acier. Le type de rupture est une rupture cohésive dans la meulière.

Essais	F [KN]	$\sigma_A$ [MPa]	Type de rupture
meulière blanche	3,87	1,94	rupture cohésive dans la meulière à 2 cm de la pastille
meulière blanche	3,21	1,61	rupture cohésive dans la meulière à 9 cm de la pastille
meulière blanche	1,72	0,86	rupture cohésive dans la meulière à 9 cm de la pastille
meulière marron	2,83	1,42	rupture cohésive dans la meulière à 2,5 cm de la pastille
meulière marron	1,16	0,58	rupture cohésive dans la meulière à 9 cm de la pastille

Tableau III- 12 : essais d'arrachement sur des éprouvettes cylindriques de meulière



Fig. III- 16: rupture lors des essais d'arrachement par traction directe

La rupture a eu lieu dans la meulière pour tous les essais.

### 2.3 Module d'élasticité

Les éprouvettes ont été carottées dans des blocs de meulière. Les corps d'épreuves sont des éprouvettes cylindriques de diamètre  $\varnothing$  80 mm et de hauteur 160 mm afin d'avoir un élancement de 2 suivant la norme NF EN 13286-43 [10]. Les déformations longitudinales et transversales ont été mesurées par deux jauges d'extensométrie diamétralement opposées.

Les essais, réalisés selon la norme NF EN 13286-43 [6], ont été menés sur trois éprouvettes. Le tableau III-13 suivant donne les modules d'élasticité longitudinaux de la meulière.

échantillons	$E_L$ [MPa]
1	2 623
2	2 855
3	2 215

Tableau III- 13 : modules d'élasticité de la meulière

Le tableau III-14 donne les caractéristiques mécaniques de la meulière blanche et marron.

Type d'essai	[MPa]
Module d'élasticité	2500
Résistance à la compression de la meulière blanche	12 à 26
Résistance à la compression de la meulière marron	5 à 10
Résistance à la traction par arrachement de la meulière blanche	1,47
Résistance à la traction par arrachement de la meulière marron	1,00

Tableau III- 14 : caractéristiques mécaniques de la meulière

La différence entre les valeurs est due à l'hétérogénéité des meulières. Le fait que les matériaux dans les ouvrages d'assainissement sont vétustes, les valeurs les plus basses sont prises en compte.

### 3. Mortier de liaison

Le mortier de liaison entre les différents blocs de meulière a été réalisé d'après des recherches bibliographiques à la bibliothèque des ponts et chaussées [9]. Le mortier de liaison est un mélange de 2/3 de ciment et 1/3 de chaux hydraulique. Ce mortier est un mortier bâtard.

Les composants du mortier sont :

- Un ciment CEM II / B-M 32,5 CP2 ;
- Une chaux hydraulique blanche NHL5 ;
- Un sable de rivière semi-concassé.

Plusieurs gâchées ont été réalisées en ajoutant de l'eau pour obtenir une résistance semblable à celle utilisée dans les constructions des ouvrages d'assainissement. La meilleure gâchée est celle qui a un rapport de E/ [Ciment+Chaux] de l'ordre 1,6 avec un volume de 5 400 litres d'eau pour la réalisation des voûtes selon le traité d'Hervieu [15].

	Mélange
Ciment [g]	2 000
Chaux [g]	1 334
Eaux [ml]	5 400
Sable [g]	32 687
E/ [Ciment + Chaux]	1,60

Tableau III- 15: quantité des matériaux

Le tableau III-16 donne les caractéristiques mécaniques du mortier de liaison.

Type d'essai	[MPa]
Module d'élasticité	5931
Résistance de flexion	0,5
Résistance de compression	0,9

Tableau III- 16: caractéristiques mécaniques du mortier

Toutes les voûtes seront construites avec le même mélange.

Après avoir présenté les essais sur la meulière et le mortier de liaison, des essais sur la maçonnerie (complexe meulière/mortier de liaison) sont menés pour connaître ses valeurs.

### 4. Matériaux composites

Les renforts composites retenus sont les lamelles et tissus de carbone ainsi que leurs colles associés.

#### 4.1 Caractéristiques des lamelles et des tissus de carbone

Les lamelles composites à hautes performances sont un arrangement de fibres de carbone, noyées dans une matrice époxydique. La très haute résistance en traction de ces lamelles permet de combler le manque de résistance en traction du béton. De plus, leur mise en œuvre est aisée du fait de leur faible épaisseur (1,2 mm) et de leur faible masse, ce qui les rend facilement transportable et de manipulation simple. Les tissus de carbone sont des tissus de fibres de carbone, d'épaisseur 0,13 mm.

Leurs avantages principaux sont :

- une mise en œuvre aisée sans moyens lourds
- une insensibilité à la corrosion
- une très haute résistance mécanique
- une excellente durabilité
- une application économique (temps de main d'œuvre réduit),...

Les caractéristiques mécaniques des plats et tissus de carbone sont répertoriées dans le Tableau III-17.

Désignation	Plats de carbone	Tissus de carbone
Module d'élasticité en traction	> 165 GPa	230 GPa
Résistance en traction	> 2 800 MPa	3500 MPa
Allongement à la rupture	> 1,7 %	1,5%

Tableau III- 17 : caractéristiques mécaniques des lamelles et tissus de carbone

#### 4.2 Caractéristiques des adhésifs

Pour appliquer les renforts, nous avons utilisé deux colles différentes à base époxy. Le rôle de l'adhésif est très important dans le cas de renforcement par matériaux composites. En effet, les efforts doivent être transmis de la structure aux renforts via la colle. Les caractéristiques mécaniques des colles pour des lamelles et les tissus de carbone sont résumées respectivement dans les tableaux III-18 et III-19.

Désignation	Colle pour des plats
Module d'élasticité	12 800 MPa
résistance à la flexion	≥ 30 MPa à 2 jours à 20°C
Adhérence sur béton	≥ 4 MPa (rupture dans le support)

Tableau III- 18: caractéristiques des colles pour les plats de carbone

Désignation	Colle pour des tissus
Module d'élasticité en flexion	3 800 MPa à 7 jours et 23°C
Résistance à la compression	≥ 55 MPa à 2 jours et 20°C
Résistance à la traction	≥ 30 MPa à 2 jours et 20°C
Adhérence sur béton sablé	Supérieure à la cohésion du support (dès 24 h)

Tableau III- 19: caractéristiques des colles pour les tissus de carbone

## 5. Essais du complexe meulière/mortier

Trois essais sur murets ont été réalisés selon la norme RILEM LUM B1 [10] dans le but de déterminer la contrainte en compression de l'ensemble meulière/mortier. Trois essais sont effectués sur des éprouvettes prismatiques de meulière liaisonnées avec le mortier, de dimensions 51 cm de hauteur, 48 cm de large et 15 cm d'épaisseur. L'épaisseur de mortier est de l'ordre de 1 à 2 cm.

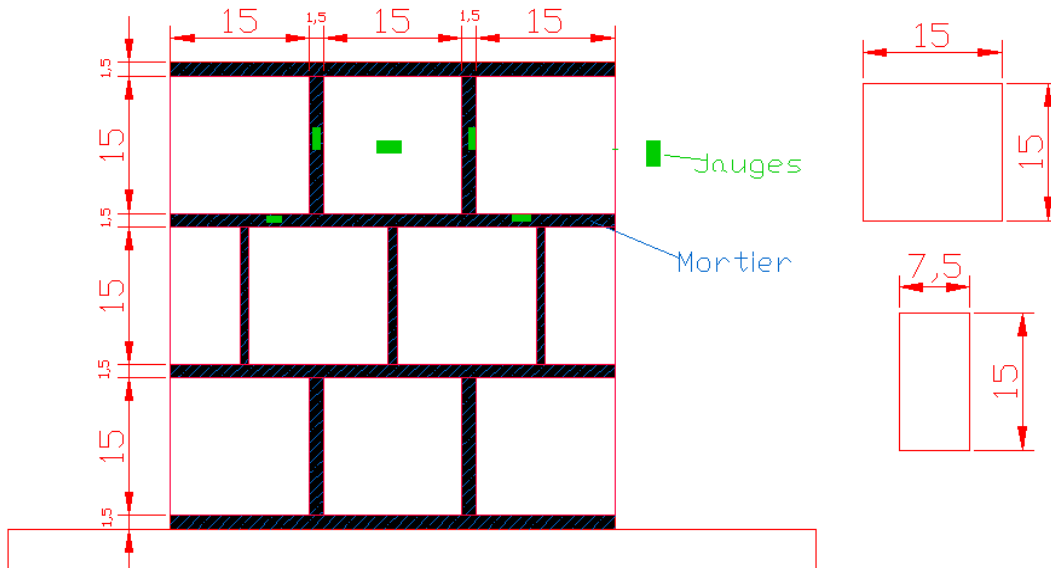


Fig. III- 17 : dimensions de l'éprouvette

Plusieurs jauges ont été collées sur le bloc de meulière et sur les joints de mortier. Ces jauges permettent de mesurer les déformations des blocs et joints en fonction de la force appliquée.

La force de chargement est appliquée sur une surface de  $0,46 \times 0,06 \text{ m}^2$  par une presse hydraulique de capacité de 250 KN et mesurée à l'aide d'un capteur de force.



Fig. III- 18 : principe de l'essai

Les murets étudiés sont soumis à une charge croissante jusqu'à la ruine à l'aide d'une machine de compression. La contrainte de compression est le rapport entre la charge de rupture et la surface d'application. Nous avons remarqués une fissuration dans le joint de mortier. La meulière n'a subit aucune dégradation. Les essais montrent une rupture systématique dans les

joints. La contrainte qui sera retenue pour la modélisation de la maçonnerie est la contrainte la plus faible. La Figure III- 19 donne la contrainte en fonction de déformation.

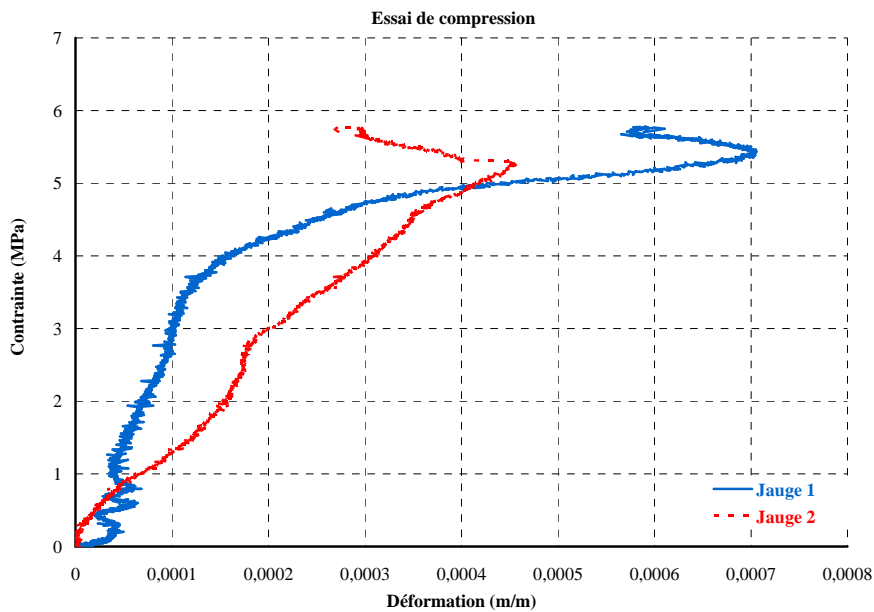


Fig. III- 19: diagramme contrainte-déformation

Essai	Contrainte [MPa]
1	5,77
2	5,40
3	5,30
moyenne	5,50

Tableau III- 20: résultats des essais sur murets

La contrainte en compression moyenne du complexe meulière/mortier de liaison est égale à 5,50 MPa. Cette valeur permettra d'homogénéiser le complexe meulière / mortier de liaison en vue de réaliser une éventuelle modélisation par éléments finis pour le dimensionnement des renforts. La ruine s'est produite au niveau de l'interface meulière/mortier dans chaque cas (fig. III-20).

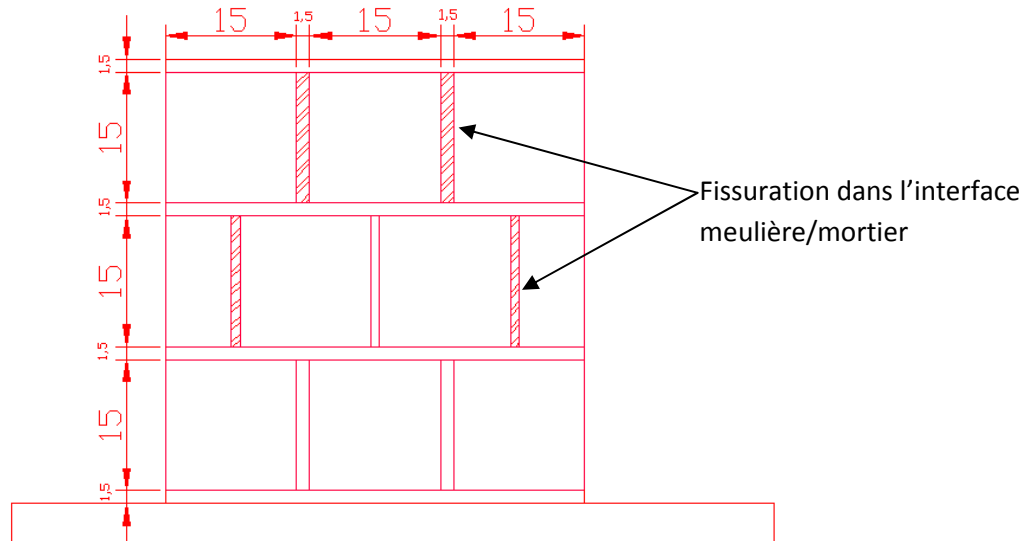


Fig. III- 20 : rupture dans les joints de mortier

De même, dans l'optique de dimensionner les renforts par calcul numérique, il est nécessaire de connaître la contrainte de cisaillement présente dans l'adhésif. Des essais de glissement sont donc présentés ci-après.

## 6. Essais de glissement

Des essais de glissement ont été réalisés pour déterminer les contraintes de cisaillement dans la colle et à l'interface mortier fibré/colle/composite, afin d'alimenter les lois de comportement des matériaux pour le calcul numérique. Cet essai correspond à un essai de traction-cisaillement à double recouvrement (blocs de mortier parallèles assemblés sur deux faces symétriques par les matériaux de renforcement). Cet essai a été adapté à notre problématique. Ce type d'essai, par rapport au simple recouvrement, permet de réduire l'excentricité du chargement et donc de diminuer les efforts de flexion. Ceci permettra de se concentrer sur les efforts de cisaillement [12].

### 6.1 Présentation des essais

Lors des précédents essais réalisés au laboratoire LGCIE de Lyon [4], le système mis en place consistait à couler les deux blocs de béton en même temps et à insérer un acier HA lors du coulage. Cet acier permettait alors d'appliquer les forces de traction de part et d'autre de notre structure. Il avait été démontré que l'adhérence entre le béton et cet acier n'avait aucun impact sur les résultats expérimentaux. La mise en place de cet essai consiste à assembler 2 blocs de mortier fibré de dimensions  $140 \times 140 \times 250 \text{ mm}^3$  grâce à des lamelles de carbone.

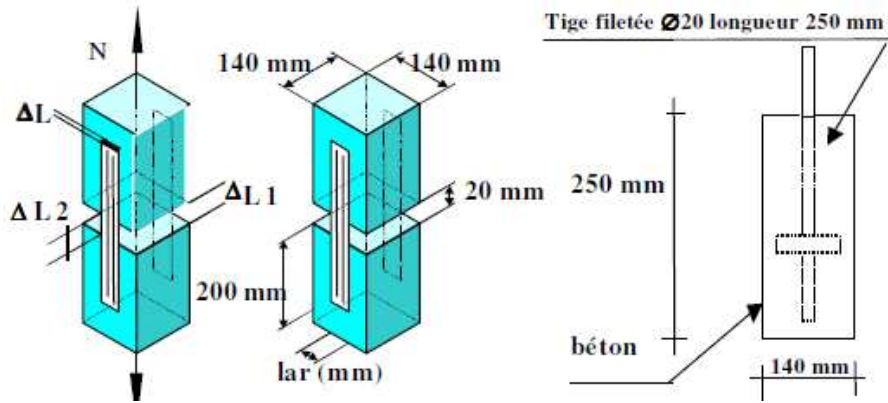


Fig. III- 21: dimensions des corps d'épreuve [4]

Les blocs de mortier fibré ont pour dimensions  $140 \times 140 \times 250 \text{ mm}^3$ . Ils sont mis en œuvre dans un moule de dimensions  $140 \times 140 \times 560 \text{ mm}^3$ , avec un élément de séparation d'épaisseur 60 mm. L'objectif est d'obtenir un alignement parfait des faces latérales des blocs (figure III- 22) [4].

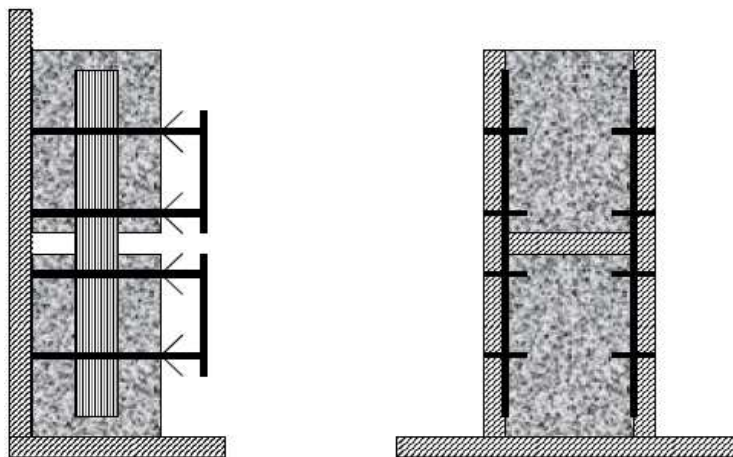


Fig. III- 22: alignement des blocs à l'aide de gabarit [4]

La largeur de la bande composite est fixée à 20 mm dans le cas des plats pultrudés [4]. La stratification de renforts composites de dimensions  $420 \times 20 \text{ mm}^2$  est réalisée sur deux faces latérales en laissant un espacement de 20 mm entre chacun des blocs.

### 6.2 Adaptation de l'essai à notre cas

Afin de limiter les efforts de frottement entre les barres et le mortier, nous avons réalisé un système pour mener à bien l'essai. L'étrier réalisé consiste à venir placer autour des blocs de mortier fibré une ossature métallique divisée en 2 pièces, qui sera utilisée pour appliquer les forces de traction de part et d'autre de la structure mortier fibré/composite.

Des plaquettes de 15 mm d'épaisseur ont été utilisées afin de résister mais également de conserver un espacement cohérent entre les deux blocs de mortier fibré. La seule valeur qui a évolué par rapport aux essais mis au point par Ferrier [4] est l'espacement entre les deux blocs de mortier, c'est-à-dire ici 30 mm. Dans notre cas, un nouveau système a été mis en place.



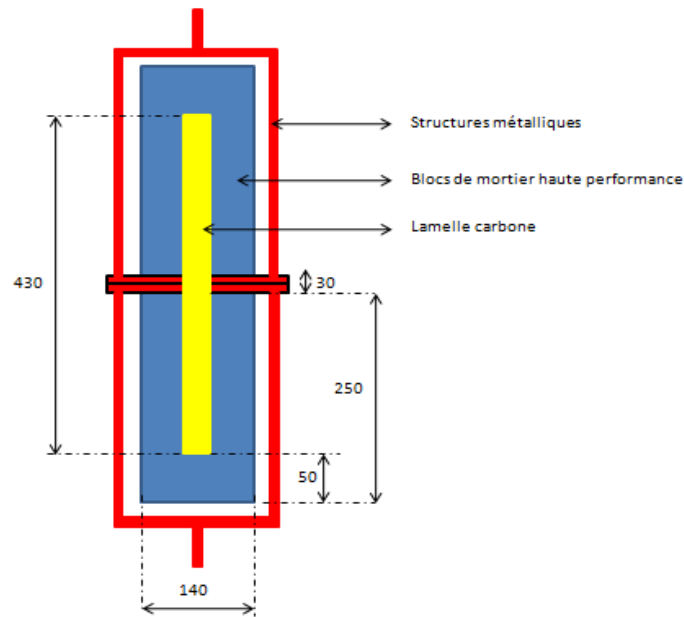


Fig. III- 23: schéma de l'assemblage structure mortier fibré/composite [4]

En effet, des essais avec un espacement de 20 et 40 mm ont été réalisés afin de déterminer l'importance de l'écart entre les deux blocs de mortier fibré. Les différences entre ces deux essais étaient minimisées du fait du recouvrement des lamelles de carbone sur le mortier. C'est pour cette raison, mais également pour un souci de mise en œuvre qu'il a été décidé de réaliser des essais avec un écart de 30 mm.

### 6.3 Phase de préparation

Des blocs de mortier fibré ont été coulés, de dimensions en longueur 250 mm et d'une section de 140 mm par 140 mm.

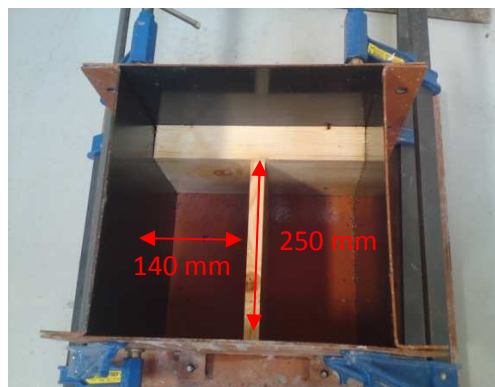


Fig. III- 24: dimensions 140 x 140 x 250 mm<sup>3</sup>

Les deux blocs doivent être séparés de 30 mm afin de réaliser l'essai avec notre étrier. Le recouvrement des lamelles sur les blocs de mortier est de 20 cm.

La mise en œuvre d'une lamelle de carbone s'effectue par double encollage. On applique donc une fine couche de colle sur le support et sur la lamelle. Ce double encollage permet d'obtenir une répartition uniforme de la colle. Puis on maroufle à l'aide d'un rouleau afin

d'enlever le surplus de colle. Nous avons pris 2 blocs de mortier fibré sur lesquels nous avons collé une lamelle de carbone en assurant l'alignement des lamelles. Les dimensions des lamelles sont  $430 \times 50 \times 1,2 \text{ mm}^3$ .

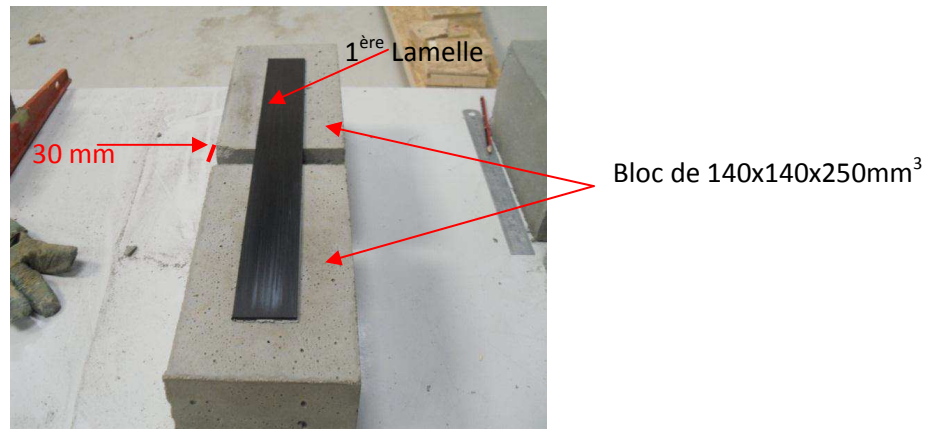


Fig. III- 25 : collage de la première lamelle

Enfin, l'ensemble est placé dans la machine à essais de traction. Les capteurs de déformations sont installés afin de récupérer les données enregistrées par une centrale d'acquisition. La charge, les déplacements entre les 2 blocs et les déformations seront enregistrés.

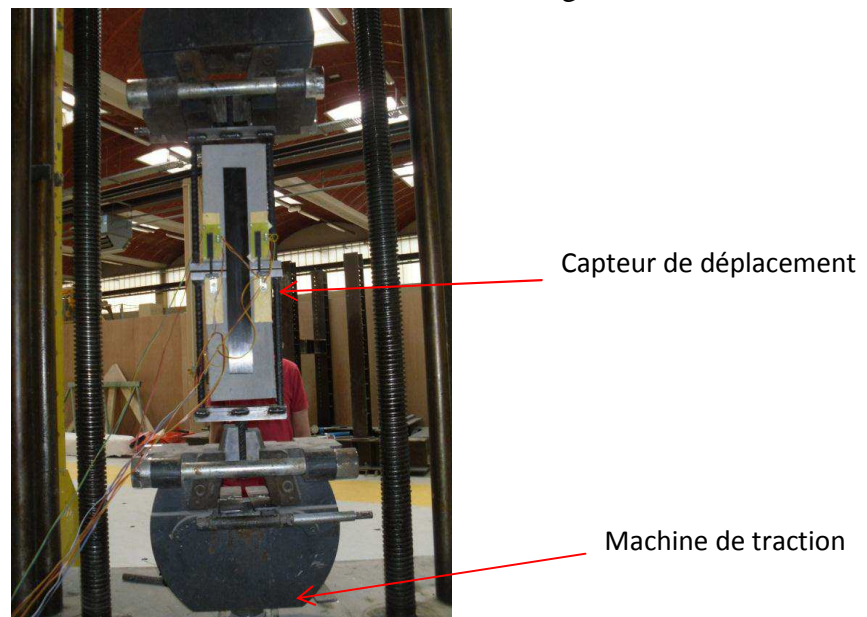


Fig. III- 26: mise en place de l'ensemble sur la machine

#### 6.4 Résultats des essais

Les essais réalisés nous permettent de calculer :

- La contrainte moyenne appliquée au joint de colle
- La déformation de cisaillement
- Le module de cisaillement de l'interface
- La contrainte maximale appliquée à l'extrémité de l'interface

Les différents paramètres sont calculés comme suit.

a/ La contrainte moyenne appliquée au joint de colle :

$$\tau_{ad,u} = \frac{F_{rupture}}{S_{collage}} \text{ (MPa)} \quad (8)$$

$\tau_{ad,u}$  : Contrainte moyenne ultime (MPa)

F : représente l'effort repris par un plat composite soit  $F = N/2$

La surface de collage est de 40 000 mm<sup>2</sup> pour les pultrudés.

b/ Déformation de cisaillement :

$$\gamma_{ad} = \frac{\Delta L_1 - \Delta L_2}{2 \cdot t_{ad}} \left( \frac{m}{m} \right) \quad (9)$$

L'écartement des deux blocs ( $\Delta L_1$  : mesure par capteur de déplacement) est dû à l'allongement de l'élément de renfort ( $\Delta L_2$  : mesure par jauge de déformations) et à la déformation au niveau de l'interface entre le mortier fibré et composite ( $\Delta L$ ).

$\Delta L_1 - \Delta L_2$  : représente le déplacement moyen dans le joint de colle

$t_{ad}$  : l'épaisseur du joint de colle. On considère qu'elle est de 1 mm pour le collage de pultrudés

c/ Module de cisaillement de l'interface :

$$G_{ad} = \frac{\tau_{ad}}{\gamma_{ad}} \text{ (MPa)} \quad (10)$$

d/ Contrainte maximale appliquée à l'extrémité de l'interface :

$$\tau_{ad,max} = \frac{N \cdot G_{ad}}{2 \cdot t_{ad} \cdot w} \left( -\frac{1}{E_b \cdot 19600} + \frac{1}{2 \cdot E_f \cdot A_f} \right) \cdot \left( \tanh(w \cdot 100) + \frac{1}{\tanh(w \cdot 100)} \right) \text{ (MPa)} \quad (11)$$

$$\text{Avec } w = \sqrt{\frac{G_{adh} \cdot 140}{t_{adh}} \left( \frac{1}{A_f \cdot E_f} + \frac{2}{19600 \cdot E_b} \right)} \quad (12)$$

N : effort maximal appliqué (N)

$G_{ad}$  : module de cisaillement de la colle (MPa)

$t_{ad}$  : épaisseur de l'interface, 1 mm pour le collage de pultrudé (mm)

$E_b$  : module d'élasticité du béton (MPa)

$E_f$  : module d'élasticité du composite (MPa)

$A_f$  : section du composite (mm<sup>2</sup>)

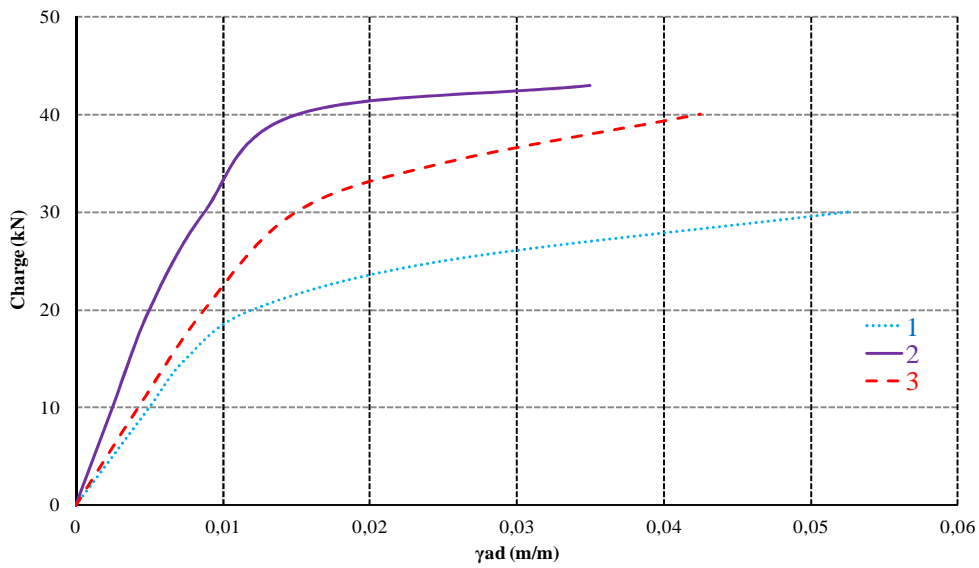


Fig. III- 27 : Loi de comportement Charge-Déformation pour les essais réalisés

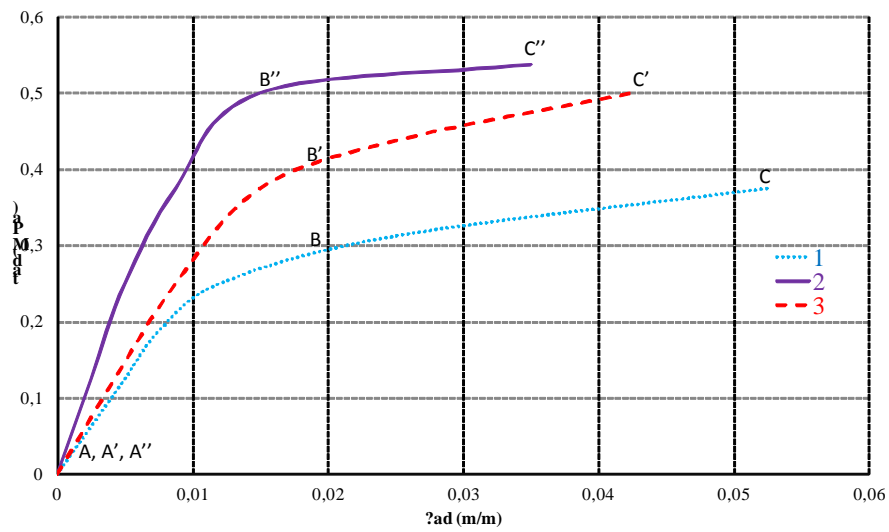


Fig. III- 28 : Loi de comportement Contrainte-Déformation pour les essais réalisés

**Essai 1**

La charge à la rupture est égale à 30 kN.

$$\tau_{ad,u} = \frac{F_{rupture}}{S_{collage}} = \frac{N}{S_{collage}} = \frac{30 * 1000}{40000} = 0.375 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{ad} = 0.02 \text{ MPa}$$

$$G_{ad} = \frac{\tau_{ad}}{\gamma_{ad}} = \frac{0.3}{0,02} = 15 \text{ MPa}$$

### Essai 2

La charge à la rupture est égale à 43 kN.

$$\tau_{ad,u} = \frac{F_{rupture}}{S_{collage}} = \frac{\frac{N}{2}}{S_{collage}} = \frac{43 * \frac{1000}{2}}{40000} = 0.5375 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{ad} = 0.015 \text{ MPa}$$

$$G_{ad} = \frac{0,5}{0,015} = 33 \text{ MPa}$$

### Essai 3

La charge à la rupture est égale à 40 kN.

$$\tau_{ad,u} = \frac{F_{rupture}}{S_{collage}} = \frac{\frac{N}{2}}{S_{collage}} = \frac{40 * \frac{1000}{2}}{40000} = 0.5 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{ad} = 0.02 \text{ MPa}$$

$$G_{ad} = \frac{\tau_{ad}}{\gamma_{ad}} = \frac{0.4}{0.02} = 20 \text{ MPa}$$

A partir des points (B, B', B''), un décollement progressive a été remarqué dans l'interface mortier fibré/matériaux composites.

Les points (B, B' et B'') ont été déterminés sur les courbes ci-dessus:

Essai	charge de rupture [KN]	$\tau_{ad}$ [MPa]	$\gamma_{ad}$ (m/m)	$G_{ad}$ [MPa]	$\tau_{ad,e}$ [MPa]	$\gamma_{ad,e}$ (m/m)
1	30	0,375	0,0525	15	0,3	0,02
2	43	0,5375	0,03	33	0,5	0,015
3	40	0,5	0,0425	20	0,4	0,02

Tableau III- 21 : Détermination des valeurs particulières des essais

### **6.5 Interprétation et analyse des résultats**

Les résultats montrent un comportement linéaire de la contrainte dans la colle en fonction de la déformation. Cependant pour le test 2, nous avons constaté un léger décollement lors du début de l'essai. Cet essai est donc à écarter.

Pour les essais (1 et 3), nous avons un comportement identique en début d'essais. Le module de cisaillement à l'interface est compris entre 15 MPa et 33 MPa. La déformation s'accroît alors jusqu'à rupture. La contrainte présente dans la colle varie de 0,3 à 0,5 MPa.

Pour les calculs numériques, nous prendrons les valeurs les plus faibles afin de rester dans le domaine de sécurité.

La rupture s'est effectuée par décohésion du support (rupture dans le mortier fibré) ce qui a provoqué l'arrachement de la lamelle au niveau de la colle sur la face opposée de l'éprouvette.

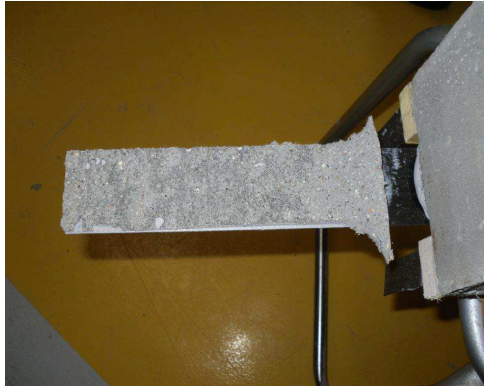


Fig. III- 29: rupture du mortier

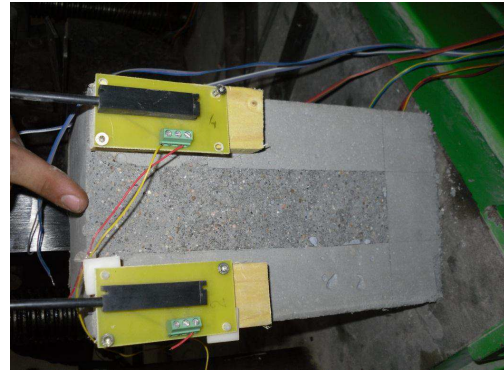


Fig. III- 30: rupture de la colle

## Conclusion

Les essais de caractérisation sur la meulière et le mortier de liaison ont été réalisés afin de construire des voûtes non enduites. L'ensemble des corps d'épreuves sera construit de manière identique.

Des essais de caractérisation sur 4 mortiers fibrés sont réalisés dans le but d'obtenir les caractéristiques mécaniques avant de les appliquer à l'intrados des voûtes.

Le mortier fibré qui sera appliqué sur la surface intérieure des voûtes permettra de transmettre les efforts aux renforts sans avoir de décollement prématuré du complexe mortier fibré/renforts. Des essais de rupture sur voûtes ont été effectués, afin de calculer le taux de travail du mortier fibré.

Les essais de glissement nous ont permis de mettre en évidence la loi de comportement de l'interface composite/mortier fibré, et de déterminer les contraintes de cisaillement à cette interface, ce qui sera utile pour la modélisation numérique de voûtes.

Le but des essais de rupture sur voûtes est d'appliquer les deux procédés de renforcement, soit un chemisage mince non armé par mortier fibré, soit un chemisage mince avec collage de matériaux composites sur des ouvrages d'assainissement en maçonnerie.

## **Bibliographie**

- [1] NF EN 13290-5, « Essai pour béton durci – Partie 5 : résistance à la flexion sur éprouvettes ».
- [2] NF EN 13290-3, « Essai pour béton durci – Partie 3 : résistance à la compression sur éprouvettes »
- [3] NF EN 1542 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton. Mesurage de l'adhérence par traction directe.
- [4] Réparation et Renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites – recommandations provisoires (2003); Documents scientifiques et techniques, AFGC.
- [5] NF EN 13290-6, « Essai pour béton durci – Partie 3 : résistance en traction par fendage »
- [6] NF EN 13286-43 (2003), « Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques », AFNOR.
- [7] N. Khoufache (2008), Contribution à la restructuration des ouvrages d'assainissement en maçonnerie au moyen de matériaux composites, Thèse de Doctorat, Université d'Artois.
- [8] Standard NF EN 1926 (1999), « Méthodes d'essais pour pierres naturelles », AFNOR.
- [9] Annales des Ponts des Chaussées, 1834, 1836, 1854 et 1856, Bibliothèque Centrale des Ponts et Chaussées
- [10] RILEM (1994) LUMB1-compressive strength of small walls and prisms. Technical report, RILEM.
- [11] NF EN 12617-4 (2002), « Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton- méthodes d'essai-partie 4 : détermination du retrait et du gonflement », AFNOR.
- [12] S. Chataigner (2008), « Conception et dimensionnement d'un ancrage de hauban plat en matériaux composites ». Thèse de doctorat, Université Paris-Est, Institut Navier.

# Partie II



## **Introduction**

A travers la première partie, nous avons pu constater qu'il est possible d'appliquer des renforts à base de fibres de carbone ou de verre sur des structures voûtées en maçonnerie.

Les ouvrages d'assainissement en meulière nécessitent d'être réhabilités. Cependant, il est nécessaire de développer des techniques moins onéreuses mais aussi plus durables. Nous proposons donc de mettre au point deux procédés :

- Un chemisage mince par mortier fibré de 3 cm, afin de réhabiliter les ouvrages d'assainissement
- Un renforcement par des matériaux composites (lamelles et tissus de carbone) après avoir homogénéisé la surface par un chemisage mince en mortier fibré.

En effet, dans les cas des ouvrages en maçonnerie, la technique de collage des matériaux composites n'est pas applicable directement à ces ouvrages du fait de l'irrégularité du support. Il est nécessaire de réaliser un chemisage mince de 2 cm ayant les caractéristiques nécessaires pour transmettre les efforts de la maçonnerie aux matériaux composites.

**Le chapitre 4** présente le comportement général des ovoïdes et des voûtes, puis les généralités sur la méthode des éléments finis utilisée pour déterminer les dimensions de nos corps d'épreuves. Suite à la validation de nos dimensions, les essais sur voûtes à l'échelle 1 seront menés. Les résultats seront donnés et nous permettront d'appliquer nos procédés de réhabilitation.

**Le chapitre 5** est découpé en deux parties. La méthodologie d'application du mortier fibré sur des voûtes est donnée dans un premier temps. Puis, les résultats des essais de rupture des voûtes en maçonnerie enduites en deuxième temps. Ce chapitre permet de valider l'utilisation de chemisages minces pour la réhabilitation des ouvrages d'assainissement.

**Le chapitre 6** est divisé en deux parties. La mise en œuvre des renforts, lamelles et tissus, est détaillée en premier lieu. Puis, les résultats des essais de rupture des voûtes en maçonnerie renforcées seront exploités afin de valider l'utilité de ce procédé.

En synthèse et conclusion, une comparaison entre nos méthodes et la méthode standard (réhabilitation par béton projeté armé) est présentée avant de donner les perspectives de notre recherche.

## Chapitre 4 :

### Essais sur voûtes non renforcées

#### Sommaire

Introduction .....	91
1. Comportement mécanique des ouvrages d'assainissement .....	92
2. Simulation numérique des ouvrages d'assainissement .....	94
2.1 Hypothèses générales .....	94
2.1.1 Géométrie retenue .....	94
2.1.2 Conditions d'appui .....	94
2.1.3 Constitution de la voûte.....	94
2.1.4 Caractéristiques des matériaux.....	94
2.1.5 Chargement .....	95
2.1.6 Etat de référence.....	95
2.2 Calculs préliminaires .....	95
3. Construction des voûtes .....	96
4. Essais de rupture sur les voûtes .....	97
4.1 Résultats des essais - Voûtes non enduites-Famille .....	98
4.2 Résultats des essais- Voûtes non enduites-Famille B.....	100
4.3 Mode de rupture.....	101
Conclusion.....	102
Bibliographie.....	104

## **Introduction**

Avant la réalisation des essais, le dimensionnement des corps d'épreuves est nécessaire. En effet, du fait de la complexité des ovoïdes en meulière, les essais seront menés sur des voûtes en maçonnerie non renforcées. De ce fait, il est nécessaire de modéliser la voûte qui sera testée sous chargement vertical afin de reproduire le comportement d'un ouvrage enterré.

Les calculs numériques aux éléments finis sont menés dans le cadre de la mécanique de la rupture. Le logiciel utilisé [1] a été acquis par la société Structure & Réhabilitation. Ces calculs permettent de déterminer les conditions aux limites et de valider notre modèle. Les essais de rupture sur des voûtes représentent la partie importante de la thèse.

Ce chapitre présente le comportement général des ovoïdes et des voûtes, puis les généralités sur la méthode des éléments finis utilisée. La méthodologie de calculs par éléments finis sur une voûte sera présentée. Les résultats de nos simulations permettront alors de réaliser les essais sur voûtes à l'échelle 1. Ainsi la réalisation des voûtes et les résultats des essais de rupture sur des voûtes en maçonnerie non renforcées sont détaillés.

## **1. Comportement mécanique des ouvrages d'assainissement**

L'analyse du comportement des ouvrages d'assainissement est complexe. Cette complexité peut être expliquée par le fait que l'analyse est liée à un nombre important de paramètres tels que :

- les caractéristiques géométriques et mécaniques liées à la structure ;
- les caractéristiques liées au sol environnant ;
- les types de chargement ;
- les interactions sol-structure ;
- les caractéristiques du renfort à mettre en place.

Les collecteurs d'assainissement peuvent être soumis à plusieurs types de chargement. En effet, les efforts auxquels sont soumis les égouts sont divers et variés. On peut distinguer les efforts engendrés par le poids propre de l'égout, les sollicitations dues aux effluents (poids des effluents et pressions), les charges extérieures des terres (verticales, pressions latérales,...) ou encore la pression hydrostatique de la nappe.

Deux types de charges existent : charges horizontales (poussé des terres,...) et charges verticales (immeuble d'habitation,...). Il est difficile de simuler les charges horizontales du fait de l'impossibilité de réaliser les butées latérales contrairement aux ouvrages d'assainissement enterrés.

Pour notre cas, seules les charges extérieures de remblaiement et de surface seront prises en compte lors de nos calculs. De ce fait, les corps d'épreuve testés pour notre étude, ne seront soumis qu'aux seules charges extérieures verticales. De plus, ce type de chargement permet de se situer dans le cas de renforcement le plus défavorable lors d'un renforcement ponctuel en clé de voûte. Les actions à considérer sont donc la pression verticale des terres et celle due aux charges d'exploitation roulantes routières, permanentes ou de chantier à la surface.

La charge considérée correspond à la résultante des pressions verticales explicitées précédemment. Afin de déterminer la courbe des moments, l'équilibre sera réalisé par l'application d'une même charge en radier.

A partir des calculs menés par Kentie [2], le mécanisme de ruine est déduit du diagramme des moments. Les zones tendues représentent les zones de fissuration du matériau lors du dépassement des contraintes limites de traction. La Fig. IV-1 donne la répartition des moments le long du contour d'un ouvrage ovoïdal sans embase.

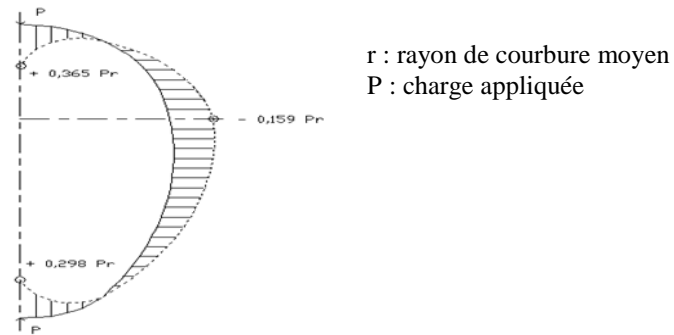


Fig. IV- 1 : diagramme des moments d'un ovoïde

Le moment maximal est relevé en clé de voûte. A long terme, la maçonnerie présente des déformations (par micro-fissuration ou formation de rotules), ce qui induit la redistribution des contraintes et donne aux ouvrages des possibilités d'adaptation.

Le mécanisme de ruine est défini [3] par un affaissement de voûte et une divergence des piédroits (figure IV-2);

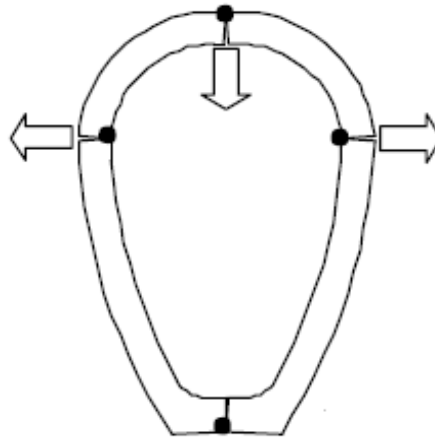


Fig. IV- 2: mécanisme de ruine d'un ovoïde.

Les ouvrages ovoïdaux reprennent de plus grands moments que les ouvrages circulaires pour les charges horizontales ou verticales. Lorsqu'il y a combinaison des charges verticales et de poussées horizontales, ce qui est le cas pour les ouvrages enterrés, les ovoïdes sont plus résistants que les ouvrages circulaires [4].

La section ovoïdale présente donc une forme optimale en terme de résistance mais aussi d'un point de vue hydraulique (vitesse de l'écoulement plus importante, pas de stagnation des effluents).

## **2. Simulation numérique des ouvrages d'assainissement**

La méthode des éléments finis est sans conteste la méthode d'analyse des structures la plus générale et la plus puissante. Elle permet la résolution approchée de nombreux problèmes de mécanique notamment en comportement non linéaire. Pour effectuer notre modélisation, le logiciel URUS [1] a été utilisé.

Basé sur la méthode des éléments finis, il permet de mener les calculs de résistance et de stabilité en linéaire ou non-linéaire d'ouvrages aux géométries les plus diverses.

### **2.1 Hypothèses générales**

#### **2.1.1 Géométrie retenue**

Compte tenu des sections pour les ouvrages visitables (ovoïdes 170/90 à 230/130), une voûte représentative de diamètre intérieur fixé à 1 m a été retenue. Pour les mêmes raisons de représentativité, une épaisseur de maçonnerie non enduite comprise entre 0,15 m et 0,25 m a été considérée.

#### **2.1.2 Conditions d'appui**

Les appuis de la voûte d'un ovoïde sont considérés déplaçables, le déplacement des piédroits au niveau des naissances dépendant de l'interaction sol-structure. Cette caractéristique influe sur l'état des contraintes dans la voûte au moment du renforcement. En revanche, sous l'action d'un chargement vertical, la ruine de la voûte intervient dans une situation d'appuis bloqués du fait de la butée apportée par le sol.

De ce fait, ainsi que pour des raisons de facilité de mise en œuvre de l'essai et de représentabilité d'un ovoïde, les déplacements des appuis sur la dalle d'essai seront bloqués par la mise en place de contreforts à l'extrados des appuis sur une hauteur à déterminer de manière à empêcher une ruine prématurée par glissement sur appuis.

#### **2.1.3 Constitution de la voûte**

La structure est construite en maçonnerie de meulière assemblée sur cintres en bois. Les blocs présentent une épaisseur voisine de 15 cm et l'épaisseur des joints de mortier est de l'ordre de 2 cm environ. La longueur de la voûte est de 1,2 m de long de manière à étudier ultérieurement une solution de collage partiel.

#### **2.1.4 Caractéristiques des matériaux**

En raison de l'hétérogénéité importante de la meulière, la maçonnerie et l'enduit présentent les caractéristiques suivantes :

Maçonnerie :

Module de déformation longitudinale :  $E_{\text{maçonnerie}} = 5000 \text{ MPa}$

Coefficient de Poisson :  $\nu_{\text{maçonnerie}} = 0,2$

Résistance à la compression :  $R_{c \text{ maçonnerie}} = 5 \text{ MPa}$

Poids volumique :  $22 \text{ kN/m}^3$

Enduit :

Module de déformation longitudinale :  $E_{\text{enduit}} = 24000 \text{ MPa}$

Coefficient de Poisson :  $\nu_{\text{enduit}} = 0,15$

Résistance à la compression :  $R_{c_{\text{enduit}}} = 30 \text{ MPa}$

Poids volumique :  $22 \text{ kN/m}^3$

### 2.1.5 Chargement

Le chargement appliqué est vertical centré, et réparti sur toute la longueur de voûte. La largeur est définie par l'ouverture angulaire du chargement (angle à la clé pour des raisons de symétrie). Ce chargement vise à reproduire l'action du sol, hors effet de butée au niveau des reins.

### 2.1.6 Etat de référence

Le modèle de voûte seule est représentatif de l'état de l'ouvrage existant après dégarnissage de l'enduit. Ce dégarnissage concerne une épaisseur de 1 à 2 cm en moyenne.

Aussi, et afin de limiter le nombre de voûtes testées, l'état de référence avant renforcement est considéré réalisé par une voûte après application d'un enduit sur 2 cm environ, en supposant négligeable la contribution structurelle de cet enduit.

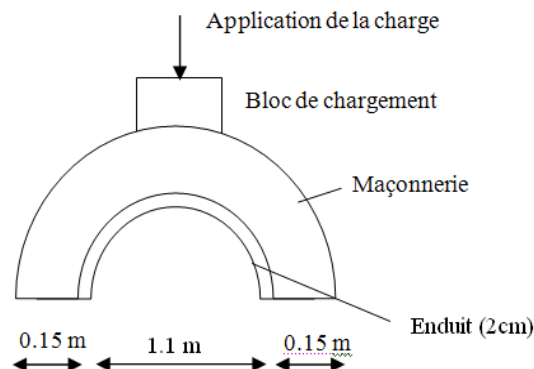


Fig. IV- 3: principe de l'essai

## 2.2 Calculs préliminaires

Les calculs ont pour objet de déterminer les conditions d'appuis de la voûte et le dispositif d'application des charges en favorisant un mode de ruine en flexion pour la voûte seule (sans glissement sur appuis ou au droit des joints).

D'après le calcul mené dans la thèse de Khoufache [5], plusieurs observations ont été remarquées :

- La modélisation adoptée concerne une voûte enduite de 18 cm d'épaisseur. Compte tenu des irrégularités de la maçonnerie, elle peut être jugée représentative d'une voûte de 10 à 17 cm d'épaisseur environ avant application de l'enduit.

- Le calage d'un modèle éléments finis à partir de cette charge a été réalisé. Il requiert l'adoption d'une valeur très faible pour le paramètre de résistance à la traction. Les déplacements verticaux en clé à la ruine sont voisins de 0,11 mm.
- Les dimensions de la voûte utilisée dans notre calcul aux éléments finis seront reprises pour la campagne expérimentale.

A l'issue de sa modélisation, le corps d'épreuve retenu a la géométrie suivante. Les corps d'épreuve sont des voûtes dont les caractéristiques géométriques sont données Fig. IV-5.

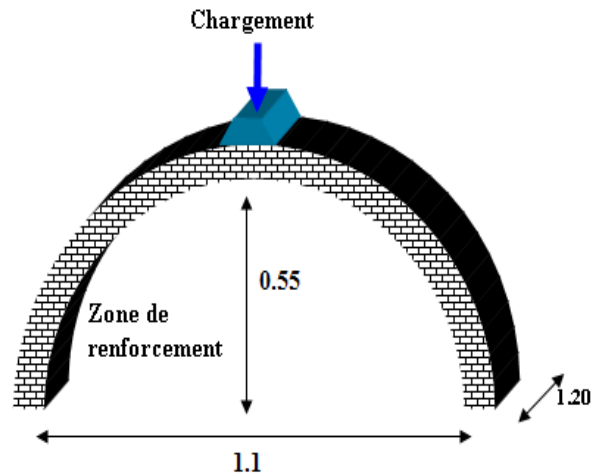


Fig. IV- 4: caractéristiques géométriques d'une voûte

### 3. Construction des voûtes

Les voûtes ont été construites en respectant les techniques de construction utilisées à l'époque du Baron Haussmann [6]. Toutes les voûtes ont été construites avec le même mortier. La résistance mécanique du mortier a été contrôlée lors de la construction des voûtes.

Des coffrages en bois, en demi-cylindre ont été conçus (Fig. IV- 5). La hauteur des cintres est de 55 cm. Les cintres sont composés de deux parties juxtaposées correspondant chacune à une demie voûte. Cette disposition servira à faciliter le décoffrage après l'achèvement de l'ouvrage. Des blocs de meulière sont disposés sur les cintres afin de réaliser un maillage. Leurs formes sont variables. Les blocs sont sciés et taillés par des spécialistes de la taille de pierre. Une bâche est placée sur les cintres en bois avant de maçonner les blocs de meulière sur les coffrages. Le rôle de cette bâche est d'empêcher l'eau du liant de s'infiltrer dans le bois des coffrages. De plus, le décoffrage sera plus aisé. Les voûtes sont ensuite maçonnées comme le montre la photo de la Fig. IV- 6.





Fig. IV- 5: coffrage en bois



Fig. IV- 6: construction des voûtes

#### 4. Essais de rupture sur les voûtes

L'essai est réalisé pour un chargement vertical sur l'ensemble des voûtes. Afin de répartir la charge uniformément en clé de voûte, un profil métallique (0,20 m x 1,20 m) est placé sur la voûte. L'application de la charge s'effectue de manière uniforme sans glissement sur la clé. Le vérin de la presse a une capacité de 250 KN piloté numériquement. L'ensemble de l'essai est piloté en déplacement à raison de 0,01 mm/s (Fig. IV- 7). Plusieurs grandeurs physiques ont été enregistrées lors de l'essai (Charge, déplacement).

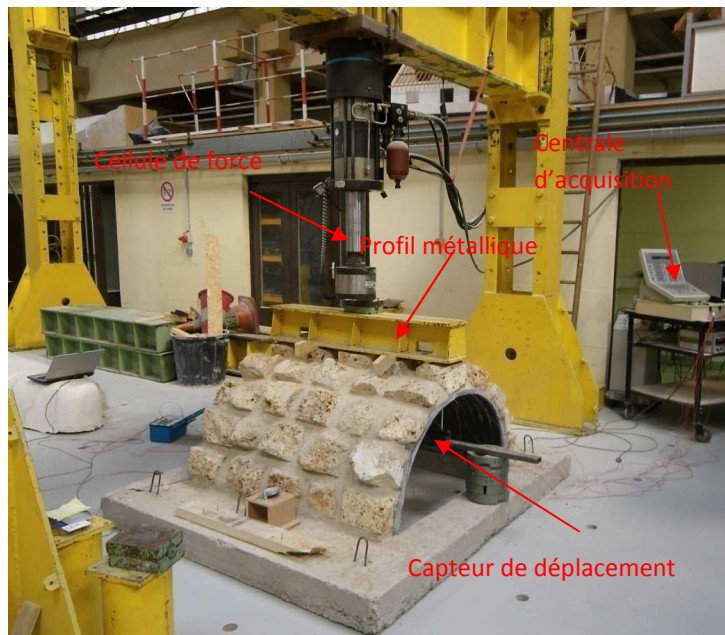


Fig. IV- 7: dispositif expérimental

Deux groupes d'étudiants du Lycée Jacques le Caron (Arras) ont construits nos voûtes (famille A et famille B). La comparaison sera effectuée entre les voûtes de même famille.

	voûtes	nombre
famille A	non enduite (A1 et A2)	2
	enduite de 3 cm	8
	béton armé	1
famille B	non enduite (B1 et B2)	2
	enduite de 2 cm	1
	enduite de 2 cm renforcée par des lamelles de carbone	2
	enduite de 2 cm renforcée par des tissus de carbone	2
	béton armé	1

Tableau IV- 1 : essais sur des voûtes



Fig. IV- 8: voûte de la famille A



Fig. IV- 9: voûte de la famille B

Les voûtes (A) ont été construites suivant le traité d'Hervieu [6] par le premier groupe d'étudiants. C'est à dire sans mortier de liaison, les voûtes sont stables. Les voûtes de la famille B ont été construites avec un alignement des différents blocs.

#### 4.1 Résultats des essais - Voûtes non enduites-Famille A

Deux voûtes non enduites ont été testées. Elles ont été réalisées dans le but de déterminer la charge à la rupture et le mode de rupture. Les résultats des essais sont présentés dans le Tableau IV- 2.

Essais sur voûte	Epaisseur [cm]	Charge d'apparition de la première fissuration [KN]	Charge à la rupture [KN]
non enduite A1	12	15,18	19,58
non enduite A2	17	17,45	36,83

Tableau IV- 2: résultats des essais sur voûtes non enduites

Les essais montrent que la charge d'apparition de la première fissuration est quasiment la même. Les différences sont dues à l'hétérogénéité, l'origine des meulières et les dimensions de chaque voûte. L'hétérogénéité est due aussi à la fabrication des voûtes.

Les variations de la charge en fonction de la flèche sont représentées sur la Fig. IV-10.

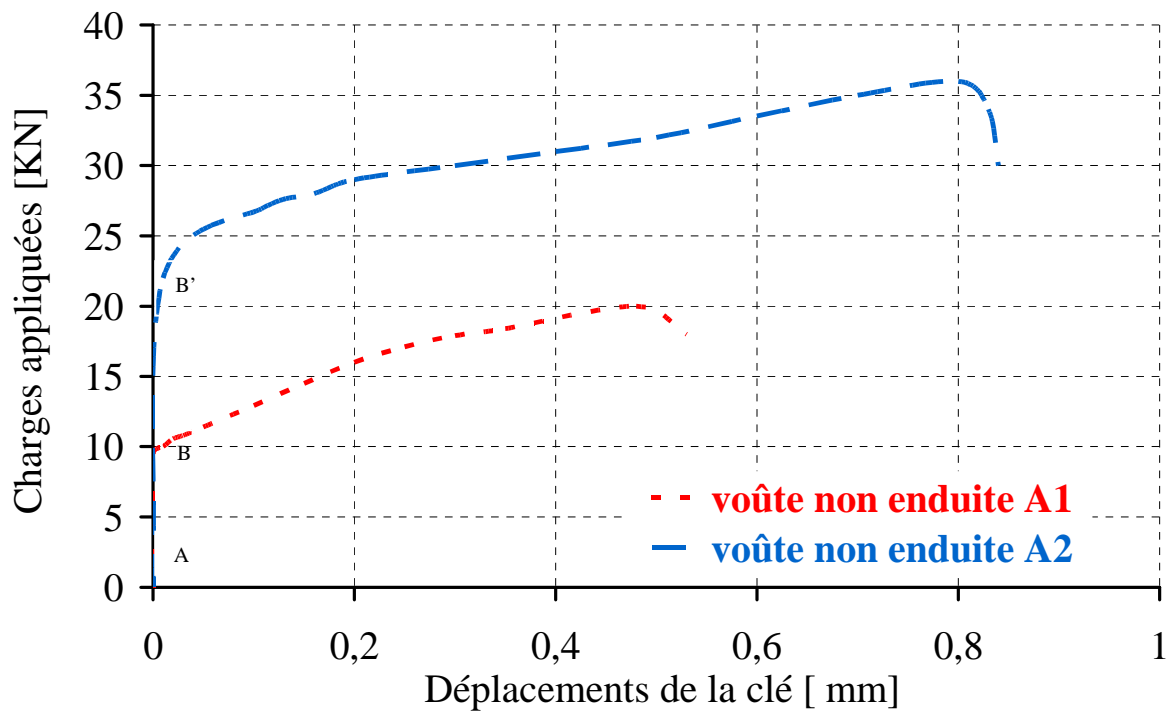


Fig. IV- 10: comportement des voûtes non enduites

La voûte A2 a une épaisseur plus élevée au niveau des reins à droite qu'au niveau des reins à gauche, l'épaisseur en clé est de 17 cm, ce qui implique un accroissement de la charge de rupture.

Sur les courbes ci-dessous, nous pouvons distinguer deux phases :

Premières phases AB et AB' :

Cette première phase constitue la mise en place des blocs. Aucun déplacement de la clé de voûte n'est constaté. Pour les voûtes 1 et 2, les phases AB et A'B' sont telles que les valeurs des charges n'entraînent pas de fissurations importantes que ce soit dans la meulière ou dans les joints de mortier. Aucune fissure n'est apparue jusqu'à B et B' qui correspondent à l'apparition de la première fissuration et à une force appliquée de 15,18 kN pour la voûte 1 et de 17,45 kN pour la voûte 2.

Deuxièmes phases  $BC_{max}$  et  $B'C'_{max}$ :

Les valeurs de la charge entraînent des fissurations dans l'interface meulière/mortier disposé entre les différents blocs de meulière.

Dans une étude réalisée par Cancelliere [7], les arcs non renforcés ont eu le même comportement structural que nos voûtes. La même allure pour la courbe charge-déplacement a été obtenue.

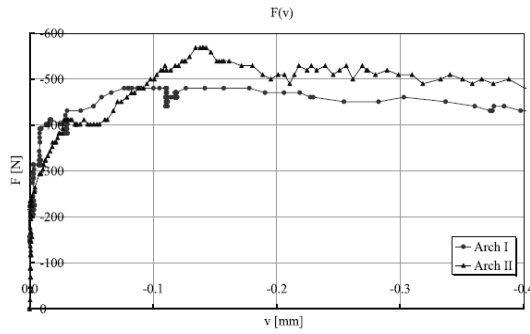


Fig. IV- 11: comportement des arcs non renforcés [7]

#### 4.2 Résultats des essais- Voûtes non enduites-Famille B

Deux voûtes non enduites ont été testées. Elles ont été réalisées dans le but de déterminer la charge à la rupture et le mode de rupture. Les résultats des essais sont présentés dans le Tableau IV- 3.

Essais sur voûte	Epaisseur [cm]	Charge d'apparition de la première fissuration [KN]	Charge à la rupture [KN]
non enduite B1	12	8	9,32
non enduite B2	12	9	10,5

Tableau IV- 3: résultats des essais sur voûtes non enduites

Les essais montrent que la charge d'apparition de la première fissuration est quasiment la même. Les variations de la charge en fonction de la flèche sont représentées sur la Figure IV-12.

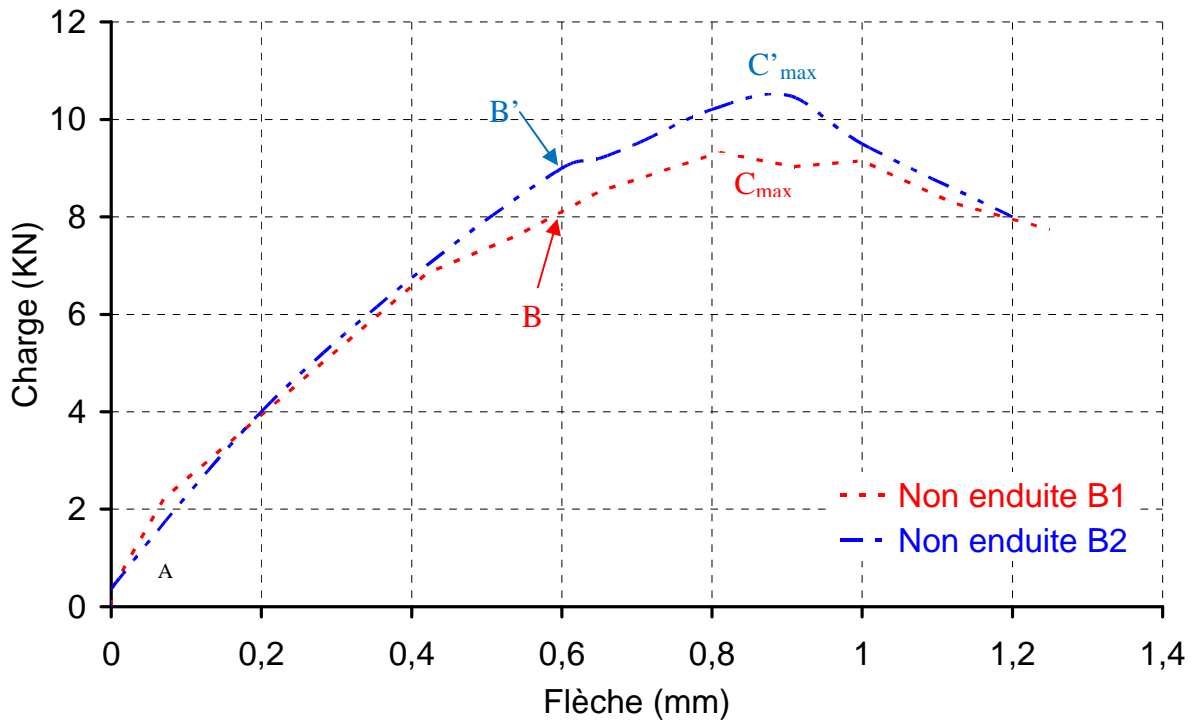


Fig. IV- 12: variation de la charge en fonction de la flèche pour les voûtes non enduites B

Sur les courbes ci-dessus, nous pouvons distinguer deux phases :

Premières phases AB et AB' :

Les valeurs de charges n'entraînent pas de fissurations et les courbes montrent un comportement linéaire pour les deux voûtes non enduites. Des microfissurations sont apparues en joints du mortier de liaison à partir de 7 kN pour les deux voûtes.

Deuxièmes phases BC<sub>max</sub> et B'C'<sub>max</sub>:

Les valeurs de la charge entraînent la fissuration dans l'interface meulière/mortier sur toute la longueur de la voûte puis en clé de voûte. La charge à la rupture est de 9,32 KN pour la voûte non enduite B1 et de 10,5 pour la voûte non enduite B2.

### 4.3 Mode de rupture

Les fissures sont apparues dans les joints du mortier au niveau des reins à l'extrados et puis en clé de voûte à l'intrados (Fig. IV-13.). L'ensemble des fissures est continu dans la longueur de la voûte. Aucun bloc de meulière n'a été détérioré lors de l'essai.



Fig. IV- 13: fissuration dans les joints du mortier au niveau des reins à l'extrados et en clé

Les quatre voûtes ont présenté le même comportement structurel, caractérisé essentiellement par la formation de quatre rotules. La première fissure est apparue dans l'interface meulière/mortier au niveau des reins à l'extrados pour une charge de 16 KN pour la voûte non enduite 1. Les fissures sont ensuite apparues en clé de voûte à l'intrados. Ces fissures se sont propagées dans les joints de la maçonnerie.

Le mécanisme de ruine a été le même pour les quatre voûtes, le mécanisme de ruine de la voûte non enduite A1 et A2 est présenté respectivement en Fig. IV-14 et Fig. IV-15.

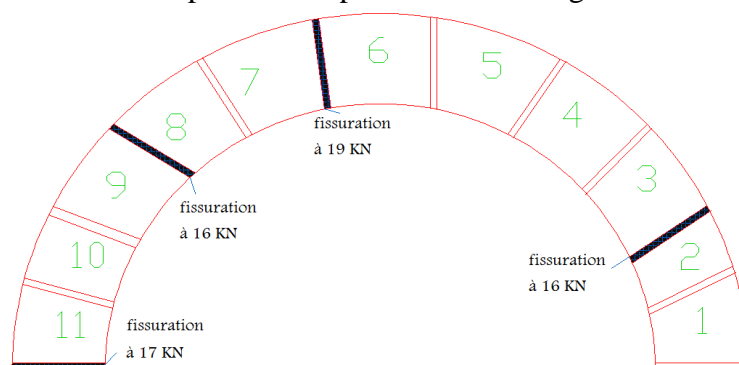


Fig. IV- 14: cartographie d'apparition des fissures pour la voûte non enduite A1

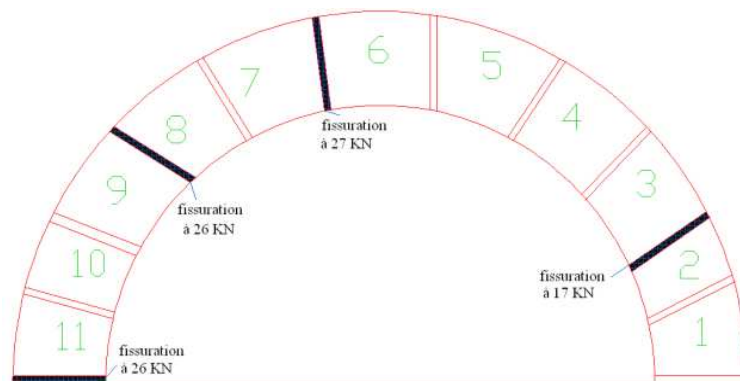


Fig. IV- 15 : cartographie d'apparition des fissures pour la voûte non enduite A2

Les fissures apparues dans les joints de mortier créent des rotules au niveau de l'intrados et de l'extrados de la voûte comme dans les travaux réalisés par Cancelliere [7] (Fig. IV- 16).

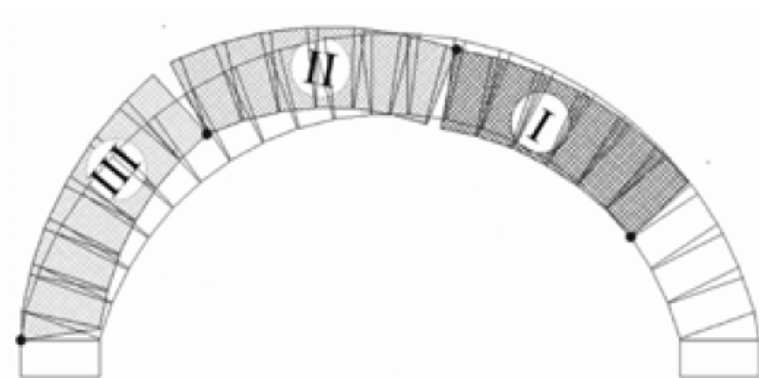


Fig. IV- 16: cartographie d'apparition des fissures

### Conclusion

Après avoir donné le dimensionnement des corps d'épreuves. Des résultats sur des essais de rupture sur des arcs non renforcés ont été présentés et ont été confrontés avec des essais réalisés en Italie [7]. Le même mode de rupture a été obtenu pour tous les essais ce qui a confirmé nos résultats.

Basé sur les résultats des essais, les conclusions suivantes peuvent être émises:

- La charge d'apparition de la première fissuration est la même ;
- Le mode de ruine est la même pour les quatre essais de rupture ;
- Le comportement des voûtes dépend de la façon de la construction des voûtes.

Les deux chapitres suivant montrent les deux techniques de réhabilitation par:

- chemisage mince non armé de 3 cm renforcé par mortier fibré
- matériaux composites (lamelles et tissus de carbone)

Suite aux essais sur des voûtes non enduites et renforcées (par mortier fibré, par lamelles et tissus de carbone).

La suite de la campagne expérimentale s'attachera à :

- comparer les voûtes non enduites et les voûtes enduites de 3 cm de la famille A, en prenant en compte la charge de la première fissuration, la flèche, la charge à la rupture et le mode de rupture.
- De même pour les voûtes de la famille B, témoins et enduites de 2 cm avec ou sans renforcement par collage de lamelles ou tissus de carbone.

## **Bibliographie**

- [1] URUS Version 9, 'Logiciel de calculs de structures par éléments finis', @bd soft.
- [2] Kentie (1968), "Zterke-Berekening van riolbmzen net eivermig profiels", technische Gemmeete blad, octobre 1915 – octobre 1917, Issu de A.Gerrin, G. Daniel, "Traité de béton armé". Tome 8, Dunod.
- [3] O. Thépot (2004), "Prise en compte des caractéristiques en petites déformations des sols dans l'étude du comportement des collecteurs enterrés". Thèse de Doctorat, ENPC.
- [4] A. Gerrin, G. Daniel (1968), "Traité de béton armé". Tome 8, Dunod.
- [5] Khoufache N. (2008), « Contribution à la restructuration des ouvrages d'assainissement en maçonnerie au moyen de matériaux composites », Thèse de Doctorat, Université d'Artois.
- [6] Jules Hervieu (1897), Traité Pratique de la Construction des Egouts, Paris BAUDRY & CIE Editeurs, p. 221-260
- [7] Ilaria Cancelliere, Maura Imbimbo, and Elio Sacco (2010), "Experimental tests and numerical modeling of reinforced masonry arches" Engineering Structures Volume 32, Issue 3, Pages 776-792.



## Chapitre 5 :

### Chemisage mince non armé par mortier fibré

#### Sommaire

Introduction .....	106
1. Mise en place du mortier fibré .....	107
2. Résultats des essais .....	108
2.1 Mortier fibré A .....	108
2.2 Mortier fibré B .....	111
2.3 Mortier fibré C .....	112
2.4 Mortier fibré D .....	115
3. Synthèse .....	117
4. Mode de rupture .....	118
Conclusion.....	120
Bibliographie.....	121

## Introduction

Dans cette partie, les voûtes utilisées sont les voûtes de la famille A (cf. Chapitre 4). Les voûtes sont enduites sur une épaisseur de 3 cm à l'aide de 4 produits. Le but de cette partie est de valider l'utilisation d'un chemisage mince sans armatures métalliques pour la réhabilitation des ouvrages d'assainissement en meulière. Le tableau suivant liste les cas où l'on peut utiliser le chemisage mince non armé en conservant la section hydraulique tout en évitant d'utiliser des matériaux corrodables pour un coût de réparation moindre. Le mortier fibré est utilisé dans les cas de fissurations superficielles et de problème lié à l'étanchéité. L'étude validera l'intérêt d'utiliser le mortier fibré également dans le cas des dégradations structurelles. Un degré d'endommagement pourra être défini par rapport au chemisage traditionnel en béton armé.

Méthode de renforcement		
Types de pathologies	Béton armé (6 à 8 cm)	Mortier fibré (3 cm)
Dégradations superficielles	/	x
Dégradations structurelles	x	x
Etanchéité	/	x

Tableau V- 1: méthodes de renforcement en fonction des pathologies en maçonnerie

Les caractéristiques géométriques des voûtes testées (Fig. V-1) seront reprises suivant la section d'un ovoïde T210 [2].

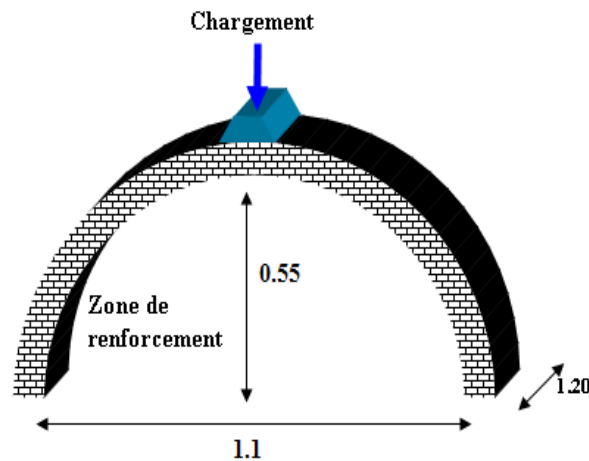


Fig. V- 1 : caractéristiques géométriques des voûtes

L'objectif de cette partie de l'étude est de mettre un nouveau procédé de réhabilitation pour les pathologies superficielles mais aussi structurelles avec un certain degré d'endommagement.

Ce chapitre sera découpé en deux parties. La méthodologie d'application du mortier fibré sur des voûtes est donnée dans un premier temps. Puis, les résultats des essais de rupture des voûtes en maçonnerie enduites en deuxième temps.

### 1. Mise en place du mortier fibré

Des essais de caractérisation des différents mortiers fibrés ont été réalisés [cf. Chapitre 3] dans le but d'obtenir les caractéristiques mécaniques avant d'appliquer le mortier fibré sur les voûtes. Le tableau V-2 résume les caractéristiques mécaniques de chaque mortier fibré obtenues lors des essais de caractérisation (Cf. Chapitre 3).

Mortier fibré	A	B	C	D
Teneur en eau [%]	14	12	11,2	16
Résistance de flexion [MPa]	7,75	7,79	8,04	5,79
Résistance de compression [MPa]	63,60	52,53	51,3	54,90
Contrainte d'adhérence [MPa]	1,66	2,2	2,68	2,26
Résistance en traction par fendage [MPa]	3,84	4,31	5,43	2,99
Module de Young [MPa]	33 701	27 308	34 719	28 464

Tableau V- 2: caractéristiques mécaniques des mortiers fibrés

Vingt-huit jours après la construction des voûtes, huit voûtes ont été enduites manuellement par un mortier fibré (2 voûtes par fournisseurs). Le mortier fibré a été appliqué en deux couches, l'épaisseur de la première couche est égale à 2 cm et la seconde est égale à 1 cm. L'application de mortier fibré a été appliquée manuellement à l'aide d'une truelle, une taloche et une règle pour les deux couches (2 cm et 1 cm) (Fig V-2). Le temps de séchage entre les deux couches est d'environ 1 heure. Avant et après l'application des deux couches d'enduit, les voûtes sont bâchées et un humidificateur est mis sous la voûte afin de maintenir une humidité relative 90% contrôlé à l'aide d'hygromètre et une température de 20°C pour avoir les mêmes conditions d'environnement que pour les ouvrages d'assainissement (Fig V-3).



Fig. V- 2: application de l'enduit



Fig. V- 3: conservation des voûtes

Après 7 jours de séchage, les essais sont menés Les essais sont réalisés de façon identique que pour les voûtes témoins. Le protocole des essais est détaillé en chapitre 4.

## 2. Résultats des essais

Ce paragraphe détaille l'ensemble des résultats des 8 voûtes testées, soit 2 voûtes par mortiers.

### 2.1 Mortier fibré A

Les variations de la charge en fonction de la flèche sont données sur la figure V-4.

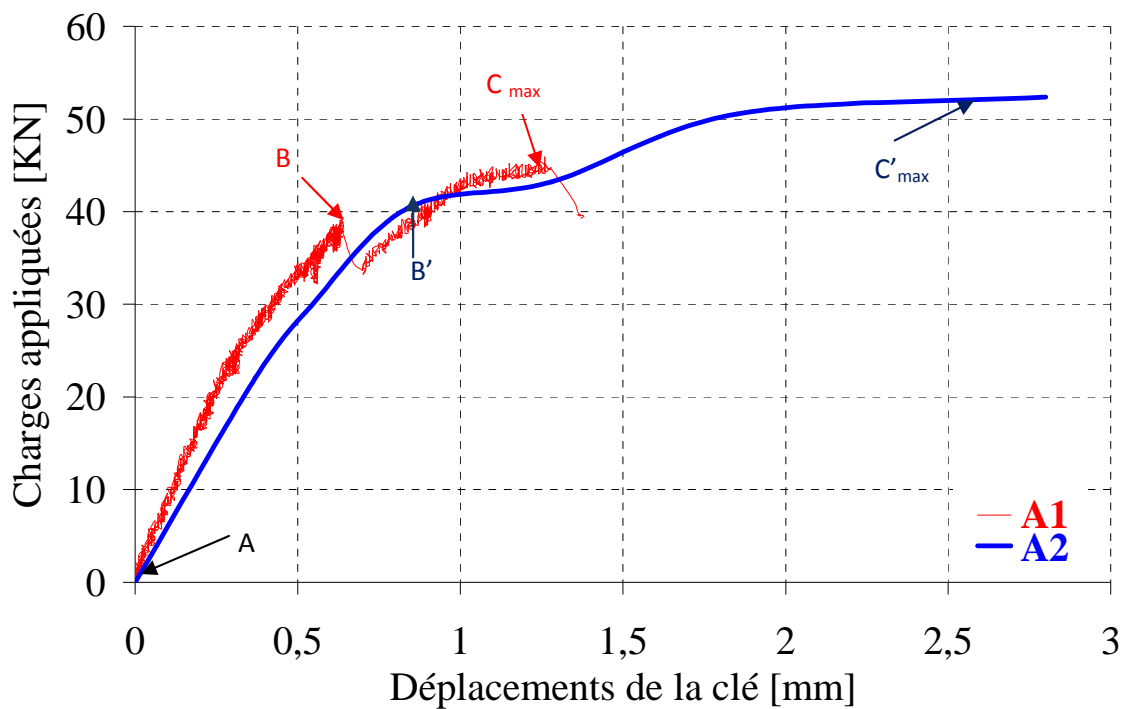


Fig. V- 4 : comportement des voûtes enduites par mortier fibré A

Les courbes montrent le comportement des deux voûtes enduites A1 et A2.

Pour la voûte A1, nous pouvons distinguer deux phases :

Première phase AB: domaine élastique linéaire

Les fissures sont apparues en clé de voûte à l'intrados à partir de 39 kN pour la voûte.

Deuxième phase BC<sub>max</sub>: domaine plastique

Un léger changement de rigidité globale de la voûte est remarqué. La charge augmente jusqu'à la charge à la rupture 45,94 kN.

Pour la voûte A2, nous pouvons distinguer deux phases :

Première phase AB': domaine élastique linéaire

Des microfissurations sont apparues en clé de voûte à partir de 32 KN pour la voûte.

Deuxième phase B'C'<sub>max</sub>: domaine plastique

Les fissures sont apparues en même niveau à partir de 41 kN. Les valeurs de la charge augmentent progressivement jusqu'à la charge à la rupture de 52 kN.

Les résultats des essais sont présentés dans le tableau V-3.

Essais sur voûte	Épaisseur [cm]	Charge d'apparition de la première fissuration [KN]	Charge à la rupture [KN]
A1	12	39	45,94
A2	12	41	52

Tableau V- 3 : résultats des essais sur voûtes enduites A

Sur la figure V-5, nous présentons les courbes expérimentales des déformations en clé et piédroits droit et gauche pour une voûte, mesurées par des jauges d'extensomètre en fonction des charges appliquées sur les voûtes. Il y a un peu de changement en Piédroits. Les déformations les plus importantes ont eu lieu en clé de voûte.

Les jauges placées en naissance de voûte montrent un léger changement de comportement au niveau de 39 KN et de 41 KN, charge d'apparition de la première fissuration pour les deux voûtes.

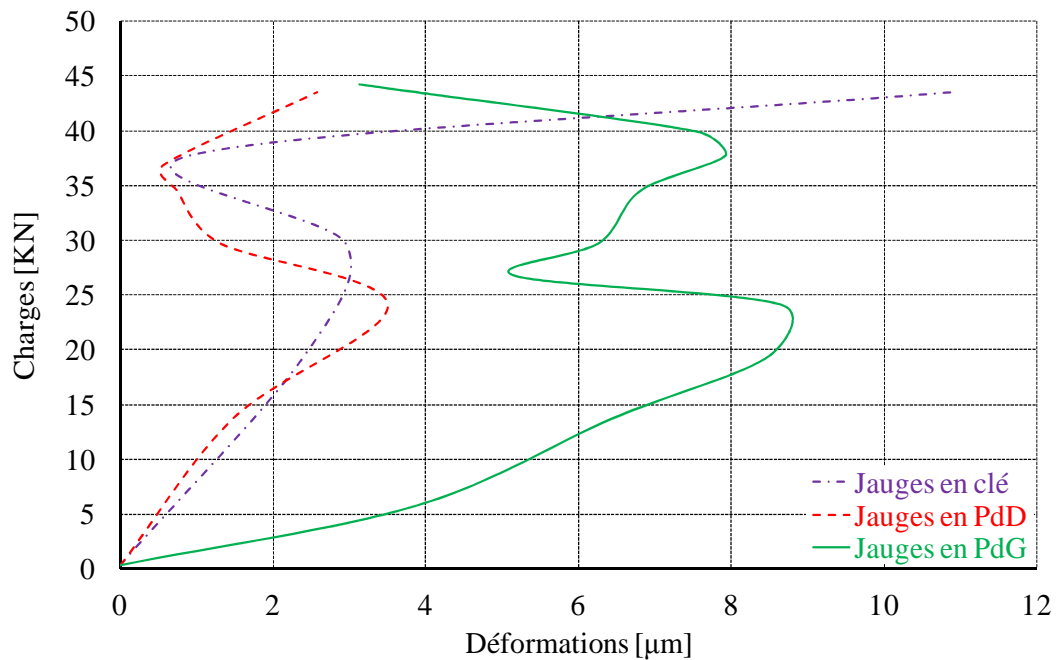


Fig. V- 5 : courbe charge/déformation enregistrée par les jauges pour la voûte A1

Le taux de l'énergie de déformation de l'enduit pour les deux voûtes enduites est calculé :

$$E_m = 33701 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = 11 \cdot 10^{-6}$$

$$\sigma = E_m \cdot \varepsilon = 33701 \cdot 11 \cdot 10^{-6} = 0,37 \text{ MPa.}$$

Le comportement est élastique

$$E_d = \frac{1}{2} \times \sigma \times \varepsilon = \frac{1}{2} \times \frac{\sigma^2}{E}$$

$$E_d^g = \frac{1}{2} \times \sigma_g \times \varepsilon = \frac{1}{2} \times \frac{\sigma_g^2}{E}$$

$$\Delta = \frac{E_d}{E_d^g} = \frac{\sigma^2}{\sigma_g^2}$$

Avec  $\sigma = 0,37 \text{ MPa}$  et  $\sigma_g = 7,75 \text{ MPa}$

$$\frac{\sigma^2}{\sigma_g^2} = \frac{0,37^2}{7,75^2} = \frac{0,137}{60,06} = 0,00228 = 0,228\%$$

L'enduit a travaillé à 0,228% de sa capacité quand les voûtes sont complètement fissurées.

## 2.2 Mortier fibré B

Les variations de la charge en fonction de la flèche sont données sur la figure V-6.

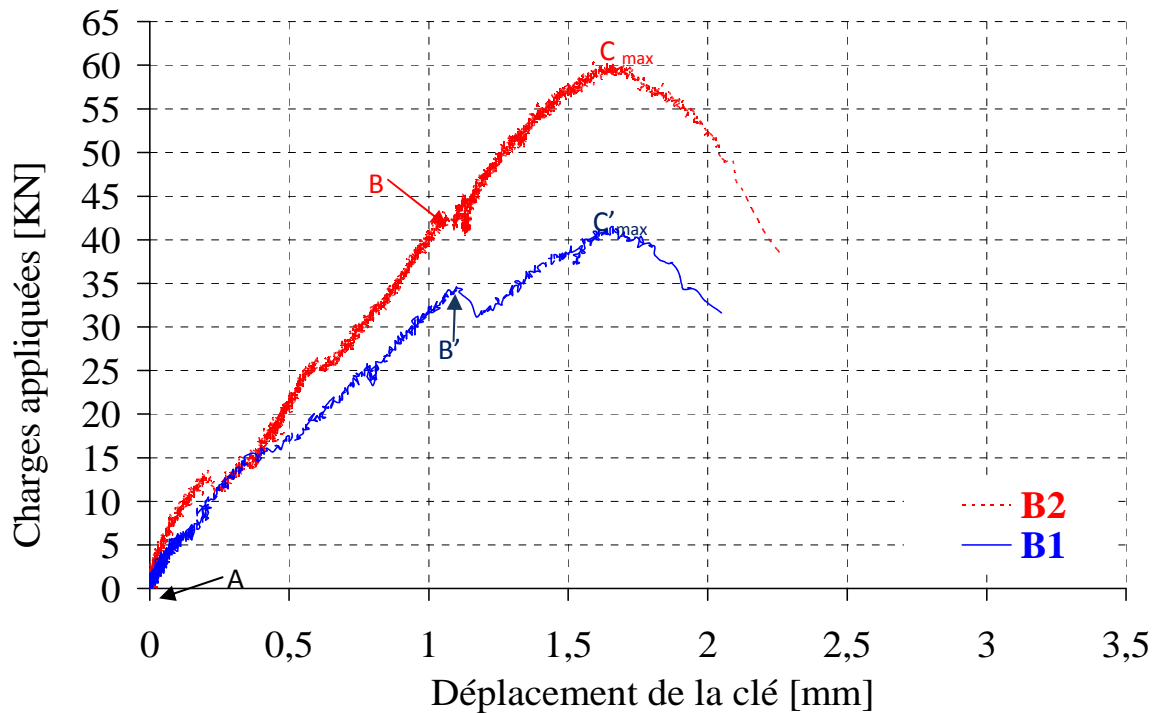


Fig. V- 6 : comportement des voûtes enduites par mortier fibré B

Sur les courbes ci-dessus, nous pouvons distinguer deux phases :

Premières phases AB et AB' : domaine élastique linéaire

Les valeurs de charges n'entraînent pas de fissurations et les courbes montrent un comportement linéaire pour les deux voûtes enduites. Des microfissurations sont apparues en clé de voûte à partir de 25 kN pour les voûtes. Les fissures sont apparues en clé de voûte à l'intrados à partir de 34 kN et 38 kN pour les voûtes de B1 et B2 respectivement. Aucune fissure n'est apparue avant la charge de la première fissuration.

Deuxièmes phases BC<sub>max</sub> et B'C'<sub>max</sub> : domaine plastique

Les valeurs de la charge entraînent progressivement la fissuration. Un léger changement de rigidité globale de la voûte est remarqué. Les valeurs de la charge augmentent progressivement jusqu'à la rupture de 41,47 kN et de 60,38 kN pour les voûtes de B1 et B2 respectivement.

La différence de résistance des deux voûtes est due à leur géométrie. En effet, il est impossible d'avoir exactement le même assemblage des différents blocs sur toutes les voûtes. Les résultats des essais sont présentés dans le tableau V-4.

Essais sur voûte	Epaisseur [cm]	Charge d'apparition de la première fissuration [kN]	Charge à la rupture [kN]
B1	12	34	41,47
B2	12	38	60,38

Tableau V- 4: résultats des essais sur voûtes enduites B

De même que pour la série enduite avec le produit hydraulique A, la figure V-8 donne les déformations en clé et piédroits droit et gauche pour une voûte, mesurées par des jauges d'extensomètre en fonction des charges appliquées sur les voûtes. Les jauges placées en naissance de voûte montrent un léger changement de comportement au niveau de 34 kN et de 38 kN, charge d'apparition de la première fissuration pour les deux voûtes.

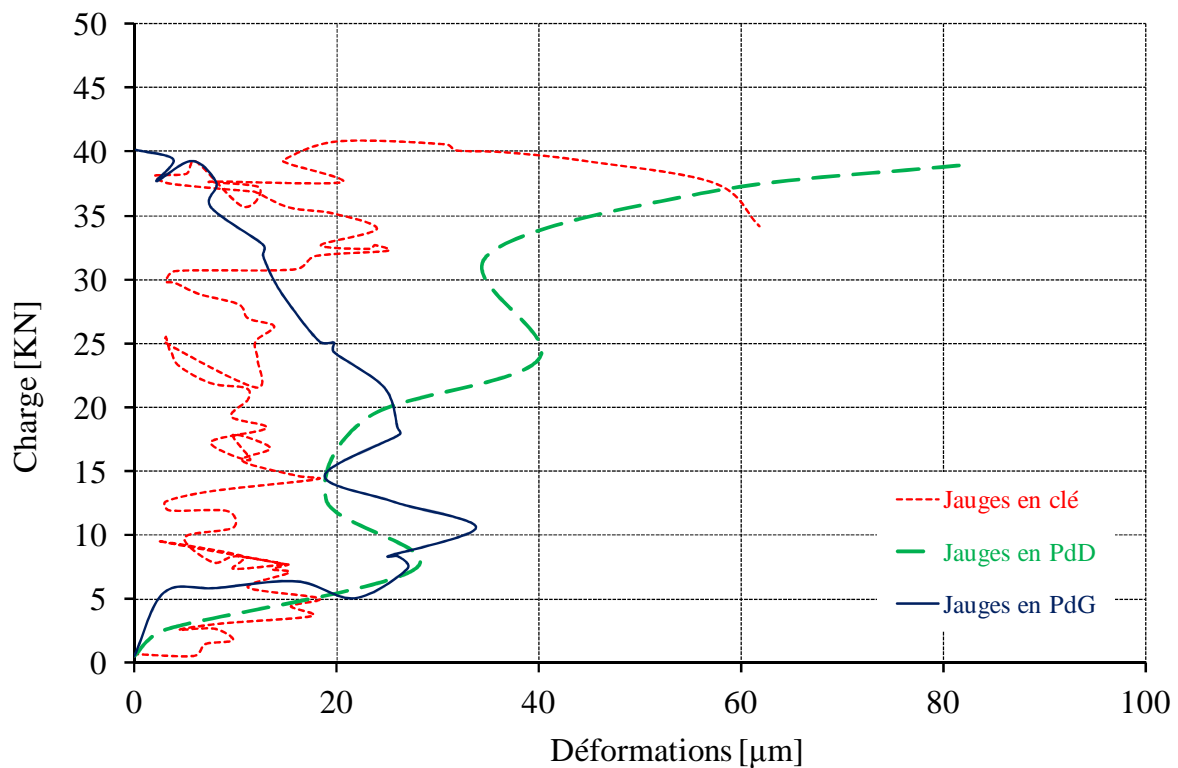


Fig. V- 7 : courbe Charge/Déformation enregistrées par les jauges pour la voûte B1

Le taux de l'énergie de déformation de l'enduit pour les deux voûtes enduites est calculé :

$$E_m = 27308 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = 40 \times 10^{-6}$$

$$\sigma = E_m \times \varepsilon = 27308 \times 40 \times 10^{-6} = 1,09 \text{ MPa.}$$

Le comportement est élastique

$$E_d = \frac{1}{2} \times \sigma \times \varepsilon = \frac{1}{2} \times \frac{\sigma^2}{E}$$

$$E_d^g = \frac{1}{2} \times \sigma_g \times \varepsilon = \frac{1}{2} \times \frac{\sigma_g^2}{E}$$



$$\Delta = \frac{E_d}{E_d^s} - \frac{\sigma^2}{\sigma_s^2}$$

Avec  $\sigma = 1,09 \text{ MPa}$  et  $\sigma_s = 7,79 \text{ MPa}$

$$\frac{\sigma^2}{\sigma_s^2} = \frac{1,09^2}{7,79^2} = \frac{1,1881}{60,6841} = 0,01957 = 1,95\%$$

L'enduit a travaillé à 1,95% de sa capacité quand les voûtes sont complètement fissurées.

### 2.3 Mortier fibré C

Les variations de la charge en fonction de la flèche sont données sur la figure V-8.

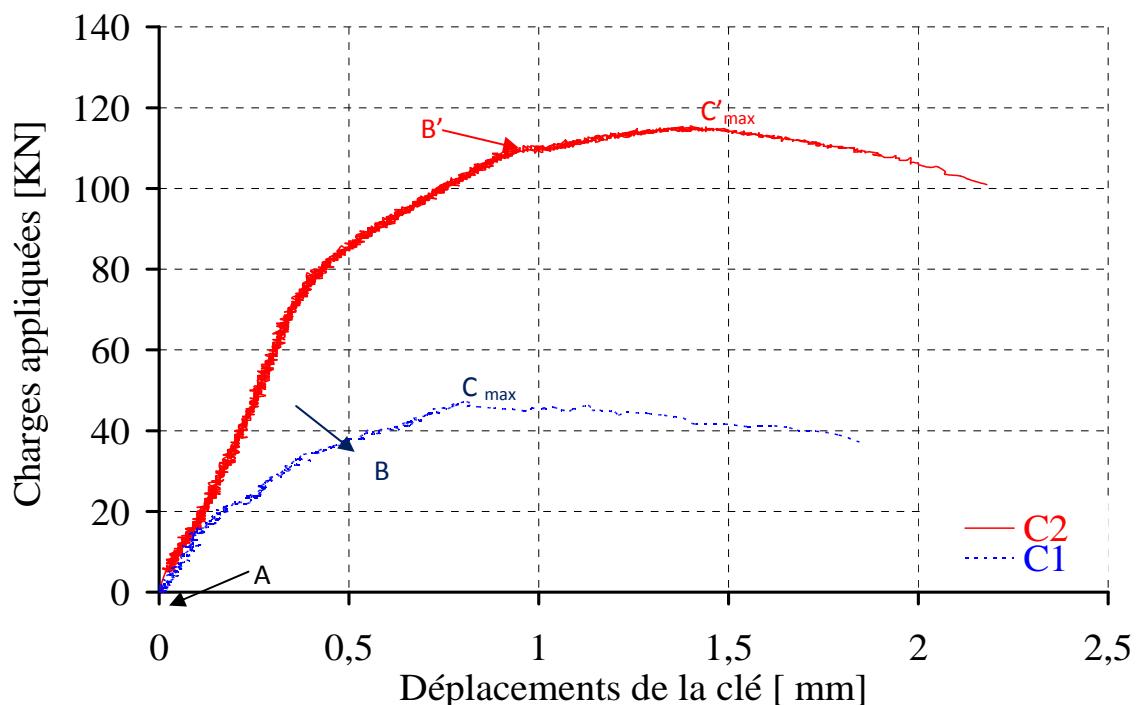


Fig. V- 8 : comportement des voûtes enduites par mortier fibré C

Sur les courbes ci-dessus, nous pouvons distinguer deux phases :

Premières phases AB et AB' : domaine élastique linéaire

Comme précédemment, aucune fissure n'a été constatée et un comportement élastique est constaté. Les fissures sont apparues en clé de voûte à l'intrados à partir de 40 kN et 110 kN pour les voûtes C1 et C2 respectivement.

Deuxièmes phases BC<sub>max</sub> et B'C<sub>max</sub>: domaine plastique

Les valeurs de la charge entraînent progressivement la fissuration. Dans ce domaine, il est constaté un changement de rigidité. Les premières fissurations sont produites en clé de voûte sur l'enduit, sans décollement de celui-ci, puis dans l'interface meulière/mortier au niveau des reins à l'extrados.

La différence de résistance des deux voûtes est due à l'épaisseur différente des 2 voûtes. L'influence de l'épaisseur de chaque voûte joue un rôle important pour les charges de la première fissuration et les charges à la rupture. Les résultats des essais sont présentés dans le tableau V-5.

Essais sur voûte	Epaisseur [cm]	Charge d'apparition de la première fissuration [KN]	Charge à la rupture [KN]
C1	12	40	47,18
C2	14	110	115,42

Tableau V- 5: résultats des essais sur voûtes enduites C

Afin de comparer l'ensemble des voûtes, la figure V-9 donne les déformations de l'enduit pour la voûte de 12 cm d'épaisseur (voûte C1). Les jauges placées en naissance de voûte montrent un léger changement de comportement au niveau de 40 kN et de 110 kN, charge d'apparition de la première fissure pour les deux voûtes.

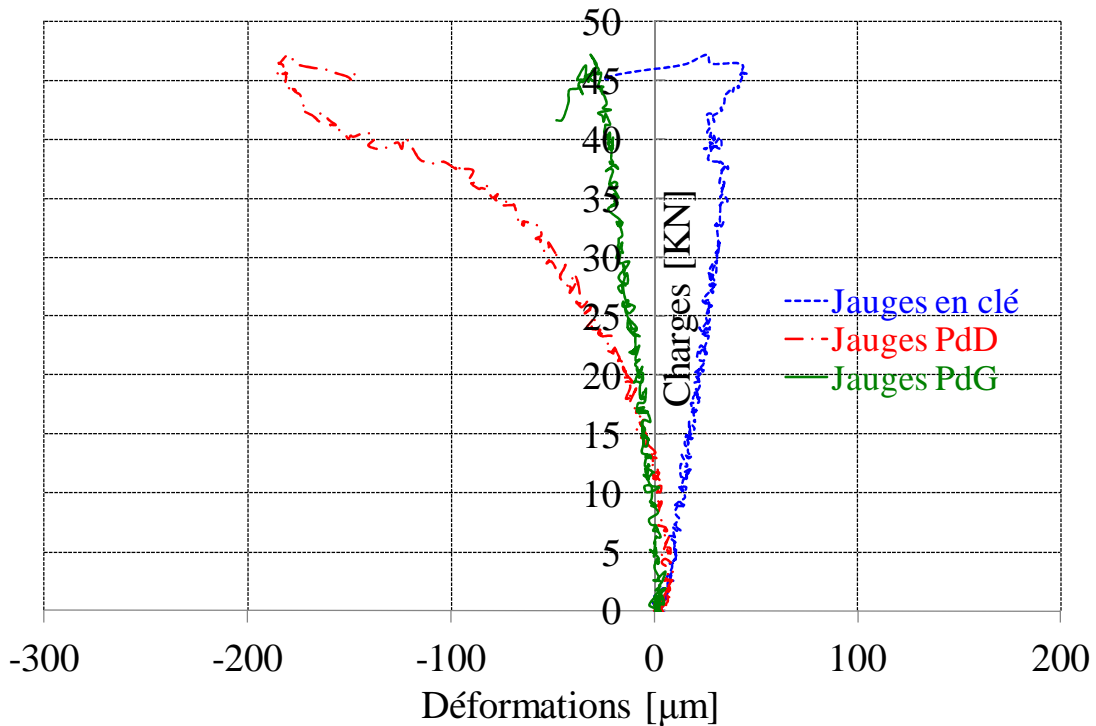


Fig. V- 9 : courbe Charge/Déformation enregistrées par les jauges pour la voûte C1

Le taux de l'énergie de déformation de l'enduit pour les deux voûtes enduites est calculé :

$$E_m = 34719 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = 43,33 \times 10^{-6}$$

$$\sigma = E_m \times \varepsilon = 34719 \times 43,33 \times 10^{-6} = 1,50 \text{ MPa.}$$

Le comportement est élastique

$$E_d = \frac{1}{2} \times \sigma \times \varepsilon = \frac{1}{2} \times \frac{\sigma^2}{E}$$

$$E_d^g = \frac{1}{2} \times \sigma_g \times \varepsilon = \frac{1}{2} \times \frac{\sigma_g^2}{E}$$

$$\Delta = \frac{E_d}{E_d^e} - \frac{\sigma^2}{\sigma_e^2}$$

Avec  $\sigma = 1,50 \text{ MPa}$  et  $\sigma_e = 8,04 \text{ MPa}$

$$\frac{\sigma^2}{\sigma_e^2} = \frac{1,50^2}{8,04^2} = \frac{2,263}{64,64} = 0,035 = 3,5\%$$

L'enduit a travaillé à 3,5% de sa capacité quand les voûtes sont complètement fissurées.

## 2.4 Mortier fibré D

La figure V-10 donne les variations de la charge en fonction de la flèche.

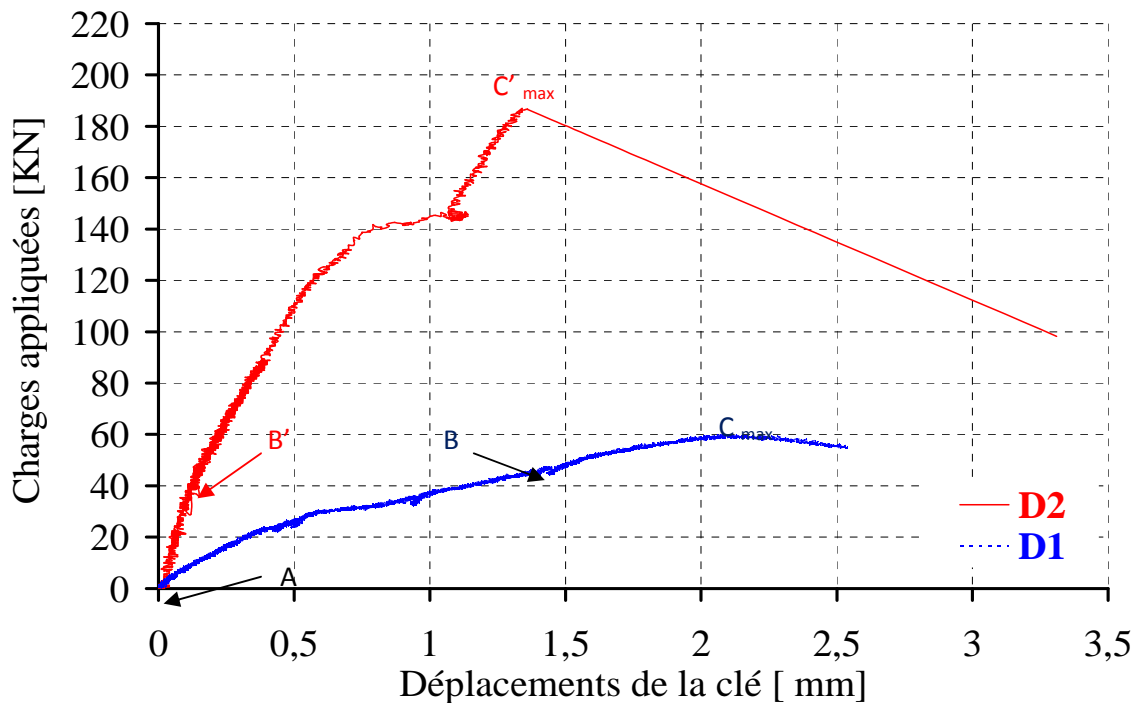


Fig. V- 10 : comportement des voûtes enduites par mortier fibré D

Sur les courbes ci-dessus, nous pouvons distinguer deux phases :

Premières phases AB et AB' : domaine élastique linéaire

Aucun désordre n'est constaté dans cette première phase. Les fissures sont apparues en clé de voûte à l'intrados à partir de 40 kN et 45 kN pour les voûtes D1 et D2 respectivement. Aucune fissure n'a été constatée avant la charge de fissuration.

Deuxièmes phases BC<sub>max</sub> et B'C'<sub>max</sub>: domaine plastique

Les valeurs de la charge entraînent progressivement la fissuration. Un petit changement de rigidité globale de la voûte est remarqué.

La différence de l'épaisseur entre les deux voûtes est de 3 cm. Cette différence explique la variation des charges à la rupture. Les résultats des essais sont présentés dans le tableau V-6.

Essais sur voûte	Epaisseur [cm]	Charge d'apparition de la première fissuration [KN]	Charge à la rupture [KN]
D1	15	40	186,92
D2	12	45	59,86

Tableau V- 6: résultats des essais sur voûtes enduites D

Sur la figure V-11, nous présentons les courbes expérimentales des déformations en clé et pénétration droite et gauche des voûtes, mesurées par des jauges d'extensométrie en fonction des charges appliquées sur les voûtes de Weber. Les jauges placées en naissance de voûte montrent un léger changement de comportement au niveau de 40 KN et de 45 KN, charge d'apparition de la première fissure pour les deux voûtes.

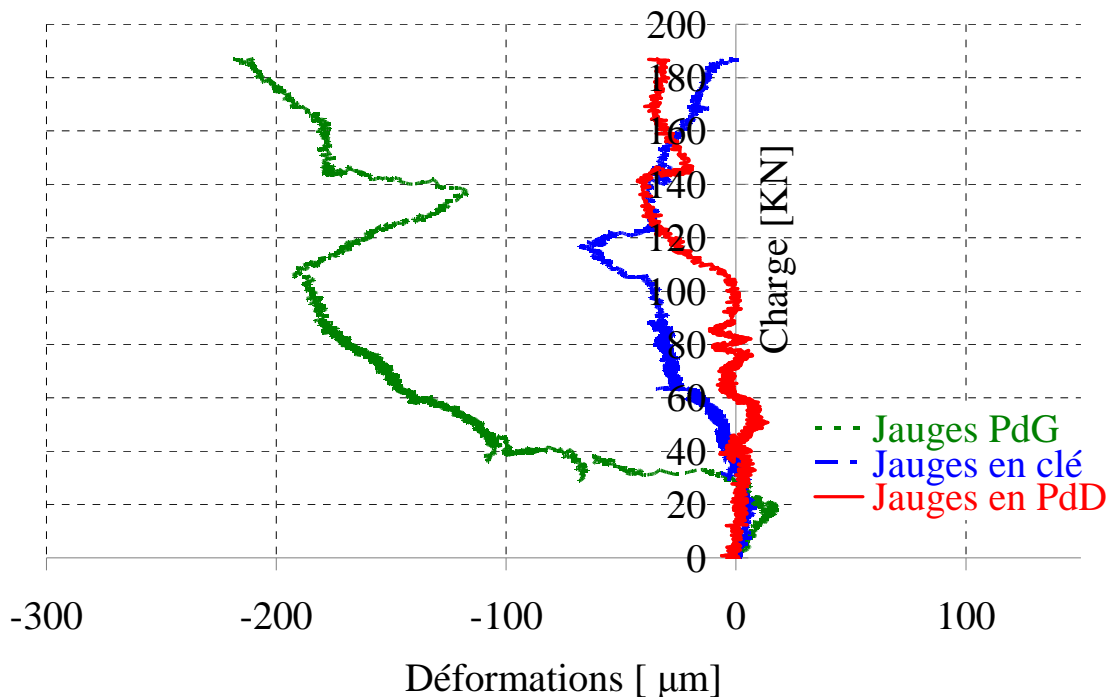


Fig. V- 11 : courbe Charge/Déformation enregistrées par les jauges pour la voûte D1

Le taux de l'énergie de déformation de l'enduit pour les deux voûtes enduites est calculé :

$$E_m = 28464 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = 68,03 \times 10^{-6}$$

$$\sigma = E_m \times \varepsilon = 28464 \times 68,03 \times 10^{-6} = 1,93 \text{ MPa.}$$

Le comportement est élastique

$$E_d = \frac{1}{2} \times \sigma \times \varepsilon = \frac{1}{2} \times \frac{\sigma^2}{E}$$

$$E_d^e = \frac{1}{2} \times \sigma_e \times \varepsilon = \frac{1}{2} \times \frac{\sigma_e^2}{E}$$

$$\Delta = \frac{E_d}{E_d^e} = \frac{\sigma^2}{\sigma_e^2}$$

Avec  $\sigma = 1,93 \text{ MPa}$  et  $\sigma_0 = 5,79 \text{ MPa}$

$$\frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} = \frac{1,90^2}{8,79^2} = \frac{3,75}{33,52} = 0,1118 = 11,18\%$$

L'enduit a travaillé à 11,18% de sa capacité quand les voûtes sont complètement fissurées.

### 3. Synthèse

Les résultats des essais sur les voûtes renforcées par un chemisage mince de 3 cm de la famille A sont résumés dans le tableau suivant. Pour comparer l'ensemble des essais, nous avons comparé les voûtes ayant la même épaisseur, soit 12 cm.

Essais sur voûtes	charge d'apparition de la première fissuration		charge à la rupture	
	Charge [KN]	Gain [%]	Charge [KN]	Gain [%]
Non enduite	15	-	19	-
A	39	160	45	136
B	38	153	60	215
C	40	166	47	147
D	45	200	60	215

Tableau V- 7: résultats des essais sur voûtes enduites par produit

Le gain de charge de rupture par rapport aux voûtes non enduites (pour la charge à la rupture) est respectivement de 136%, 215%, 147% et 215% pour les produits A, B, C et D.

Le gain de charge de rupture par rapport aux voûtes non enduites (pour la charge d'appariation de la première fissuration) est respectivement de 160%, 153%, 166% et 200% pour les produits A, B, C et D.

Le comportement des voûtes en maçonnerie testées [3] sous chargement vertical en clé sont traduites dans le graphe de la figure V-12.

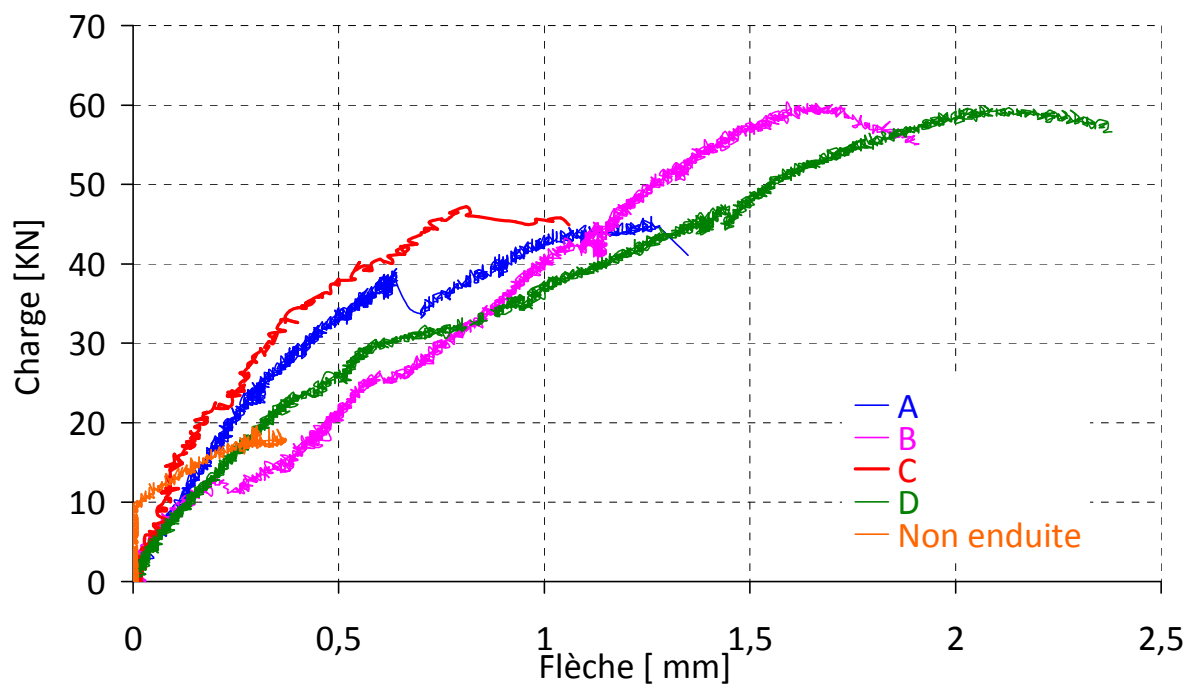


Fig. V- 12 : comportement des voûtes testées

Le comportement des voûtes non enduites est différent des voûtes enduites avec ou sans renforts.

En effet, aucun déplacement de la clé de voûte n'est constaté lors du début de l'essai. La voûte reprend les charges sans subir de déplacement de la clé. Cela provient du fait que la voûte soit constituée de blocs et de mortier. Il y a donc en début d'essais une mise en place de la voûte elle-même. Les efforts sont répartis dans l'ensemble de la voûte. Il y a une mise en place de celle-ci. En début d'essai, la voûte ne peut pas être considéré comme un seul élément mais bien de plusieurs blocs qui vont se mettre en place pour constituer la voûte ensuite. Dans le cas des voûtes enduites, avec ou sans renforts, l'enduit permet d'homogénéiser et d'avoir une réponse en terme de déplacement dès le chargement. De plus, lors de l'application de ce dernier, des efforts sont appliqués à l'intrados lors de l'application de l'enduit.

#### 4. Mode de rupture

Toutes les voûtes testées ont le même mécanisme de ruine. Le schéma d'apparition des fissures des 4 produits des voûtes enduites est donné dans la figure V-13.

La première fissure est apparue en clé de voûte à l'intrados (figure V-14). Les fissures sont ensuite apparues au niveau des reins à l'extrados (figure V-15). Ces fissures se sont propagées dans les joints de la maçonnerie.

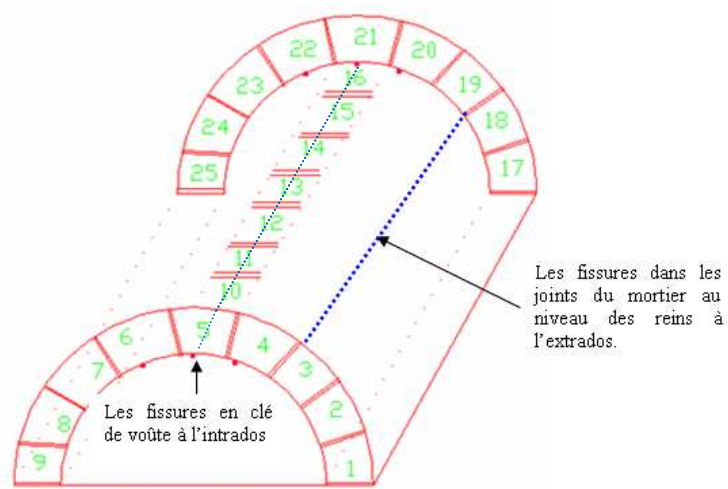


Fig. V- 13 : cartographie d'apparition des fissures des voûtes enduites



Fig. V- 14 : fissuration en clé de voûte enduite à l'intrados

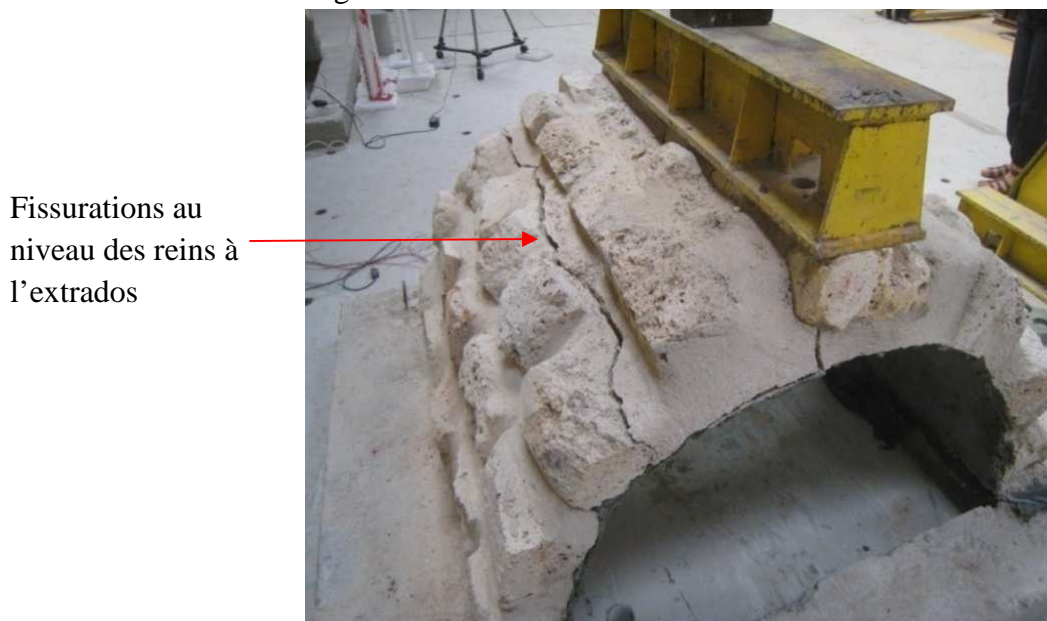


Fig. V- 15 : fissuration dans l'interface meulière/mortier au niveau des reins à l'extrados

Dans le domaine élastique, le comportement de l'ensemble des corps d'épreuve est identique. Après la première fissuration, il se produit alors un changement de rigidité des voûtes, passant d'un comportement élastique à un comportement plastique. Aucune détérioration des blocs de meulière n'a été constatée.

### **Conclusion**

L'apparition de la première fissure est signe de désordres de la structure des collecteurs. Un gain de 170% par rapport aux voûtes non enduites est obtenu pour la charge de la première fissuration. Deux voûtes enduites par le fabricant ont été testées, un gain de charge de 178% a été obtenu par rapport aux voûtes non enduites et une possibilité d'appliquer ce procédé de réhabilitation par chemisage mince.

Les avantages d'application du mortier fibré sont :

- L'augmentation de la capacité portante de la voûte
- Le maintien du gabarit hydraulique par rapport à la méthode de béton projeté standard
- Le coût de réparation est moins élevé par rapport à la méthode de béton projeté armé
- L'augmentation de la durabilité des travaux : en évitant d'utiliser de l'acier (matériau corrosif)

Une voûte restructurée en béton armé de 6 cm sera présentée en conclusion afin de comparer le gain lors d'un chemisage mince non armé. Le domaine d'emploi de cette technique pourra alors être détaillé.

Deux essais sur voûtes enduites renforcées par lamelles et tissus de carbone afin de remplacer un chemisage en béton projeté armé, c'est-à-dire un accroissement de la capacité portante de la structure, seront présentés dans le chapitre suivant.



## **Bibliographie**

[1] Jules Hervieu (1897), *Traité Pratique de la Construction des Egouts*, Paris BAUDRY & CIE Editeurs, p. 221-260.

[2] *Catalogue des produits* (2001); BONNA SABLÀ.

[3] Saade M., Kesteloot S., Djelal C., Hamitouche L., Benslimane I. (2011) "Influence of a fiber coating for the repair of sewerage in masonry" In: *Proceeding of the International RILEM Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering*. Hong-Kong. pp 623-631

## Chapitre 6 :

### Réhabilitation par des matériaux composites

#### Sommaire

Introduction .....	121
1. Principe des essais.....	122
2. Résultats d'essai sur une voûte renforcée par mortier fibré.....	122
3. Application des matériaux composites .....	123
3.1 Mise en place des plats de carbone.....	123
3.2 Mise en place des tissus de carbone .....	124
4. Résultats des essais .....	125
4.1 Résultats des essais sur deux voûtes renforcées par plats de carbone .....	125
4.2 Résultats des essais sur deux voûtes renforcées par tissus de carbone.....	129
5. Synthèse .....	134
6. Etude comparative avec le procédé de réhabilitation traditionnel .....	136
6.1 Mise en œuvre du béton projeté.....	136
6.2 Résultats des essais .....	138
6.3 Mode de rupture .....	138
6.4 Comparaison .....	139
Bibliographie.....	141

## Introduction

L'objectif de ce chapitre est de mettre au point le procédé de renforcement par matériaux composites [1] (figure VI-1) aux ouvrages d'assainissement en maçonnerie.



Fig. VI- 1: ouvrages en béton armé renforcées par matériaux composites

La technique de collage de matériaux composites n'est pas applicable directement aux ouvrages d'assainissement en maçonnerie du fait de l'irrégularité du support. En effet, la meulière est un matériau très hétérogène. Il est nécessaire de valider la réalisation d'un chemisage mince par mortier fibré ayant les caractéristiques nécessaires pour transmettre les efforts de la maçonnerie aux matériaux composites sans avoir de décollement prématuré du complexe mortier fibré/renforcement [2]. Les renforts devront donc accroître la capacité portante de la structure, mais aussi retarder l'apparition des fissures.

Des essais sur voûtes enduites par mortier fibré de 2 cm renforcées par une couche de matériaux composites à base de fibres de carbone (plats et tissus) ont été réalisés dans cette partie afin d'atteindre les objectifs cités dans le chapitre précédent.

Ce chapitre sera découpé en deux parties. La méthodologie d'application des matériaux composites sur des voûtes est donnée dans un premier temps. Puis, les résultats des essais de rupture des voûtes en maçonnerie renforcées seront exploités afin de valider l'utilité de ce procédé. Deux voûtes ont été testées avec des lamelles de carbone notées P1 et P2 et deux voûtes renforcées par tissus notés T1 et T2.

Les voûtes testées sont construites de la même façon que la voûte témoin de la famille B [cf. Chapitre 4].

## 1. Principe des essais

Les essais sont réalisés pour un chargement vertical sur toutes les voûtes [cf. chapitre 4-5]. Plusieurs grandeurs physiques ont été enregistrées lors de l'essai : force, déplacement et déformations (figure VI-2).

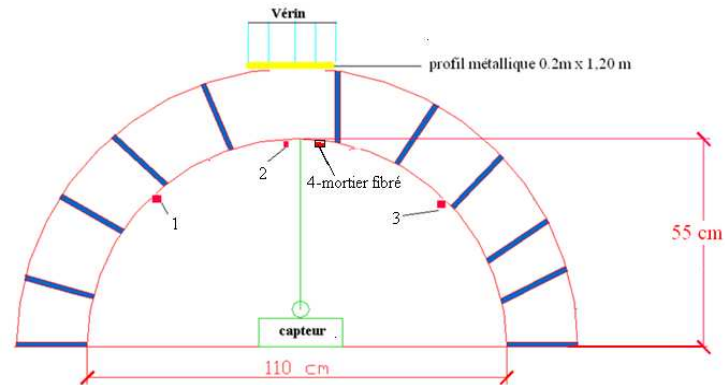


Fig. VI- 2: dispositif expérimental

Les voûtes testées sont :

- Une voûte enduite de 2 cm,
- Deux voûtes enduites de 2 cm renforcées par des lamelles de carbone,
- Deux voûtes enduites de 2 cm renforcées par des tissus de carbone.

Le paragraphe suivant aborde les résultats des essais.

## 2. Résultats d'essai sur une voûte renforcée par mortier fibré

L'enregistrement de la charge en fonction du déplacement vertical de la voûte est donnée figure VI-3 pour la voûte non enduite (chapitre 3) et la voûte enduite de 2 cm.

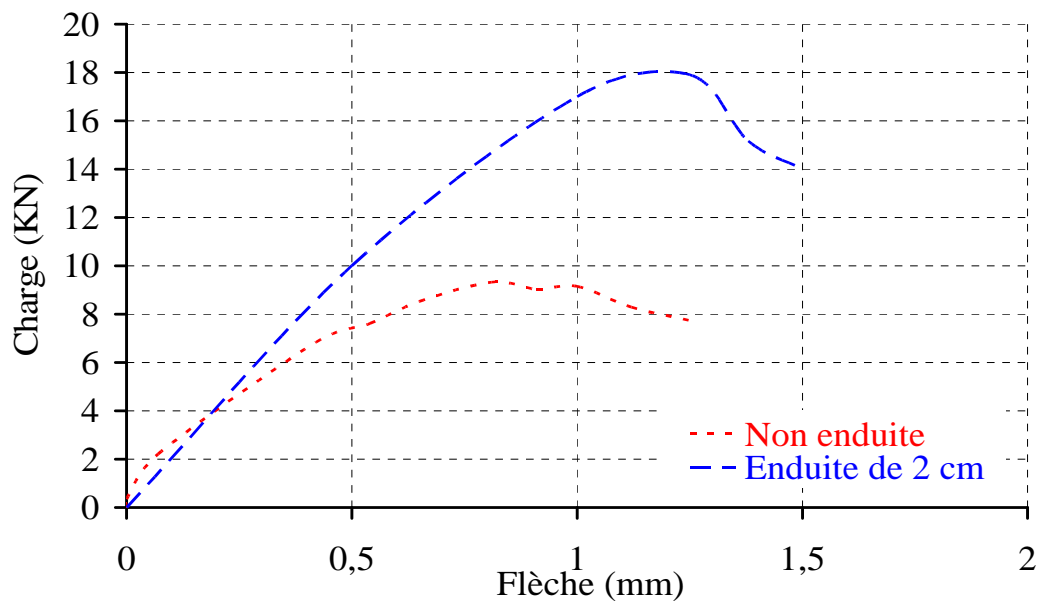


Fig. VI- 3: courbe charge flèche pour les voûtes non enduite et enduite

La charge à la rupture pour la voûte enduite est de 18 kN. Ce qui correspond à un gain d'environ 86% de la charge. L'ajout du mortier fibré conduit à une élévation importante de la charge à la rupture. Quant à la première fissure, elle est apparue en clé de voûte à l'intrados à 15 kN puis des fissures sont ensuite apparues au niveau des reins à l'extrados et se sont propagées dans les joints de la maçonnerie, et ce sur toute la longueur de la voûte jusqu'à la ruine. Le mode de rupture est obtenu identiquement aux voûtes enduites de 3 cm [cf. Chapitre 5].

Essais sur voûte	Charge à la rupture [KN]
Non enduite (famille B)	9
Enduite de 2 cm (famille B)	18

Tableau VI- 1 : résultats des essais

Le gain de charge de rupture par rapport aux voûtes non enduites est de 86% pour les voûtes enduites de 2 cm.

Le paragraphe suivant aborde les deux méthodes de renforcement par plats et tissus de carbone.

### 3. Application des matériaux composites

Avant l'application des matériaux composites, un mortier fibré a été appliqué sur les voûtes manuellement en deux couches de 1 cm chacune à l'aide d'une truelle, d'une taloche et d'une règle [cf. Chapitre 5].

Les plats et tissus sont découpés aux longueurs désirées. La surface intérieure des voûtes enduites est poncée légèrement afin de retirer tous défauts et laitance de l'enduit.

#### 3.1 Mise en place des plats de carbone

La préparation de la colle consiste à mélanger les composants A et B avec un malaxeur, afin d'obtenir un mélange bien homogène. Le découpage des plats est réalisé avec une meuleuse équipée d'un disque diamant. Les plats sont ensuite nettoyés au solvant. La mise en œuvre d'une lamelle de carbone s'effectue par double collage. On applique donc une fine couche de colle sur le support et sur la lamelle. Ce double collage permet d'obtenir une répartition uniforme de la colle. Puis on maroufle à l'aide d'un rouleau afin d'enlever le surplus de colle.



Fig. VI- 4: application de la colle sur les plats



Fig. VI- 5: application de la colle sur le support



Fig. VI- 6: voûte renforcée par plats

### 3.2 Mise en place des tissus de carbone

La préparation de la colle est identique que précédemment. Le découpage des tissus est réalisé avec un cutter. La mise en œuvre des tissus de carbone s'effectue par un simple encollage. On applique donc une fine couche de colle sur le support. Puis les tissus sont appliqués à l'intrados des voûtes à l'aide d'une spatule en PVC. Comme pour les plats, on utilise le rouleau afin d'enlever le surplus de colle.



Fig. VI- 7: découpage des tissus



Fig. VI- 8: application de la colle et des tissus sur la voûte



Fig. VI- 9: voûte renforcée par des tissus de carbone

#### 4. Résultats des essais

Le paragraphe suivant aborde les résultats des essais sur des voûtes renforcées par des plats de carbone et des tissus de carbone.

##### 4.1 Résultats des essais sur deux voûtes renforcées par plats de carbone

Deux essais sur voûtes enduites renforcées par plats de carbone ont été réalisés sous chargement vertical. Les épaisseurs de la clé de voûte ainsi que les dimensions des blocs de chaque meulière ne sont pas identiques pour toutes les voûtes.

Les variations de la charge en fonction de la flèche sont données sur la figure VI-10 pour les voûtes P1 et P2.

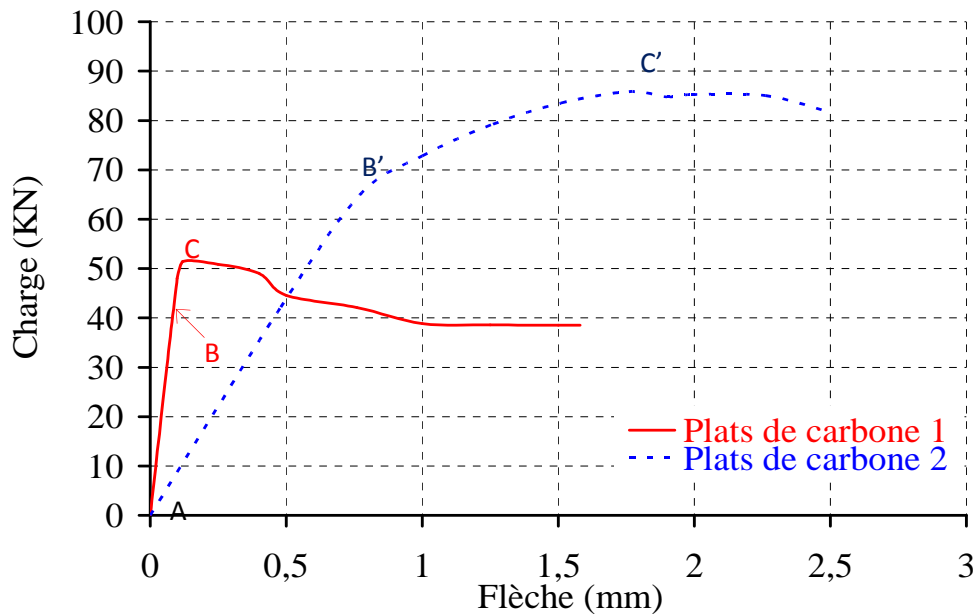


Fig. VI- 10: comportement des voûtes testées (plats de carbone)

Sur les courbes ci-dessus, nous pouvons distinguer deux phases :

Premières phases AB et AB' :

Les courbes montrent un comportement linéaire pour les deux voûtes P1 et P2. Les fissures sont apparues à partir de 43 KN et 70 KN pour les deux voûtes P1 et P2 respectivement.

Deuxièmes phases BC et B'C' :

Les valeurs de la charge entraînent progressivement la fissuration. A partir de la charge à la rupture pour les deux voûtes P1 et P2, la charge diminue très vite car un décollement des plats au niveau de la clé de voûte à l'intrados est apparu pour les deux voûtes.

Les résultats des essais sont résumés dans le tableau suivant:

Essais sur voûtes	Charge d'apparition de la première fissuration [KN]	Charge à la rupture [KN]	Rapport
Plats de carbone 1 (P1)	43	51,46	0,84
Plats de carbone 2 (P2)	70	85,85	0,82

Tableau VI- 2: résultats des essais sur voûtes (plats de carbone)

Rapport\*= Charge d'apparition de la première fissuration / Charge à la rupture

La différence de résistance des deux voûtes est due à leur géométrie, aux dimensions et aux caractéristiques mécaniques des blocs de la meulière. Les dimensions des blocs sont comprises entre  $7 \times 15 \times 20 \text{ cm}^3$  et  $20 \times 30 \times 50 \text{ cm}^3$ .

Le rapport entre la charge d'apparition de la première fissuration et la charge à la rupture pour la voûte P1 est de 0,84 et pour la voûte P2 est de 0,82. Donc, les résultats dépendent de la géométrie de chaque voûte, on peut estimer que le rapport moyen de la charge de la première fissuration/charge de à la rupture pour les voûtes enduites renforcées par plats est de 0,83.

Les gains en charge à la rupture sont de l'ordre de 450% pour la voûte P1 et de 820% pour la voûte P2 par rapport aux voûtes non enduites. La différence est due à la géométrie des voûtes. Les deux voûtes P1 et P2 présentent une zone élastique suivie d'une rupture fragile.

Sur la figure VI-11, nous présentons les courbes des déformations en clé et piédroits droits et piédroits gauches pour les plats de carbone et en clé pour la couche enduite de la voûte P1, mesurées par des jauges, en fonction des charges appliquées.

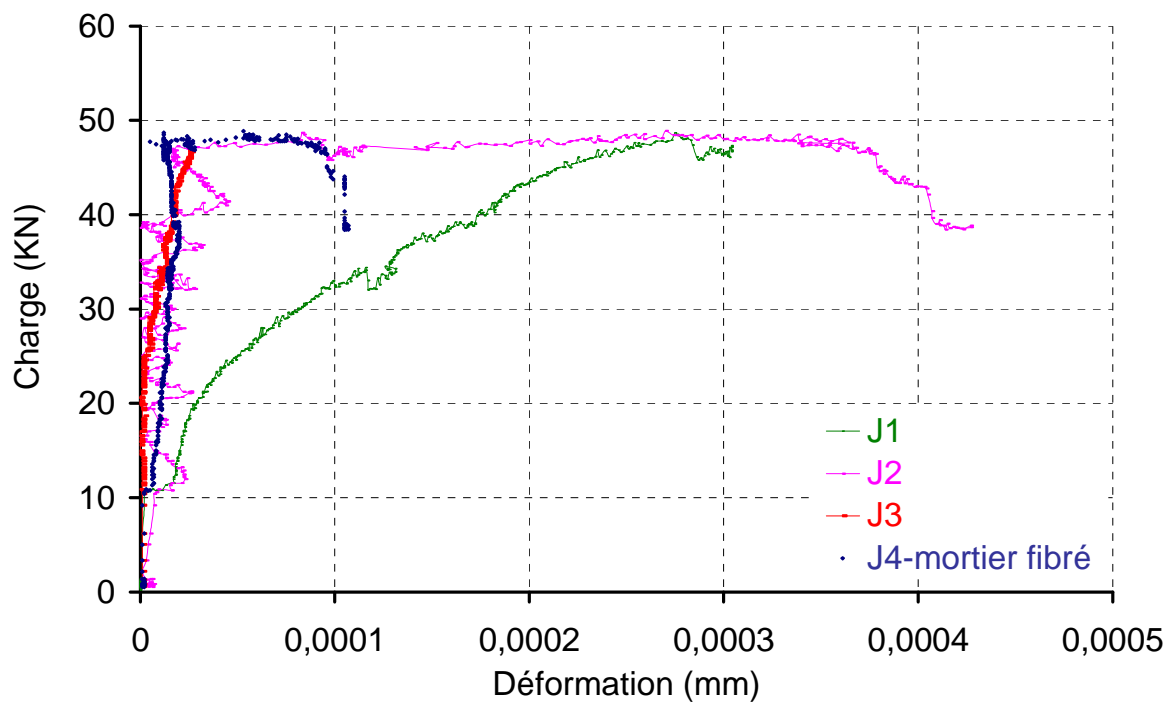


Fig. VI- 11: courbes charge/déformation enregistrées par les jauges pour les voûtes enduites renforcées par plats de carbone

Le taux de travail pour les deux voûtes de l'enduit est calculé comme suit :

$$E_m = 27\,308 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = 53 \cdot 10^{-6}$$

$$\sigma = E_m \cdot \varepsilon = 27308 \cdot 53 \cdot 10^{-6} = 1,45 \text{ MPa.}$$



Le comportement est élastique

$$E_d = \frac{1}{2} \times \sigma \times \epsilon = \frac{1}{2} \times \frac{\sigma^2}{E}$$

$$E_d^e = \frac{1}{2} \times \sigma_e \times \epsilon = \frac{1}{2} \times \frac{\sigma_e^2}{E}$$

$$\Delta = \frac{E_d}{E_d^e} = \frac{\sigma^2}{\sigma_e^2}$$

Avec  $\sigma = 1,45$  MPa et  $\sigma_e = 7,79$  MPa

$$\frac{\sigma^2}{\sigma_e^2} = \frac{1,45^2}{7,79^2} = \frac{2,1}{60,6} = 0,034 = 3,46 \%$$

L'enduit a travaillé à 3,46% de sa capacité quand les voûtes sont complètement fissurées.

Le taux de travail de la lamelle pour la voûte « P1 » est calculé comme suit :

$$\sigma = E \epsilon$$

Dans le domaine de service, nous avons un taux de travail de :

$$\sigma = 165000 \times 0,000025 = 4,13 \text{ MPa}$$

Après fissuration importante de la voûte, le taux de travail est de :

$$\sigma = 165000 \times 0,000354 = 58,41 \text{ MPa}$$

La valeur de la contrainte de traction à la rupture de la lamelle est de 2800 MPa. Lorsque la voûte est considérée en état de service, le taux de travail des plats est de 0,14%. Quand la voûte est complètement fissurée, les plats travaillent donc à 2,08% de leur capacité.

Le taux de travail de la lamelle pour les deux voûtes est calculé comme avant :

Après fissuration importante de la voûte, le taux de travail est de :

$$\sigma = 165000 \times 0,000183 = 30,20 \text{ MPa.}$$

Lorsque la voûte est complètement fissurée, les plats travaillent donc à 1,07% de leur capacité.

Suite à cette observation sur les essais, il convient d'analyser l'évolution de la fissuration, très importante pour la prédiction de la rupture.

Le mode de rupture est identique pour les deux voûtes testées (figure VI-12). Les fissures sont apparues dans les joints du mortier au niveau des reins à l'extrados et en milieu de piédroits à l'extrados (figure VI-13). De plus, un décollement des plats au niveau de la clé de voûte à l'intrados est constaté (figure VI-14).

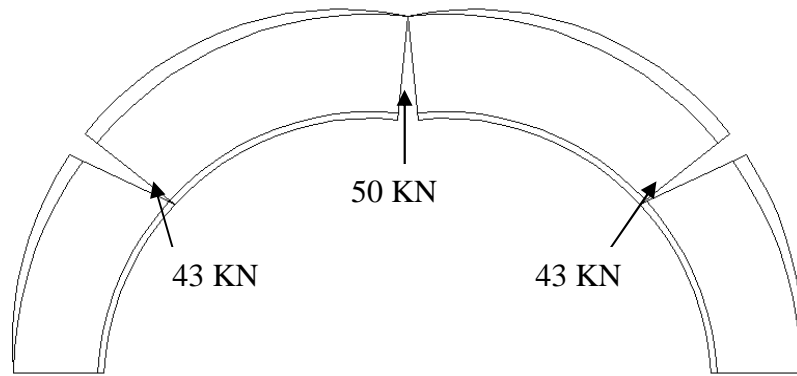


Fig. VI- 12: mode de ruine de la voûte enduite renforcée par lamelles de carbone (P1)



Fissurations au niveau des reins à l'extrados

Fig. VI- 13: fissurations au niveau des reins à l'extrados (P1 et P2)



Décollement des plats

Fig. VI- 14: décollement des plats (P1 et P2)

Les fissures sont continues sur toute la longueur de la voûte. Les voûtes renforcées par lamelles de carbone restent en place (figure VI-15).



Fig. VI- 15: voûte renforcée par des plats de carbone

Le paragraphe suivant aborde les résultats des essais sur des voûtes renforcées par des tissus de carbone.

#### 4.2 Résultats des essais sur deux voûtes renforcées par tissus de carbone

Deux essais sur voûtes enduites renforcées par tissus de carbone ont été réalisés sous chargement vertical.

Les variations de la charge en fonction de la flèche sont données sur la figure VI-16.

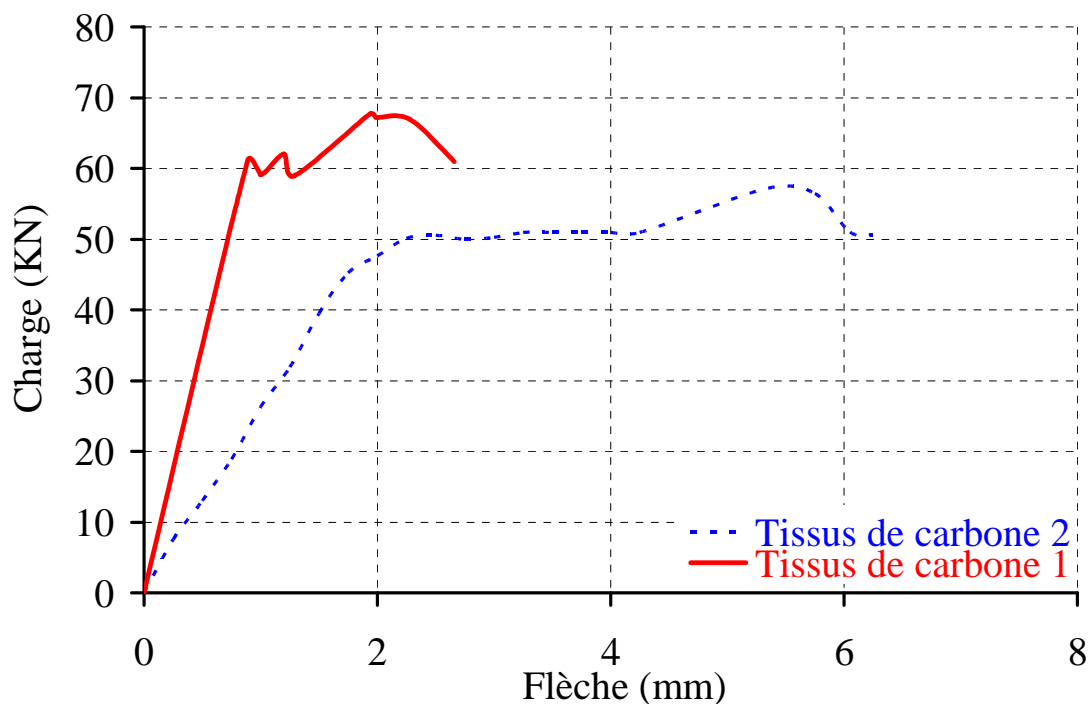


Fig. VI- 16: comportement des voûtes enduites renforcées par tissus de carbone

Sur les courbes ci-dessus (T1), nous pouvons distinguer trois phases :

Première phase AB :

Les valeurs de charges n'entraînent pas des fissurations et les courbes montrent un comportement linéaire. Les fissures sont apparues à partir de 63 KN.

Deuxième et troisième phases BC et CD :

La voûte reste stable à partir de 63 KN jusqu'à une charge de 64 KN pendant plusieurs minutes. Les efforts sont transmis vers les tissus de carbone. Un premier détachement des tissus de carbone est apparu à 63 KN au niveau de la clé de voûte à l'intrados. La charge augmente jusqu'à 67,76 KN, après cette charge, plusieurs détachement ont eu lieu dans plusieurs endroits.

Sur les courbes ci-dessus (T2), nous pouvons distinguer trois phases :

Première phase AB' :

Les courbes montrent un comportement linéaire. Les fissures sont apparues à partir de 45 KN. Aucune fissure n'est apparue avant la charge de fissuration.

Deuxième et troisième phases B'C' et C'D' :

La voûte reste stable à partir de 49 KN jusqu'à une charge de 50 KN pendant plusieurs minutes. Les efforts sont transmis vers les tissus de carbone. Un premier détachement des tissus de carbone est apparu à 50 KN. La charge augmente jusqu'à 57,24 KN, après cette charge. Des arrachements des tissus ont été constatés en plusieurs endroits.

Les résultats des essais sont résumés dans le tableau suivant:

Essais sur voûtes	Charge d'apparition de la première fissuration [KN]	Charge à la rupture [KN]	Rapport
Tissus de carbone 1 (T1)	63	67,76	0,93
Tissus de carbone 2 (T2)	45	57,24	0,79

Tableau VI- 3: résultats des essais sur voûtes

Rapport\* = Charge d'apparition de la première fissuration / Charge à la rupture

La différence de résistance des deux voûtes est due à leur géométrie comme vu précédemment.

Le rapport entre la charge d'apparition de la première fissuration et la charge à la rupture pour la voûte « T1 » est de 0,9 et pour la voûte « T2 » est de 0,8. Donc, les résultats dépendent de la géométrie de chaque voûte, on peut estimer que le rapport moyen de la charge de la première fissuration/charge de à la rupture pour les voûtes enduites renforcées par tissus est de 0,86.

Les gains en charge à la rupture sont de l'ordre de 627% pour la voûte T1 et de 514% pour la voûte T2 par rapport aux voûtes non enduites. La différence est due à la géométrie des voûtes.

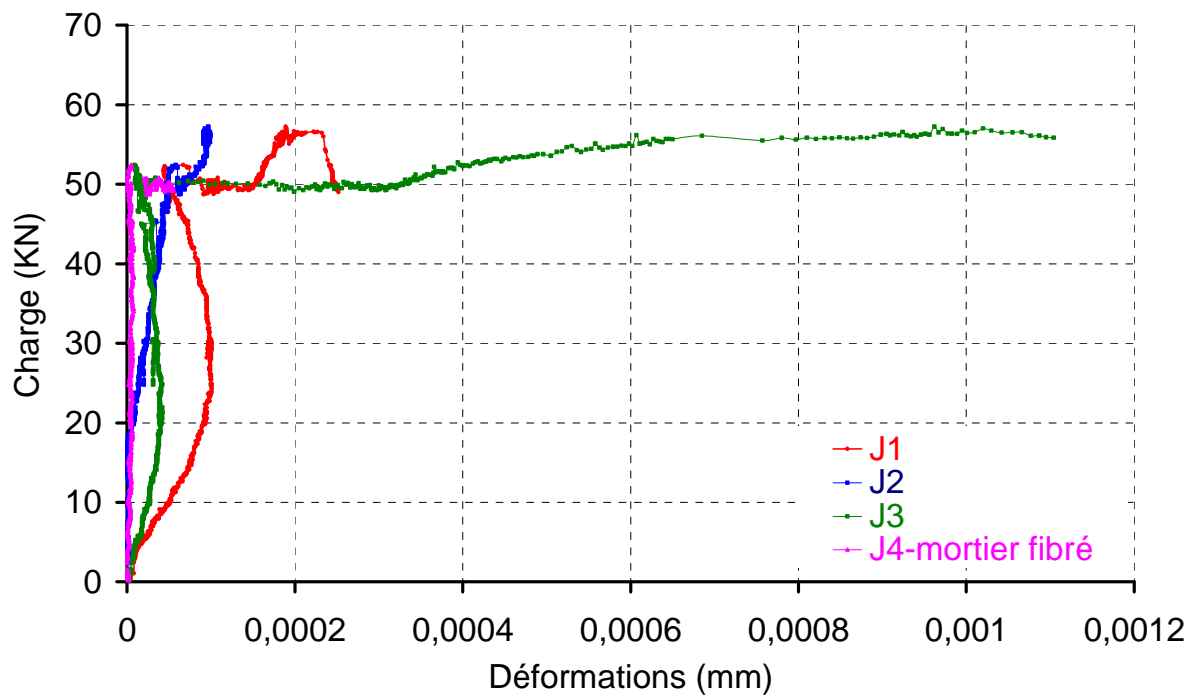


Fig. VI- 17: courbe charge/déformation enregistrée par les jauges pour les voûtes enduites renforcées par tissus de carbone

Le taux de travail de l'enduit est calculé comme suit :

$$E_m = 27\,308 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = 45 \cdot 10^{-6}$$

$$\sigma = E_m \cdot \varepsilon = 27308 \cdot 45 \cdot 10^{-6} = 1,22 \text{ MPa.}$$

Le comportement est élastique

$$E_d = \frac{1}{2} \times \sigma \times \varepsilon = \frac{1}{2} \times \frac{\sigma^2}{E}$$

$$E_d^g = \frac{1}{2} \times \sigma_g \times \varepsilon = \frac{1}{2} \times \frac{\sigma_g^2}{E}$$

$$\Delta = \frac{E_d}{E_d^g} = \frac{\sigma^2}{\sigma_g^2}$$

Avec  $\sigma = 1,22 \text{ MPa}$  et  $\sigma_g = 7,79 \text{ MPa}$

$$\frac{\sigma^2}{\sigma_g^2} = \frac{1,22^2}{7,79^2} = \frac{1,48}{60,6} = 0,024 = 2,45 \%$$

L'enduit a travaillé à 2,45 % de sa capacité quand la voûte est complètement fissurée.

Le taux de travail des tissus pour les deux voûtes est calculé comme suit :

$$\sigma = E \varepsilon$$

Dans le domaine de service, nous avons un taux de travail de :

$$\sigma = 230000 \times 0,00005 = 11,5 \text{ MPa}$$

Après fissuration importante de la voûte, le taux de travail est de :

$$\sigma = 230000 \times 0,0001 = 23 \text{ MPa}$$

La valeur de la contrainte de traction à la rupture du tissu est de 3500 MPa. Lorsque la voûte est considérée comme en état de service, le taux de travail des tissus est de 0,32%. Lorsque la voûte est complètement fissurée, les tissus travaillent donc à 0,65% de leur capacité.

Suite à cette observation sur les essais, il convient d'analyser l'évolution de la fissuration, très importante pour la prédiction de la rupture. Le mode de rupture est identique pour les deux voûtes testées (figure VI-18). Les fissures sont apparues dans les joints du mortier au niveau des reins à l'extrados d'un seul côté (figure VI-19). De plus, un décollement des tissus de carbone est constaté (figure VI-20 et figure VI-21).

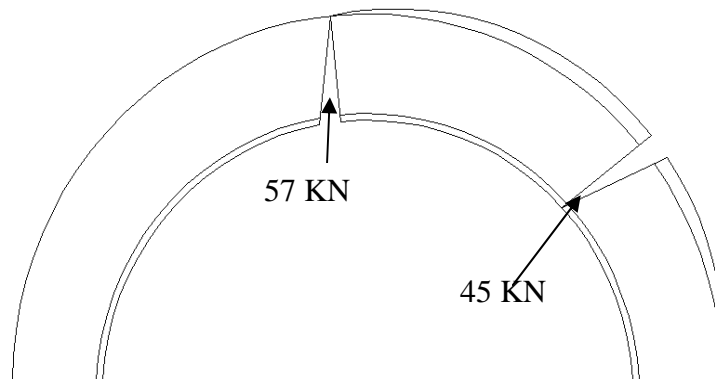
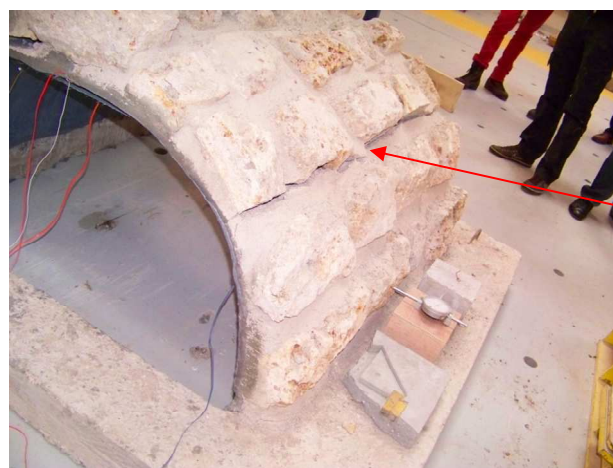


Fig. VI- 18: mode de ruine de la voûte enduite renforcée par tissus de carbone (T2)



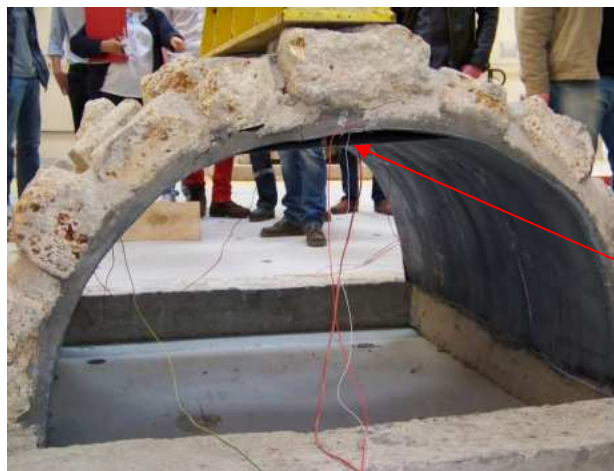
Fissurations au niveau des reins à l'extrados

Fig. VI- 19: fissurations au niveau des reins à l'extrados



Détachement des tissus

Fig. VI- 20: début de décollement des tissus de carbone



Détachement des tissus

Fig. VI- 21: décollement des tissus de carbone

Les fissures sont continues sur toute la longueur de la voûte. Les voûtes renforcées par tissus de carbone se sont effondrées (figure VI-22).



Fig. VI- 22: effondrement d'une voûte renforcée par tissus de carbone

Après avoir présenté les deux méthodes de renforcement (par plats et tissus de carbone), plusieurs comparaisons sont détaillées dans la partie suivante entre :

- Voûtes renforcées par des plats de carbone et voûtes enduites de 2 cm
- Voûtes renforcées par des tissus de carbone et voûtes enduites de 2 cm
- Voûtes renforcées par des plats de carbone et renforcées par des tissus de carbone

## 5. Synthèse

Le gain de la charge de la première fissuration et le gain de la charge à la rupture par rapport à la voûte enduite de 2 cm sont donnés respectivement :

- Pour les voûtes renforcées par des plats de carbone: 366% et 377%.
- Pour les voûtes renforcées par des tissus de carbone : 320% et 276%

Voûtes	Charge de la première fissuration [KN]	Charge à la rupture [KN]
Enduite de 2 cm	15	18
Enduite renforcée par des plats	70	85,85
Enduite renforcée par des tissus	63	67,76

Tableau VI- 4: résultats des essais des voûtes

Les voûtes enduites renforcées par plats montrent une rigidité globale plus importante que pour les voûtes enduites renforcées par tissus. La figure ci-dessous présente la charge d'apparition de la première fissuration et la charge à la rupture pour chaque type de renforcement (plats et tissus de carbone).



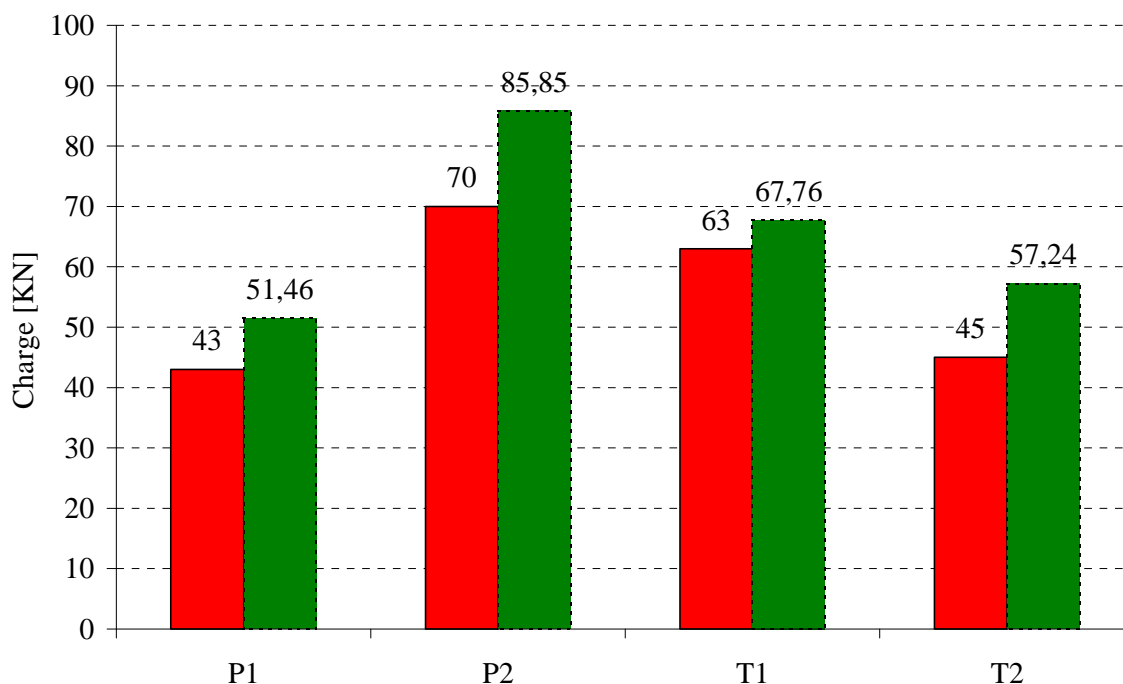


Fig. VI- 23: la charge d'apparition de la première fissuration et la charge à la rupture par type de renforcement (plats et tissus de carbone)

Nous constatons de manière empirique (essais réalisés) et avec l'appui des recherches effectuées par Basilio [3] et Valluzi [4] que l'utilisation des matériaux composites modifie le mécanisme de ruine et augmente la charge à la rupture.

Les résultats précédents doivent être mis en parallèle avec les contraintes engendrées par les différentes méthodes. En effet, plusieurs paramètres sont à prendre en compte comme l'épaisseur de la couche du renforcement, le coût de main d'œuvre, la mise en œuvre, la durabilité et la quantité de perte des matériaux comme le montre tableau VI-5.

	Plats de carbone	Tissus de carbone
Mise en œuvre	Manuellement	Manuellement
Epaisseur	2,12 cm	2,013 cm
Utilisation des treillis soudés	non	non
Coût de main d'œuvre [heures]	7	5
Perte de matière	Négligeable	Négligeable
Charge de ruine [kN]	85	67

Tableau VI- 5: étude comparative entre 2 méthodes de renforcement

## 6. Etude comparative avec le procédé de réhabilitation traditionnel

Après avoir présenté les essais sur des voûtes en maçonnerie renforcées par mortier fibré, par des plats et par des tissus de carbone, des essais sur deux voûtes renforcées par béton projeté armé de 6 cm seront présentés dans le but de comparer les méthodes de réhabilitation traditionnelles et celles réalisées avec des matériaux composites.

### 6.1 Mise en œuvre du béton projeté

Le renfort utilisé est un treillis soudés de diamètre 0.9 mm possédant une maille de 50 x 50 mm<sup>2</sup>. La distance entre le treillis et l'intrados de la voûte est de 2 cm.

- une couche de béton de 2 cm
- un treillis
- une couche de béton de 3 cm
- une couche de finition (1 cm)

Les treillis sont encastrés en naissance de voûte (figure VI- 24).

L'épaisseur de la couche varie entre 6 et 8 cm. Le mode de projection est réalisé par voie sèche (conditions de chantier) avec une épaisseur de béton de 6 cm sur toute la surface intérieure de la voûte.



Fig. VI- 24: mise en place des aciers



Fig. VI- 25: projection par voie sèche

Le béton est préparé en mélangeant les constituants suivants :

- 350 Kg de ciment gris CEM I 52,5 N CE PMES CP2 NF "HRC".
- 1 m<sup>3</sup> de sable sec (conforme à la norme XP P 18-540)

Une caisse de béton projeté (figure VI-26) a été réalisée dans le but de contrôler la résistance donnée par le fournisseur, (Rc28= 30 MPa).



Fig. VI- 26: caisse en béton projetée

Des essais de compression sur des éprouvettes 6 x12 cm<sup>2</sup> (figures VI-27 et VI-28) ont été réalisés dans le but de contrôler la résistance donnée par le fournisseur.



Fig. VI- 27: carottage des éprouvettes 6x12 cm2



Fig. VI- 28: essai de compression

Eprouvettes	R <sub>c28</sub> [MPa]
1	39,85
2	35,00
3	35,32
moyenne	36,72

Tableau VI- 6: résistances mécaniques du béton projeté

La résistance moyenne du béton projeté est de 36,72 MPa.



Fig. VI- 29 : projection et voûte finie

## 6.2 Résultats des essais

Deux essais sur voûtes renforcées par du béton projeté de 6 cm ont été testés sous chargement vertical. Les épaisseurs de la clé de voûte ainsi que les dimensions des blocs de chaque meulière ne sont pas identiques pour les 2 voûtes. Les variations de la charge en fonction de la flèche sont représentées sur la figure VI- 30 .

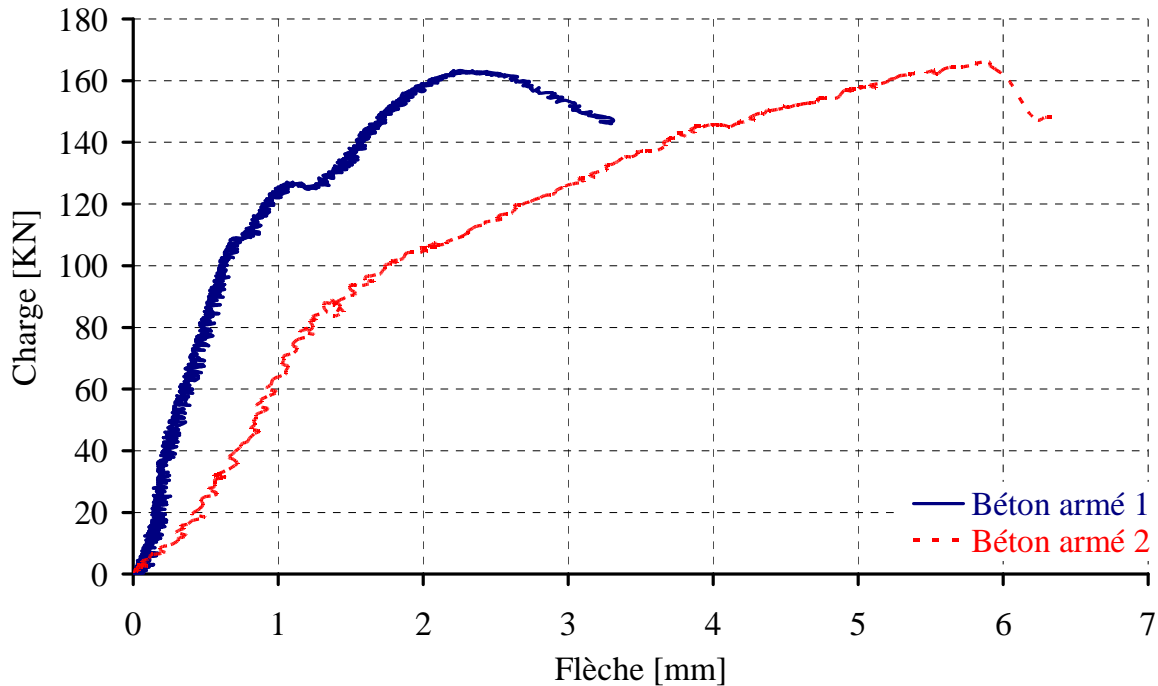


Fig. VI- 30: comportement d'une de 2 voûtes renforcées par béton projeté armé

Les résultats des essais sont résumés dans le tableau suivant:

Essais sur voûtes	Charge d'apparition de la première fissuration [KN]	Charge à la rupture [KN]
Béton armé 1	110	162,66
Béton armé 2	90	164

Tableau VI- 7: résultats des essais sur voûtes

La différence de résistance des deux voûtes est due à leur géométrie, aux dimensions et aux caractéristiques mécaniques des blocs de la meulière.

## 6.3 Mode de rupture

L'évolution de la fissuration est donnée ci-dessous. Le mode de rupture est identique pour les deux voûtes testées. Les fissurations sont apparues en clé de voûte à l'intrados (figure VI -31). Les fissures sont continues sur toute la longueur de la voûte.



Fissuration en clé de voûte à l'intrados

Fig. VI- 31: mode de rupture

#### 6.4 Comparaison

Les trois méthodes de réhabilitation ont été présentées dans les chapitres précédents. Les tableaux ci-dessous présentent le nombre des voûtes testées.

<b>Voûtes en maçonnerie</b>	<b>Nombre</b>
<b>Non enduite</b>	2
<b>Enduite de 3 cm</b>	8
<b>Béton armé projeté de 6 cm</b>	1

Tableau VI- 8: nombre des voûtes testées A

<b>Voûtes en maçonnerie</b>	<b>Nombre</b>
<b>Non enduite</b>	2
<b>Enduite de 2 cm</b>	1
<b>Enduite de 2 cm + lamelle de carbone</b>	2
<b>Enduite de 2 cm + tissus de carbone</b>	2
<b>Béton armé projeté de 6 cm</b>	1

Tableau VI- 9: nombre des voûtes testées B

Les variations de la charge en fonction de la flèche pour les voûtes testées A et B sont respectivement représentées sur les figures suivantes.

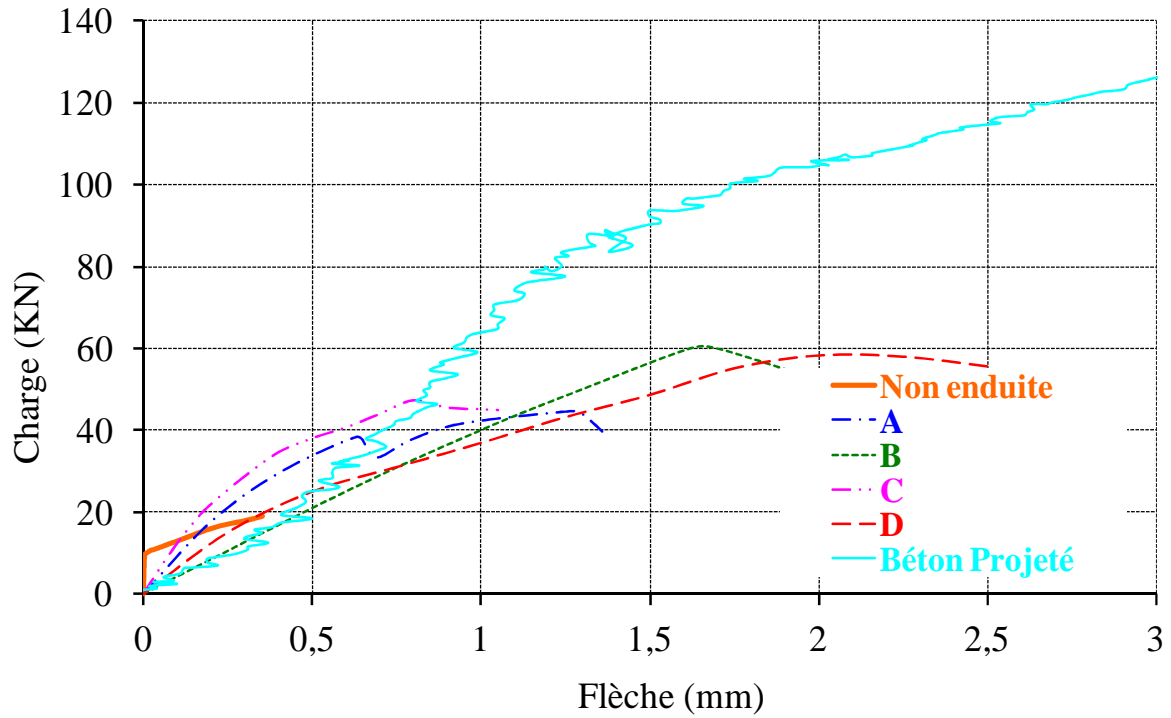


Fig. VI- 32: comportement des voûtes en maçonnerie testées A

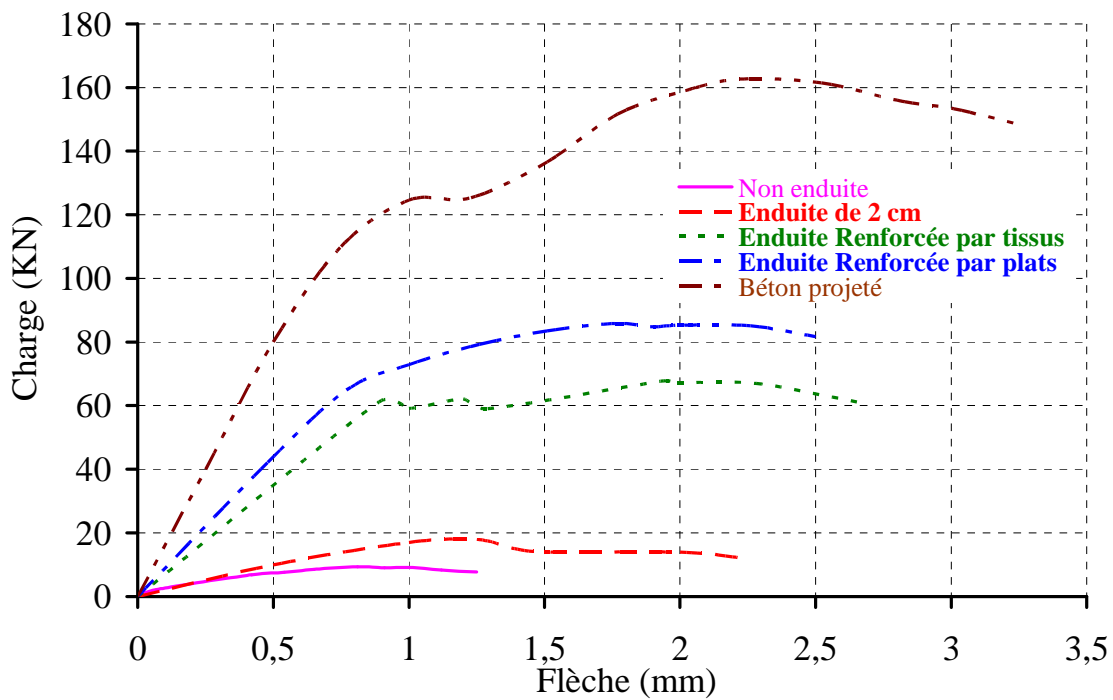


Fig. VI- 33: comportement des voûtes en maçonnerie testées B

Une augmentation de la charge a été remarquée pour chaque type de renforcement par rapport aux voûtes non enduites. La plus grande augmentation de la charge a été obtenue par le renforcement par béton projeté. La méthode traditionnelle reste la plus performante, mais ce niveau de performance est-il nécessaire ?

## **Bibliographie**

[1] S. Kesteloot (2005), Réhabilitation des ouvrages d'assainissement par matériaux composites: Etude expérimentale et dimensionnement par calculs numériques, Thèse de Doctorat, Université d'Artois, Mars 2005

[2] A. Gabor (2002), « Contribution à la caractérisation et à la modélisation des maçonneries non-renforcées et renforcées par matériaux composites », Thèse Doctorat, Lyon 1.

[3] Basilio I., Oliveira D., Lourenço P. (2004), « Optimal FRP strengthening of masonry arches », 13th International Brick and Block Masonry Conference, Amstrdam.

[4] Valluzzi 2001: Valluzzi, M. R., M. Valdemarca, C. Modena (2001), "Behavior of brick masonry vaults strengthened by FRP laminates", Journal of Composites for Constructions, ASCE 5(3), pp 163 – 169.

# **Conclusion & Perspectives**



## Synthèse de la campagne expérimentale

Plusieurs paramètres interviennent : l'épaisseur de la couche renforcée, le coût de main d'œuvre, la mise en œuvre, la durabilité et la quantité de perte des matériaux. Deux techniques de réhabilitation ont été abordées au cours de cette thèse.

La première technique consiste à renforcer les ouvrages en meulière avec un simple chemisage de 3 cm. La charge de rupture est alors 3 fois plus importante, avec un retardement de la fissuration. De plus, lors d'utilisation in-situ, les ouvrages en place montreront un état de dégradations avancés. Le gain sera donc plus important. Cependant, afin d'optimiser la technique, il sera nécessaire d'avoir recours à une injection de régénération de la structure afin de combler les vides présents dans la structure. Cette intervention est nécessaire quel que soit la technique de réhabilitation à utiliser.

La seconde technique utilise le couplage chemisage mince / collage de matériaux composites pour accroître la capacité portante des ouvrages en meulière. En effet, il est impossible de coller directement les composites sur la meulière. Les résultats de l'ensemble des essais sont résumés dans le tableau C-1.

<b>Voûte renforcée par</b>	<b>Mortier fibré de 2 cm</b>	<b>Mortier fibré de 2 cm + plats</b>	<b>Mortier fibré de 2 cm + tissus</b>	<b>béton armé</b>
<b>Mise en œuvre</b>	Manuellement	Manuellement	Manuellement	Machine
<b>Epaisseur (cm)</b>	2	2,12	2,013	6
<b>Utilisation des treillis soudés</b>	non	Non	non	Oui
<b>Coût de main d'œuvre [heures]</b>	3	7	5	12
<b>Quantité de matière tombée</b>	négligeable	négligeable	négligeable	assez importante
<b>Charge de ruine [KN]</b>	20	85	67	164

Tableau C- 1 : étude comparative entre quatre méthodes de renforcement

Quel que soit la voûte testée, les fissures sont apparues dans les joints de mortier et elles ont entraîné la ruine de nos voûtes.

La figure suivante montre la charge à la rupture de chaque type de renforcement.

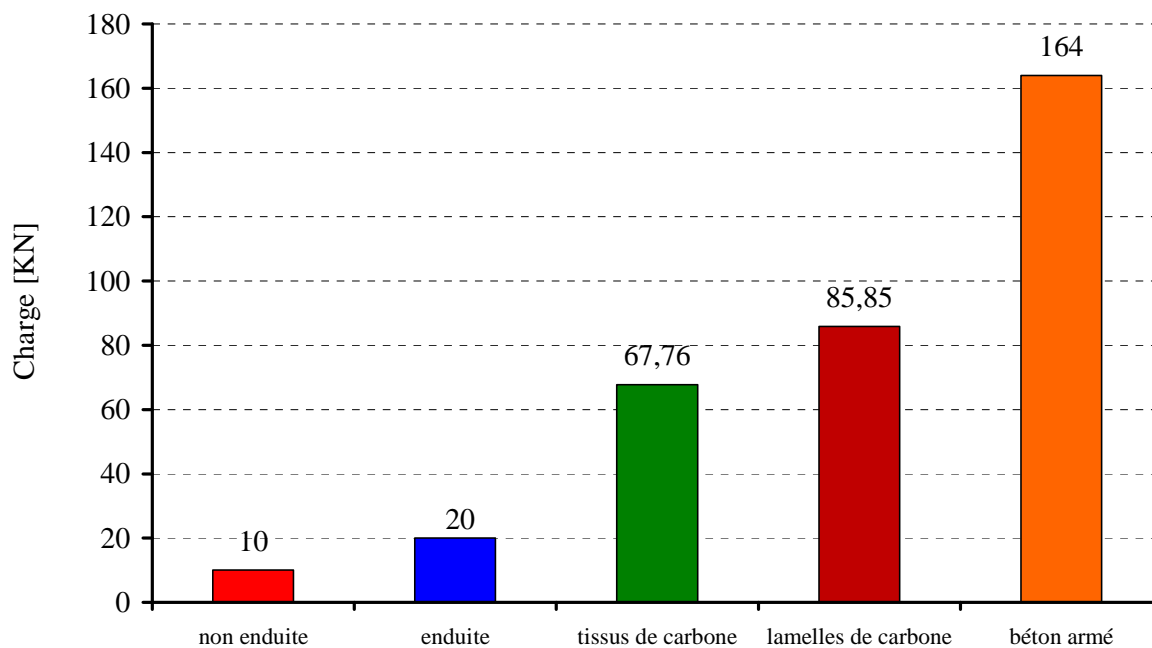


Fig. C- 1 : charge de rupture des voûtes en maçonnerie testées

Basé sur les résultats de cette recherche, nous pouvons apporter les conclusions suivantes :

Empiriquement, il a été observé que le renforcement des structures en maçonnerie de meulière par des mortiers fibrés, des matériaux composites et du béton projeté modifie le mécanisme de rupture.

- La synthèse bibliographique [1,2] a confirmé le gain de charge qui peut être apporté par l'application de plats composites à l'intrados sur des structures en maçonnerie de type voûte.
- D'un point de vue financier, l'application des tissus est plus aisée et donc plus rapide par rapport aux autres méthodes de réhabilitation. Lors d'un chemisage par tissus, une optimisation du temps de main d'œuvre de 2 heures est constatée par rapport à l'utilisation de plats de carbone. En comparaison à la technique traditionnelle par béton projeté, un gain de 7 heures est alors constaté.
- Les 2 types de renforcement par matériaux composites et béton projeté armé restent utilisables dans les réparations sur toute la surface d'un ouvrage. Lors d'un renforcement ponctuel, la technique de renforcement par béton projeté n'est pas possible.

## Conclusion et Perspectives de notre recherche

Basé sur les résultats de cette recherche, les conclusions suivantes sont:

- La charge à la rupture, que ce soit pour un renforcement par plats ou par tissus de carbone, a été multipliée par 5. Plusieurs paramètres entrent en jeu : l'épaisseur de la couche du renforcement, la durabilité et le temps d'application.
- La présence des matériaux composites (plats et tissus de carbone), a permis de retarder l'ouverture des fissures d'où l'intérêt d'utiliser ses matériaux sans acier.
- Chaque méthode de renforcement a son propre mécanisme de ruine.
- D'un point de vue financier, l'application des tissus est plus aisée et donc plus rapide par rapport aux autres techniques de réhabilitation.

Cette thèse, partie intégrante du projet RESAME, propose donc de substituer un procédé basé sur le renforcement par matériaux composites lors de surcharges plus ou moins importantes au chemisage par béton projeté armé. Le projet RESAME vise à diminuer les coûts de réhabilitation mais aussi à augmenter la durabilité des réhabilitations. Ces deux points sont donc parfaitement obtenus. D'une part, une réduction du temps de mains d'œuvre est constaté lors de l'utilisation de l'une ou l'autre technique abordée au cours de la thèse, mais aussi de pouvoir effectuer des renforcements ponctuels, impossible avec la projection de béton, d'où une diminution des coûts. D'autre part, nos techniques n'ont pas recours aux armatures comme pour le béton projeté armé, ce qui évite la corrosion et accroît donc la durabilité des réhabilitations.

Suite à ces essais en laboratoire, une transposition in-situ est à envisager. Cependant, avant de transposer cette technique in-situ, des simulations numériques doivent être réalisées afin d'optimiser les renforts. Les calculs utilisent des logiciels de simulation basés sur la méthode la plus utilisée est la méthode des éléments finis (MEF). Les modèles numériques seront mis en œuvre à partir des essais de caractérisation des matériaux et d'écrasement sur des voûtes maçonnées en meulière non renforcées et renforcées par des matériaux composites. La modélisation pourra être réalisée avec le logiciel code-aster utilisé par le bureau d'études. Une modélisation numérique 2D pour les deux types de renforcement pourra être menée. La voûte simulée est semi-circulaire avec une largeur de 1,10 m, une longueur de 1,20 m, une hauteur de 0,55 m et un rayon de 0,55m. Les lignes 1 et 2 de la figure suivante représentent les conditions aux limites.

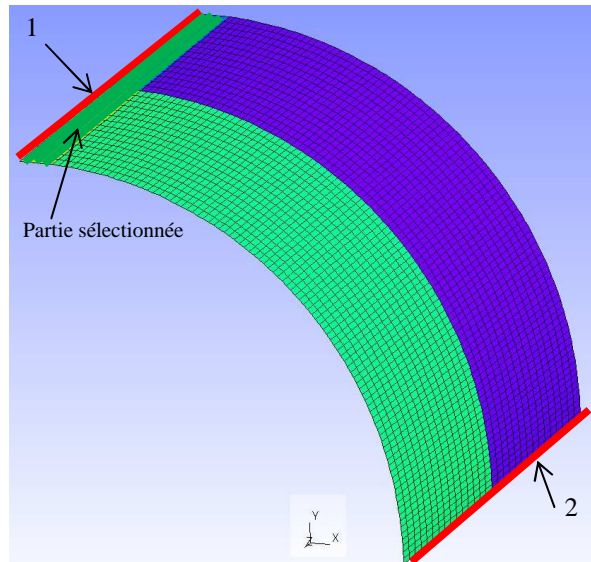


Fig. C- 2 : voûte modélisée

Suite à cette étude, un site expérimental dédié à nos réhabilitations pourra être réalisé. En effet, un linéaire de 50 ml d’ouvrages en béton et de 50 ml d’ouvrages en meulière seraient construits in-situ, avec une couverture de 2 mètres afin d’appliquer dans des conditions réelles les différentes techniques de réhabilitation, que ce soit les traditionnelles, ou celles abordées dans le cadre de cette thèse. Des chargements en surface seraient appliqués et des mesures à l’intrados des collecteurs seraient menées pour étudier le comportement de chaque technique. De plus, une étude de la durabilité serait alors couplée à ces essais. Les maîtres d’ouvrages pourraient alors visiter ce « chantier expérimental » afin de vérifier et de choisir en accord avec la maîtrise d’œuvre et les bureaux d’études la technique la mieux appropriée.

## Bibliographie

- [1] Basilio I., Oliveira D., Lourenço P. (2004), « Optimal FRP strengthening of masonry arches », 13th International Brick and Block Masonry Conference, Amsterdam.
- [2] Valluzzi 2001: Valluzzi, M. R., M. Valdemarca, C. Modena (2001), “Behavior of brick masonry vaults strengthened by FRP laminates”, Journal of Composites for Construction, ASCE 5(3), pp 163 – 169.

# **Annexe 1 : Fiches techniques**

## **Mortier hydraulique SIKA**

Notice technique  
Edition mars 2009  
Numéro 6.72  
Version n°064.2009  
SikaRep®-3SR

## SikaRep®-3SR

Mortier de reprofilage, réparation et protection.  
Application manuelle ou par projection (voie humide, voie sèche)



Produit contrôlé et utilisé par la Compagnie Nationale du Rhône Compagnie Nationale du Rhône

<b>Présentation</b>	Mortier prêt-à-gâcher, à base de ciment PMES, fumées de silice, charges spéciales, adjuvants et fibres synthétiques. Après gâchage, on obtient un mortier de couleur grise. <b>Classement R4 selon la EN 1504-3</b>
<b>Domaines d'application</b>	Reprofilage, réparation et protection des ouvrages en Bâtiment et en Génie Civil : <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Structures Béton Armé, ouvrages en maçonnerie à rejointoyer</li> <li>■ Ouvrages soumis à l'abrasion et / ou aux agressions chimiques (silos, aire de stockage de sel, engrais, minerais...)</li> <li>■ Réseaux d'assainissement (voûtes, radiers, banquettes et piédroits)</li> <li>■ Ouvrages hydrauliques (conduites, bassins, déversoirs, cunette d'évacuation...)</li> <li>■ Ouvrages maritimes</li> <li>■ Tunnels, galeries, ...</li> </ul>
<b>Caractères généraux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ S'applique de 10 à 60 mm d'épaisseur en vertical et en horizontal</li> <li>■ Adhère parfaitement sur la plupart des supports (béton, mortier, pierre, brique)</li> <li>■ Applicable manuellement ou par projection (voie humide, voie sèche).</li> <li>■ Pompable sur de grandes longueurs</li> <li>■ Excellente durabilité vis-à-vis des eaux chargées, eaux pures, eaux de mer</li> <li>■ Bonne résistance aux solutions salines, aux acides et bases dilués, aux solvants</li> <li>■ Excellente tenue au gel et aux sels de déverglaçage</li> <li>■ Excellent aspect de finition</li> </ul>
<b>Agréments, essais officiels</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ PV d'essais CNR n° 14856 – Abrasion.</li> <li>■ Marquage CE – EN 1504-3 : Principe 3 (Restauration du béton) – Méthode 3.1 et 3.3 Principe 4 (Renforcement structural) – Méthode 4.4</li> </ul>
<b>Caractéristiques</b>	
<b>Coloris</b>	Gris
<b>Aspect</b>	Poudre grise.
<b>Conditionnement</b>	Sac de 25 kg
<b>Stockage</b>	A l'abri de l'humidité.
<b>Conservation</b>	Le produit stocké en emballage intact non entamé se conserve 6 mois



## Données techniques

<b>Densité</b>	Densité de la poudre : 1,8 environ Densité du mortier frais : 2,2 environ												
<b>Granulométrie</b>	0 / 3 mm												
<b>Résistances mécaniques</b>	Résistance à la compression (EN 12190) <table border="1"><tr><td>1 jour</td><td>environ 15 MPa</td></tr><tr><td>7 jours</td><td>environ 30 MPa</td></tr><tr><td>28 jours</td><td>environ 50 MPa</td></tr></table> Résistance à la flexion (EN 12190) <table border="1"><tr><td>1 jour</td><td>environ 4MPa</td></tr><tr><td>7 jours</td><td>environ 5MPa</td></tr><tr><td>28 jours</td><td>environ 7MPa</td></tr></table>	1 jour	environ 15 MPa	7 jours	environ 30 MPa	28 jours	environ 50 MPa	1 jour	environ 4MPa	7 jours	environ 5MPa	28 jours	environ 7MPa
1 jour	environ 15 MPa												
7 jours	environ 30 MPa												
28 jours	environ 50 MPa												
1 jour	environ 4MPa												
7 jours	environ 5MPa												
28 jours	environ 7MPa												
<b>Adhérence par traction directe</b>	≥ 2 MPa (EN 1542).												
<b>Adhérence après cycles gel-dégel</b>	≥ 2 MPa (EN 13687-1).												
<b>Module d'élasticité</b>	≥ 20 000 MPa (EN 13412).												
<b>Temps de prise (20°C)</b>	■ Début de prise: env. 6 h ■ Fin de prise: env. 9 h												
<b>Absorption capillaire</b>	≤ 0,50 kg.m-2.h-0,5 (EN 13057)												
<b>Indice d'abrasion CNR</b>	2,8 à 28 jours.												

## Conditions d'application

<b>Proportions du mélange</b>	■ Pour une application manuelle ou par projection par voie humide, gâcher un sac de 25 kg de SikaRep-3SR avec 3,5 litres d'eau. La quantité d'eau de gâchage réelle peut varier légèrement par rapport à cette valeur en fonction des conditions atmosphériques. ■ Pour une application par voie sèche, le projeteur règle la quantité d'eau en bout de lance à l'anneau de prémouillage.
-------------------------------	--

<b>Consommation</b>	Environ 18 kg de poudre/m <sup>2</sup> /cm d'épaisseur.
---------------------	---

<b>Préparation du support</b>	<p>Le support doit être propre, sain et avoir subi une préparation de surface adaptée permettant de le débarrasser de toute partie non ou peu adhérente. Il doit être notamment exempt de trace d'huile, de graisse, de laitance, de produit de cure et de toute substance susceptible de nuire à l'adhérence.</p> <p>Il doit présenter une cohésion d'au moins 1 MPa en traction directe.</p> <p>Si des armatures de béton armé sont apparentes, et disposent d'un enrobage insuffisant, elles doivent être brossées ou sablées pour éliminer la rouille, puis recouvertes du produit de passivation SIKA MONOTOP 610 AC.</p> <p>Lors de l'application, le support doit être saturé d'eau. Pour cela, l'arroser abondamment la veille et l'humidifier si nécessaire à nouveau juste avant la mise en oeuvre. Veiller cependant à ce qu'il ne reste pas de film ou de flaque d'eau en surface, ce qui pourrait nuire à l'adhérence du mortier.</p> <p>En cas de venues d'eau, veiller à les stopper, par exemple avec le Sika Mortier Rapide, avant d'appliquer le SikaRep-3SR.</p>
-------------------------------	---

## Mise en œuvre

<b>Conditions d'utilisation</b>	Température du support, du produit et de l'ambiance: 5°C à 30°C.
---------------------------------	--

<b>Nettoyage des outils</b>	A l'eau immédiatement après usage.
-----------------------------	------------------------------------

<b>Mise en œuvre</b>	<p>Appliquer le SikaRep-3SR à la truelle, ou par projection sur le support humidifié. Épaisseur minimale : 10 mm.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ En vertical, il est possible d'appliquer manuellement, ou par projection en voie sèche (par exemple avec la machine Aliva 246), jusqu'à environ 60 mm en une passe.</li> <li>■ Les applications par projection en voie humide, par exemple avec la machine Putzmeister SP11, peuvent se faire jusqu'à environ 40 à 50 mm par passe. Pour réaliser une finition talochée, appliquer une couche supplémentaire d'épaisseur 1 cm après durcissement de la couche de fond, puis effectuer le talochage (taloche plastique, éponge ou polystyrène) dès que le mortier commence à tirer.</li> <li>■ Pour des applications en gros volume, il est possible de préparer un micro béton à base de SikaRep-3SR et de granulats de diamètre 3/8 mm ou 8/12 mm par exemple.</li> <li>■ Pour les utilisations en protection de sol, l'application préalable d'une barbotine d'accrochage à base de SikalateX ou d'un primaire à base de résine époxy (SikaFloor 156 ou Sikadur-32 LP), permet d'augmenter l'adhérence du SikaRep-3SR, appliqué sur barbotine ou primaire poisseux.</li> <li>■ Protéger le produit frais contre la dessiccation par l'ANTISOL® BAN.</li> </ul>
<b>Durée Pratique d'Utilisation</b>	A 20°C : environ 1 h.
<b>Précautions d'emploi</b>	<p>Manipulation analogue à celle d'un mortier de ciment. Consulter la fiche de données de sécurité pour les précautions d'emploi et l'élimination des déchets sur Internet <a href="http://www.sika.fr">www.sika.fr</a></p>
<b>Mentions légales</b>	<p>Produit réservé à un usage strictement professionnel Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile. «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»</p>



## **Annexe 2 : Fiches techniques**

### **Mortier hydraulique LANKO**

# 736 LANKOCRETE RESEAUX

MORTIER DE REHABILITATION FIBRE  
RENFORCEMENT DES RESEAUX

R E P A R A T I O N



## LES "PLUS" PRODUIT

- Renforcement des réseaux d'assainissement et d'adduction d'eau potable
- Résistances mécaniques élevées
- Durcissement rapide
- Application en forte épaisseur, jusqu'à 80 mm
- Résistance aux eaux faiblement agressives (pH  $\geq$  5)
- Pompable sur grandes distances
- Utilisable en travaux maritimes

### PROPRIETES

Mortier à base de ciments spéciaux, de sables, de fibres synthétiques et d'additifs.

### DOMAINES D'APPLICATION

- Enduction des voûtes et pieds droits d'ouvrages enterrés (canalisations, tunnels, ovoïde, etc.)
- Renforcement des réseaux par projection
- Rejointoiement d'ouvrages maçonnés
- Restructuration d'ouvrages souterrains
- Possibilité d'avoir le 736 LANKOCRETE RESEAUX sans fibres - Nous consulter

### CARACTERISTIQUES

- Constituants actifs à base de ciment PMES, d'adjuvants, de sables, et de fibres synthétiques
- Poudre grise
- Granulométrie : 0 - 4 mm
- Densité pâte : 2,1  $\pm$  0,05
- pH mortier : 12,5
- D.P.U. : 40 minutes environ à 20°C

### Temps de prise à 20°C\*

Début de prise	4 h 30
Fin de prise	5 h 00

\* Valeurs de laboratoire données à titre indicatif.

### Résistances mécaniques (MPa)\*

Echéances	1 jour	7 jours	28 jours
Flexion	4,5	7	11
Compression	25	60	80

\* Essai réalisés sur éprouvettes 4 x 4 x 16, conservées à + 20°C et 90% d'humidité. Valeurs de laboratoire données à titre indicatif.

### Résistances à l'abrasion\*

	indice CNR à 28 jours
736 MPRA	< 3
Granit	0,35 à 0,8
Verre	1
Béton courant B25	3

\* Ces valeurs sont données à titre de comparaison. Plus l'indice CNR est faible, plus la résistance à l'abrasion est importante.

**PAREX**LANKO

**Annexe 3 : Fiches techniques**  
**Mortier hydraulique FREYSSINET**

# Foreva M110

- Mortier thixotrope 50mm en une passe manuellement
- Peut être appliqué jusqu'à 100mm d'épaisseur
- Peut être projeté mécaniquement
- Haute adhérence sur béton
- Résistances mécaniques initiales et finales très élevées
- Excellente tenue aux agressions ambiantes aux eaux de mer, au gel sévère, etc.
- Marque «Produit réparation» NF P 18 840 classe 3

## Mortier universel fibré de réparation gris

**Foreva® M110** est un mortier hydraulique fibré à retrait compensé spécialement étudié pour les travaux de ragréages et de reconstitution de forme. Il s'applique facilement pour des épaisseurs comprises entre 5 et 50 mm.

### Caractéristiques

**Foreva® M110** répond à la norme NF P 18 840 et satisfait les exigences de réparation structurels des ouvrages d'art.

- Mortier à prise rapide fibré, base liants hydrauliques et d'additifs en poudre.
- Mélange prêt à gâcher.
- Ne contient ni chlorure ni poudre métalliques.
- Immunitaire pour les armatures, conforme au DTU 21,4 (Norme P18 203).
- pH mortier : 12,5.
- Densité sur mortier durci : 2.
- Module d'élasticité 35 GPa.
- Granulométrie 0 - 2 mm
- Couleur grise.
- D P U à 20°C 45 min.

### Domaines d'application

**Foreva® M110** convient à tous les ouvrages soumis aux classes d'exposition X0, XC, XD, XS, XF définis par la norme NF EN 206-1.

- Pour la classe XA consulter le Département Technique de Freyssinet.
- Réparation des surfaces en béton.
- Réparation d'épaufrures et reconstitution de forme.
- Tous types de structures : poutres, dalles, poteaux, fondations, voûtes, rejointoiements, etc.
- Renforcement structurel.
- Reprofilage de surfaces pour étanchéité.
- Matages pour calage.



### Temps de prise

Température	+ 5°C	+ 20°C	+ 35°C
Début de prise	7h00	2h00	1h00
Fin de prise	8h30	3h00	1h30

### Résistances mécaniques en MPa

Jours	2 j	7 j	28 j
Traction / Flexion	7	10	12
Compression	35	45	65

Valeurs obtenues sur éprouvettes 4x4x16 à 20°C en laboratoire.

### Adhérence par traction directe en MPa

Adhérence à 28 jours mesurée par traction directe Norme NF P18 858

- Sur dalle rugueuse  $\geq 3$

Après cycles thermiques Norme NF P18 859

- Sur dalle rugueuse  $\geq 3$



Sustainable Technology

Freyssinet - 1 bis, rue du Petit Clamart - Bât C - 78140 Vélizy-Villacoublay - France - Tél.:+33 1 46 01 84 84 - Fax:+33 1 46 01 85 85 [www.foreva.fr](http://www.foreva.fr)

# Foreva M110

## Mode d'emploi

### Mortier de ragréage standard :

Norme de référence NF P 95 101

- Sonder la zone au marteau et éliminer toutes parties dégradées.
- Repiquer les zones à ragréer au pic et au burin à main ou pneumatique.
- Dégager les aciers comme indiqué dans la Norme NF P 95 101.
- Faire une engravure à bords francs et droits.
- Dépoussiérer soigneusement la zone à ragréer, soufflage à l'air comprimée.
- Les aciers devront être débarrassés de l'oxyde friable par brossage ou sablage. (Il est inutile de mettre l'acier à blanc)
- Humidifier abondamment le support à l'eau propre.
- L'application se fait quand le support perd sa brillance
- Traiter la zone de reprise par frottage au mortier au moyen de la main gantée en serrant fortement une fine passe d'adhérence.
- Appliquer en suivant le mortier à la truelle, serrer fortement le mortier en fond d'engravure, l'application peut se faire en une passe sur une épaisseur de 50 mm environ. Si l'épaisseur est supérieure la mise en œuvre se fera en plusieurs étapes après raffermissement de la passe précédente.

Par machine à projeter : se référer aux épaisseurs recommandées par passe de projection.

### Mortier de matage :

Il est recommandé d'installer un coffrage.

- Le mortier est posé à la main gantée en s'efforçant de faire la meilleure répartition possible.
- Le mortier est appliqué par passes successives de 3 cm environ, il est serré fortement au moyen d'une cale de bois au calibre légèrement inférieur à l'épaisseur à obtenir et frappée au marteau.
- Les épaisseurs de matage doivent être en adéquation avec la surface à caler (voir recommandation Freyssinet). En tout état de cause le matage ne pourra dépasser une épaisseur de 80 mm.

Freyssinet - 1 bis, rue du Petit Garsart - Bât C - 78140 Vélizy-Villacoublay - France - Tél.+33 1 46 01 84 84 - Fax:+33 1 46 01 85 85 [www.foreva.fr](http://www.foreva.fr)

En cas de faible enrobage des armatures (moins de 2cm), il conviendra de prévoir un revêtement général de surface microporeux Foreva® Relastic 300.



## Dosage du mélange

### Mortier de ragréage standard :

Pour un sac de Foreva® M110 = 25kg  
Eau potable = 3,5 litres  
Mélange obtenu = 13 litres

### Mortier de matage :

Pour un sac de Foreva® M110 = 25kg  
Eau potable = 1,7 à 2 litres  
Mélange obtenu = 13 litres

## Consommation surfacique

2 kg/m<sup>2</sup>/mm d'épaisseur.

## Précautions d'emploi

- Prendre les dispositions nécessaires pour les températures ≤ 5°C.
- Vérifier les conditions de point de rosée avant application. (voir procédure Freyssinet).
- Ne pas appliquer sur un support gelé ou en cours de dégel.
- Appliquer une cure pour les applications en site ventés ou sujets à la dessiccation accélérée.
- Humidifier le support avant application. Ne pas appliquer sur support ruisselant.
- S'assurer que l'application ne se fasse pas sur une fissure active.

## Conditionnement

Sacs 3 plis de 25kg

## Conservation

Stockage sous abri de l'humidité isolé du sol. Durée de conservation de 12 mois à partir de la date de fabrication pour les sacs non ouverts.

## Sécurité

Port des EPI conformément à la fiche FDS.



Sustainable Technology

Foreva P11017 - 2017-04-06

**Annexe 4 : Fiches techniques**  
**Mortier hydraulique WEBER &**  
**BROUTIN**

**les avantages produit**

- Restaure et protège les structures endommagées
- Mise en œuvre manuelle ou par projection
- Adapté aux réparations généralisées
- Pour toutes les réparations en milieu agressif

**EMPLOI**

**DOMAINES D'UTILISATION**

- réparation structurelle et confortement
- réparation générale par projection

- adaptés à tous types d'ouvrages : ailes, poteaux, soubresmes, linteaux
- utilisation en vertical, horizontal et sous-face

**SUPPORTS**

- béton ou éléments de maçonnerie

- Sciezage au parapluie **PRÉPARATION DES SUPPORTS**

- tous traitements de finition applicables sur béton

**REVENDEURS ASSOCIÉS**

- tous revendeurs de finition applicables sur béton

**LIMITES D'EMPLOI**

- ne pas appliquer :
  - sur des supports en plâtre
  - sur des surfaces peintes ou recouvertes de mortier hydraulique (éliminer au préalable le revêtement organique (éliminer au préalable le support fibreuse ou peu résistant (magnésite de bloc de béton cellulaire, de pierre tendre, de brique creuse...))
- ne convient pas pour la réparation de sols
- humidités ou fortes circulations d'air
- Durabilité : **weber.rep structure** doit être recouvert par un revêtement adéquat
- ne résiste pas au contact de solutions acides (pH < 6)

**PRÉCAUTIONS D'UTILISATION**

- dangereux, respecter les précautions d'emploi
- se référer à l'étiquetage réglementaire figurant sur le produit
- se reporter à la rubrique "Sécurité produit"
- à la page 489 pour connaître le moyen de consultation des fiches de données de sécurité
- ainsi que la signification des symboles de danger

**CARACTÉRISTIQUES DE MISE EN ŒUVRE**

- épaisseur d'application
  - totale : entre 15 et 100 mm
  - par passe sur surfaces verticales : < 30 mm
  - par passe sur surfaces horizontales : < 30 mm
  - pour passe en sous-face : < 30 mm
  - 3 à 11 mm
- bétons indicatives mesurés en laboratoire selon la norme NF P 18-360 au dosage en eau nominal de 16 %.

**weber.rep structure**  
(mortier répar VM 212)

**MORTIER DE RÉPARATION FIBRE À HAUTES PERFORMANCES MÉCANIQUES**

**PRODUITS ASSOCIÉS**

**weber.rep fer**  
page 470

**weber curing**  
page 489

**RÉPARATION À HAUTES PERFORMANCES MÉCANIQUES**

**DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE**

- certificat de conformité à la norme NF (norme NF P 18-360 classe 1) NF 530 - ARNOR
- certification comportant :
  - tenue aux chocs avant et après cycles de gel-dégel
  - adhérence avant et après cycles thermiques
  - perméabilité aux liquides
  - résistance à la traction
  - résistance à la compression selon NF P 18-360
  - PV CTE Lyon 648
  - tenue à l'eau de mer et haute teneur en sulfates : PV LBTP B 14-6-36312-3
  - tenue à la pression et contre-pression d'eau : PV LBTP 370-36312-3
  - résistance à la corrosion : PV LBTP B 14-6-36312-3
  - module d'élasticité dynamique : PV CTE Lyon 32009-4 MP

**RECOMMANDATIONS**

- application par pulvérisation, sautoie, sautoie, sautoie
- pour les petites surfaces de la norme NF P 18-360
- dans le cas où le dosage de la première couche s'avère insuffisant, il est recommandé de limiter au minimum le nombre de passages de la règle, de façon de ne pas déformer l'adhérence du produit sur le support

**CONDITIONS D'APPLICATION**

- température d'emploi : comprise entre + 5 °C et + 35 °C
- ne pas appliquer sur supports gelés, en cours de dégel ou sur supports gelés pendant les 24 heures
- éviter l'application en plein soleil
- par temps chaud ou vent sec, protéger la couche de finition de la dessiccation par application de produit de cure weber curing ou par humidification

**TEINTE**

Grès  
Compte tenu des procédés d'impression, cette teinte se rapproche de ce qui apparaît sur le site.

**PRÉPARATION DES SUPPORTS**

- préparation des bétons
  - le support doit être dur, cohésif, propre et rugueux, préparé conformément aux prescriptions des normes NF P 95-010 et NF P 95-102 :
  - sonder au marteau l'ensemble des surfaces
  - à régler pour débiter les zones (sur, adhérence)
  - jusqu'à béton sain et biser des arêtes franches sur les bords de la réparation
  - pour une réparation généralisée, l'état de surface obtenu doit être rugueux afin de favoriser l'ancrage du mortier de réparation
  - à effectuer les armatures vigées, traitement des adhés
  - toujours éliminer la rouille des fers à la brosse métallique ou par sablage, puis dépolluer soigneusement
  - traiter les surs en appliquant à l'aide d'un pinceau un produit de traitement des surs
  - weber.rep fer en contact avec le béton
  - laisser sécher environ 1 heure (weber.rep fer doit être bien séché)

**CONDITIONS D'APPLICATION**

- température d'emploi : comprise entre + 5 °C et + 35 °C
- ne pas appliquer sur supports gelés, en cours de dégel ou sur supports gelés pendant les 24 heures
- éviter l'application en plein soleil
- par temps chaud ou vent sec, protéger la couche de finition de la dessiccation par application de produit de cure weber curing ou par humidification



25 kg

**APPLICATION**

- dosage en eau
  - entre 15% et 17%, soit de 3,6 à 4,25 litres d'eau par sac de 25 kg
- application

- préparation**
- avant application, toujours biserer que le support soit humide mais non ruisselant. L'humidification doit être adaptée à la porosité du support et être effectuée au minimum 24 heures avant (plusieurs heures sont l'application si nécessaire)
  - gâcher weber.rep structure jusqu'à consistance collante en respectant les proportions indiquées dans les conditions d'application
  - poursuivre le malaxage durant 2 à 3 minutes
  - maintenir le dosage en eau par sac et le temps de mélange constants d'une gâble à l'autre

**application**

- appliquer manuellement ou par projection en voie mouillée en une ou deux passes
- frotter et lisser à la fin
- laisser raidir le mortier entre deux passes

**finitions**

- chaque passe peut être lissée toute lissée, appliquer une passe de finition et épaisseur inférieure à 2 cm après durcissement des passes précédentes

# **Annexe 5 : Fiches techniques**


## **Tissus de Carbone**



## SikaWrap®-230 C/45

### Tissu de fibres de carbone pour renforcement de structures

Avis Technique CSTB N° 3/10-669

<b>Description</b>	Le SikaWrap®-230 C/45 est un tissu unidirectionnel de renforcement de structures, à base de fibres de carbone, applicable « à sec » (sans imprégnation préalable). 
<b>Utilisation</b>	<p>Renforcement de structures en béton armé, en maçonnerie et en bois, soumises à des contraintes de flexion, de cisaillement, de traction, de torsion :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Renforcement des poutres vis-à-vis de l'effort tranchant</li> <li>■ Augmentation de la résistance et de la ductilité par confinement de poteaux (section circulaire, carrée)</li> <li>■ Augmentation de la capacité portante (complément des aciers internes existants)</li> <li>■ Augmentation de la tenue des maçonneries vis-à-vis des efforts sismiques</li> <li>■ Renforcement suite à un changement de destination, réaménagement de locaux</li> <li>■ Réparation de dommages (chocs, incendies, corrosion aciers internes,...)</li> <li>■ Reprises des défauts des structures (problème de conception, de calcul,...)</li> <li>■ Mise en conformité suite à l'évolution de la réglementation (renforcement parasismique, nouveau code de calcul).</li> </ul>
<b>Caractéristiques / Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Facile à appliquer sur des surfaces planes ou courbes (poteaux, cheminées, dômes, silos ...)</li> <li>■ Multifonctions : renforcement vis-à-vis des efforts de flexion, de cisaillement, de traction, de torsion</li> <li>■ Insensible à la corrosion</li> <li>■ Epaisseur faible, même dans le cas d'application de plusieurs couches de tissu</li> <li>■ Légèreté extrême, permet un renforcement sans alourdir la structure</li> <li>■ Fibres de maintien latéral pour une meilleure stabilité du tissu</li> <li>■ Utilisation et application optimisées : tissu existe en 2 largeurs (30 et 60 cm)</li> </ul>
<b>Agréments, Essais, Normes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ France: Avis Technique CSTB N° 3/10-669 (annule et remplace N° 3/07-502)</li> <li>■ International: Fib, Technical Report, bulletin 14 -Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, July 2001</li> <li>■ USA: ACI 440.2R-08, Guide for the Design and construction of Externally Bonded FRP Systems for strengthening concrete structures, July 2008</li> <li>■ Royaume Uni: Concrete Society Technical Report No. 55, Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite material, 2000</li> <li>■ Italie: CNR-DT 200/2004 Guide for the design of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures.</li> </ul>
<b>Caractéristiques</b>	
<b>Aspect / Couleurs</b>	Tissu de fibres de carbone de couleur noire, à haute résistance.



<b>Constitution/Orientation des fibres du tissu</b>	Orientation des fibres : 0° (uni directionnelle, dans le sens de la longueur du tissu). 99% fil de chaîne, 1% fil de trame. Le tissu est muni de fils de trame spectraux, donnant une bonne stabilité dimensionnelle (heat-set process).							
<b>Conditionnement</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Longueur du rouleau</th> <th>Largeur du tissu</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Carton de 1 rouleau</td> <td>≥ 50 m</td> <td>300 / 500 mm</td> </tr> </tbody> </table> <p>Kit SikaCrackFix : contient 1 rouleau de SikaWrap®-230 C/45, de largeur 300 mm et de longueur 3,5 m, et un kit de 1 kg résine Sikadur®-330.</p>			Longueur du rouleau	Largeur du tissu	Carton de 1 rouleau	≥ 50 m	300 / 500 mm
	Longueur du rouleau	Largeur du tissu						
Carton de 1 rouleau	≥ 50 m	300 / 500 mm						
<b>Stockage / Conservation</b>	24 mois stocké en emballage d'origine intact et non ouvert à l'abri d'une exposition directe au soleil, au sec et à une température comprise entre +5°C et 35°C.							
<b>Caractéristiques techniques</b>								
<b>Grammage</b>	230 g/m <sup>2</sup> + 10 g/m <sup>2</sup>							
<b>Epaisseur du tissu</b>	0,13 mm							
<b>Densité des fibres</b>	1,76 g/cm <sup>3</sup>							
<b>Caractéristiques physiques et mécaniques</b>								
<b>Caractéristiques des fibres</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Résistance en traction : 4 300 MPa (nominale)</li> <li>■ Module d'élasticité en traction : 234 000 MPa (nominale)</li> <li>■ Elongation à rupture : 1,8 % (nominale)</li> </ul>							
<b>Caractéristiques du composite (tissu+ résine)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Epaisseur du composite testé : 1 mm (imprégné avec Sikadur®-330).</li> <li>■ Charge ultime : 350 kN / m de largeur.</li> <li>■ Module d'élasticité en traction : 25 kN / mm<sup>2</sup></li> </ul> <p>Ces valeurs sont des moyennes, données à titre indicatif à partir d'essais réalisés en laboratoire. Les caractéristiques obtenues lors des tests en traction dépendent du taux d'imprégnation des fibres par la résine, ainsi que de la procédure et des conditions d'essai.</p>							
<b>Paramètres de calcul</b>	<p>Dans l'avis technique CSTB, la valeur de l'allongement retenu pour le calcul est de 0,6%.</p> <p>Effort repris à 0,6% d'allongement par une couche de SikaWrap-230C/Sikadur-330</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 45 kN / pour une bande de largeur 30 cm</li> <li>■ 90 kN / pour une bande de largeur 60 cm</li> </ul>							
<b>Système</b>								
<b>Constitution du système</b>	<p>Le système (tissu + résine) ne doit subir aucune modification ni changement de constituant.</p> <p>Primaire et Résine d'imprégnation : Sikadur®-330. Tissu de renforcement structural : SikaWrap®-230 C/45. Pour obtenir des détails sur la résine, sur l'application du tissu, et sur d'autres informations générales, consulter la notice technique du Sikadur®-330.</p>							
<b>Application</b>								
<b>Consommation de résine</b>	<p>La consommation peut varier suivant la rugosité et la planéité du support.</p> <p>Imprégnation de la 1ère couche, y compris primaire : ~ 0,7 – 1,2 kg/m<sup>2</sup> (Sikadur®-330).</p> <p>Imprégnation des couches suivantes : ~ 0,5 kg/m<sup>2</sup> (Sikadur®-330).</p>							

<b>Qualité du support</b>	<p>La qualité du support doit être contrôlée dans tous les cas. Un diagnostic de l'ouvrage est recommandé (norme NF EN1504-9, Réparation des structures en béton).</p> <p>Support en béton : la résistance moyenne en traction directe de la surface de béton préalablement préparée doit être de 1 MPa au minimum ou conforme aux spécifications du dossier de consultation.</p>
<b>Préparation du support</b>	<p>Supports Béton et maçonnerie:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Le support doit recevoir une préparation de surface adaptée pour le rendre propre, sain, exempt de laitance, d'agents polluants, de graisse, d'huile, de particules friables, d'anciens revêtements, ...</li> <li>■ Le support ne doit pas être gelé, ni présenter de film d'eau en surface au moment de la mise en oeuvre de la colle.</li> <li>■ Ne pas réaliser d'opération de collage en cas de risque de condensation sur le support. Contrôle à faire préalablement au démarrage du mélange du kit de Sikadur®-330.</li> <li>■ Réparation et reprofilage : dans les cas où des défauts (béton carbonaté, faible enrobage des barres d'armature) doivent être réparés ou si un reprofilage est nécessaire, les systèmes suivants peuvent être utilisés : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Protection des armatures apparentes corrodées : Sika Monotop®- 610 AC,</li> <li>• Produits de réparation structurale : mortier de réparation à base de résine époxy Sikadur®-41F, Sikadur®-30, ou les mortiers hydrauliques de réparation Sika® Monotop®- 412 (application horizontale, verticale, sous face) ou Sika® Monotop®- 438 R (application horizontale par coulage).</li> </ul> </li> </ul> <p>Consulter les notices techniques des produits pour obtenir des détails sur l'application.</p>
<b>Conditions d'Application / Limites</b>	
<b>Température du support</b>	Consulter la notice technique du Sikadur®-330.
<b>Température ambiante</b>	Consulter la notice technique du Sikadur®-330.
<b>Humidité du support</b>	<p>Consulter la notice technique du Sikadur®-330.</p> <p>Béton : Max. 4%</p> <p>Quand le support est légèrement humide (sans film d'eau en surface), bien faire pénétrer la colle dans le support.</p>
<b>Condensation – point de rosée</b>	Consulter la notice technique du Sikadur®-330.
<b>Mise en oeuvre</b>	
<b>Mélange de la résine</b>	Consulter la notice technique du Sikadur®-330.
<b>Méthode d'application / outils</b>	<p>Le tissu peut être coupé au moyen de ciseaux spéciaux ou d'un couteau acéré. Ne pas plier le tissu.</p> <p>Consulter la notice technique du Sikadur®-330 pour les informations de mise en oeuvre du composite.</p>
<b>Nettoyage des outils</b>	Nettoyer le matériel avec le Nettoyant Sikadur® (notice technique n° 6.90) avant polymérisation de la résine. Une fois durcie, la résine s'enlève mécaniquement.
<b>Durée de vie en pot (Sikadur®-330)</b>	Consulter la notice technique du Sikadur®-330.
<b>Protection au feu de la structure</b>	<p>Dès lors que la structure est vérifiée conformément au principe de dimensionnement retenu dans l'avis technique validé par le CSTB, aucune protection au feu du système n'est à prévoir :</p> <p>« structure vérifiée à l'E.L.U. en situation de projet accidentel, sans le tissu de renfort SikaWrap®-230 C/45, en tenant compte uniquement des barres d'armatures internes ».</p>

<p><b>Notes sur l'application / limites</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>Dimensionnement des renforts</b> Il est conseillé de faire appel à un Bureau d'Etudes qualifié en calcul de structures pour réaliser le dimensionnement des renforts à base de tissu SikaWrap®-230 C/45. Nous consulter.</li> <li>■ <b>Qualification de l'entreprise spécialisée</b> Le Maître d'ouvrage, le Maître d'œuvre, doivent faire appel à une entreprise qualifiée pour la réalisation des travaux de réparation et de renforcement des structures. Pour le domaine du Génie Civil, faire référence à la nomenclature FNTP N°7 Travaux Spéciaux (N° Identification Professionnelle 721). L'entreprise retenue doit être expérimentée, assurée pour la réalisation de ces travaux spéciaux. Le personnel doit être spécialement formé à l'application des composites PRFC et des produits associés.</li> <li>■ <b>Plan Assurance Qualité sur chantier</b> L'entreprise doit mettre en place un plan d'auto contrôle: en particulier pour vérifier l'état du support et mesurer sa résistance à la traction superficielle, vérifier la non condensation sur le support, mesurer régulièrement la dureté shore D des mélanges de colle Sikadur®-330. Consulter également l'Avis Technique qui propose un exemple de fiche d'auto contrôle.</li> <li>■ <b>Le recouvrement des couches de tissu dans la direction longitudinale des fibres doit être au moins de 100 mm.</b></li> <li>■ <b>Lors des applications bords à bords du tissu (reprise effort tranchant de poutres) les lés de tissu sont juxtaposés et ne nécessitent pas de recouvrement.</b></li> <li>■ <b>Dans le cas de renforcement de poteau (par confinement), si plusieurs couches de tissu sont nécessaires, il y a lieu de répartir le recouvrement des couches uniformément sur le périmètre de la section du poteau.</b></li> <li>■ <b>Pendant l'application du système (SikaWrap®-230 C/45 - Sikadur®-330), la température du support doit rester au moins 3°C au-dessus du point de rosée. Veiller à vérifier noter cet élément dans le plan d'autocontrôle</b></li> <li>■ <b>Protection vis-à-vis des rayons directs solaires</b> Le système SikaWrap®-230 C/45 - Sikadur®-330 doit être protégé du rayonnement solaire direct permanent. Le revêtement de protection vis-à-vis des rayons UV est soit un produit à base de résine tel que Sikagard®-550 W Elastic, Sikagard®-680 S BetonColor, ou Sikagard®-675 W ElastoColor -Coloris disponible suivant nuancier RAL, soit un produit à base de liant hydraulique modifié (Sikatop®-121 ou 107). Nous consulter.</li> </ul>
<p><b>Note</b></p>	<p>Toutes les données techniques de cette notice sont basées sur des résultats d'essais de laboratoires. Les caractéristiques mesurées peuvent varier en fonction de circonstances indépendantes de notre contrôle.</p>
<p><b>Précautions d'emploi</b></p>	<p>Consulter la fiche de données de sécurité accessible sur Internet <a href="http://www.sika.fr">www.sika.fr</a>.</p>
<p><b>Mentions légales</b></p>	<p>Produit réservé à un usage strictement professionnel Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile. «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»</p>



Sika France S.A.  
84, rue Edouard Vaillant – BP 104  
93351 Le Bourget Cedex  
France

Tél. : 01 49 92 80 00  
Fax : 01 49 92 80 21  
[www.sika.fr](http://www.sika.fr)



# **Annexe 6 : Fiches techniques**

## **Plats de Carbone**

## Sika® CarboDur® Lamelles

Lamelles à base de fibres de carbone pour le renforcement de structures.

Avts Technique CSTB n° 3/07-502

<b>Description</b>	<p>Les Sika® CarboDur® Lamelles sont des P.R.F.C. pultrudés (Polymères Renforcés de Fibres de Carbone), à base de fibres de carbone noyées dans une matrice époxydique. Elles se présentent sous forme de lamelles préfabriquées en usine, et sont conçues pour le renforcement des structures en béton armé, en béton précontraint, en bois, en maçonnerie, en métal.</p> <p>Les lamelles sont collées in-situ avec la colle structurale Sikadur®-30.</p>
<b>Utilisation</b>	<p>Différents cas de renforcement de structures :</p> <p><b>Augmentation de charges</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Augmentation de la capacité portante des poutres, des dalles : augmentation des charges d'exploitation, trafic, changement de destination du local, ...</li> </ul> <p><b>Endommagement des éléments de structures</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Dégradation des matériaux de la structure</li> <li>■ Corrosion, diminution ou sectionnement d'armatures internes (chocs, incendie)</li> <li>■ Charges dynamiques, séismes</li> </ul> <p><b>Amélioration des conditions de service</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Réduction de flèche de planchers, poutres</li> <li>■ Réduction des contraintes dans les armatures internes</li> <li>■ Diminution de l'ouverture des fissures</li> </ul> <p><b>Modification de la structure</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Création de trémies (voile, dalle, poutre...)</li> <li>■ Elimination de murs, poteaux</li> </ul> <p><b>Mise en conformité suite à l'évolution de la réglementation</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Renforcement parasismique</li> <li>■ Nouveau code de calcul</li> </ul> <p><b>Défauts de conception, défauts de calcul</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Insuffisance ou déficience des sections d'acier interne</li> <li>■ Défaut de positionnement des armatures dans le béton</li> </ul>
<b>Caractéristiques / Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Insensible à la corrosion</li> <li>■ Très haute résistance</li> <li>■ Excellente durabilité</li> <li>■ Facile à transporter (légereté, présentation en rouleau)</li> <li>■ Longueur illimitée (rouleau de 10 à 250 mètres)</li> <li>■ Application économique (pas de matériel de levage, ni de serrage)</li> <li>■ Peut recevoir un revêtement (peinture, mortier...)</li> <li>■ Croisement aisé des lamelles grâce à la faible épaisseur</li> <li>■ Facilité d'application, en particulier en sous face</li> <li>■ Excellente tenue à la fatigue</li> <li>■ Facile à préparer, applicable en plusieurs couches superposées</li> <li>■ Résistance à l'environnement alcalin</li> <li>■ Plusieurs configurations possibles (modules d'élasticité/ résistance)</li> <li>■ Agréments officiels dans de nombreux pays</li> </ul>



<b>Agréments, Essais, Normes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ France: Avis Technique CSTB n° 3/07-502</li> <li>■ Allemagne: Deutsches Institut für Bautechnik Z-36.12-29, 2006 : General Construction Authorisation for Sika® CarboDur®</li> <li>■ Norvège: NBI Teknisk Godkjenning, NBI Technical Approval, No. 2178, 2001,</li> <li>■ Slovénie: ZAG, Technical Approval No. 5418/99-620-2,</li> <li>■ Slovaquie: TSUS, Building Testing and research Institutes, Technical approval No. 5502A/02/0633/0/004, 2003</li> <li>■ Pologne: Technical approval No. AT/2003-04-0336, System material Sika® CarboDur®</li> <li>■ International: Fib, Technical Report, bulletin 14 -Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, July 2001</li> <li>■ USA: ACI 440.2R-08, Guide for the Design and construction of Externally Bonded FRP Systems for strengthening concrete structures, July 2008</li> <li>■ Royaume Uni: Concrete Society Technical Report No. 55, Design guidance for strengthening concrete structures using fiber composite material, 2000</li> <li>■ Suisse: SIA 166, Klebebewehrungen, 2003 /2004</li> <li>■ Italie: CNR-DT 200/2004 Guide for the design of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures</li> </ul>
----------------------------------	--

### Caractéristiques

<b>Aspect / Couleurs</b>	PRFC (Polymère Renforcé de Fibres de Carbone – matrice résine époxy) de couleur noire.
--------------------------	--

<b>Conditionnement</b>	Suremballage carton pour les rouleaux de 10, 25, 50 m Suremballage en caisse en bois pour les rouleaux de 250 m
------------------------	--

<b>Types</b>	Sika® CarboDur® S *			Module Elasticité E 165 000 Mpa
	Type S	Largeur	Epaisseur	Section
	Sika® CarboDur® S1.525/60	15 mm	2,5 mm	37,5 mm <sup>2</sup>
	Sika® CarboDur® S2.025/80	20 mm	2,5 mm	50 mm <sup>2</sup>
	Sika® CarboDur® S512/80 *	50 mm	1,2 mm	60 mm <sup>2</sup>
	Sika® CarboDur® S613/100	60 mm	1,3 mm	78 mm <sup>2</sup>
	Sika® CarboDur® S812/120 *	80 mm	1,2 mm	96 mm <sup>2</sup>
	Sika® CarboDur® S912/140	90 mm	1,2 mm	108 mm <sup>2</sup>
	Sika® CarboDur® S1012/160 *	100 mm	1,2 mm	120 mm <sup>2</sup>
	Sika® CarboDur® S1014/180	100 mm	1,4 mm	140 mm <sup>2</sup>
	Sika® CarboDur® S1213/200	120 mm	1,3 mm	156 mm <sup>2</sup>
	Sika® CarboDur® S1214/220	120 mm	1,4 mm	168 mm <sup>2</sup>
	Sika® CarboDur® S1512/240 *	150 mm	1,2 mm	180 mm <sup>2</sup>

\* tenu en stock (rouleau de 10, 25, 50, 250 m)

Les Sika® CarboDur® Lamelles de type M et H sont disponibles sur commande. Nous consulter.

Sika® CarboDur® M		Module Elasticité E 210 000 MPa (équivalent acier)	
Type M	Largeur	Epaisseur	Section
Sika® CarboDur® M614/110	60 mm	1,4 mm	84 mm <sup>2</sup>
Sika® CarboDur® M914/170	90 mm	1,4 mm	126 mm <sup>2</sup>
Sika® CarboDur® M1014/190	100 mm	1,4 mm	140 mm <sup>2</sup>
Sika® CarboDur® M1214/230	120 mm	1,4 mm	168 mm <sup>2</sup>

(sur commande)

Sika® CarboDur® H		Module Elasticité E 300 000 Mpa	
Type	Largeur	Epaisseur	Section
Sika® CarboDur® H514/50	50 mm	1,4 mm	70 mm <sup>2</sup>

<b>Stockage / Conservation</b>	Illimité à l'abri d'une exposition directe au soleil, au sec et à une température inférieure à 50°C. Transport: uniquement en emballage d'origine ou protégé contre toutes dégradations mécaniques
--------------------------------	---

<b>Caractéristiques techniques</b>																												
Densité	1,60																											
Résistance à la température de la lamelle	> 150°C																											
Pourcentage volumétrique des fibres	> 68% (type S)																											
<b>Caractéristiques physiques et mécaniques</b>																												
Caractéristiques des lamelles	Sika® CarboDur® Lamelles																											
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Type S</th> <th>Type M</th> <th>Type H</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Module d'élasticité E * (valeur moyenne)</td> <td>165 000</td> <td>210 000</td> <td>300 000</td> </tr> <tr> <td>Module d'élasticité * (valeur minimum)</td> <td>&gt; 160 000</td> <td>&gt; 200 000</td> <td>&gt; 290 000</td> </tr> <tr> <td>Résistance en traction* (valeur moyenne)</td> <td>3 100</td> <td>3 2 00</td> <td>1 500</td> </tr> <tr> <td>Résistance en traction* (valeur minimum)</td> <td>&gt; 2 800</td> <td>&gt; 2 900</td> <td>&gt; 1 350</td> </tr> <tr> <td>Elongation à rupture * (valeur minimum)</td> <td>&gt; 1,70%</td> <td>&gt; 1,35%</td> <td>&gt; 0,45%</td> </tr> <tr> <td>Elongation de calcul **</td> <td>&lt; 0,85%</td> <td>&lt; 0,65%</td> <td>&lt; 0,25%</td> </tr> </tbody> </table>		Type S	Type M	Type H	Module d'élasticité E * (valeur moyenne)	165 000	210 000	300 000	Module d'élasticité * (valeur minimum)	> 160 000	> 200 000	> 290 000	Résistance en traction* (valeur moyenne)	3 100	3 2 00	1 500	Résistance en traction* (valeur minimum)	> 2 800	> 2 900	> 1 350	Elongation à rupture * (valeur minimum)	> 1,70%	> 1,35%	> 0,45%	Elongation de calcul **	< 0,85%	< 0,65%
	Type S	Type M	Type H																									
Module d'élasticité E * (valeur moyenne)	165 000	210 000	300 000																									
Module d'élasticité * (valeur minimum)	> 160 000	> 200 000	> 290 000																									
Résistance en traction* (valeur moyenne)	3 100	3 2 00	1 500																									
Résistance en traction* (valeur minimum)	> 2 800	> 2 900	> 1 350																									
Elongation à rupture * (valeur minimum)	> 1,70%	> 1,35%	> 0,45%																									
Elongation de calcul **	< 0,85%	< 0,65%	< 0,25%																									
* Valeurs obtenues dans le sens longitudinal des fibres																												
** Déformation maximale utilisable pour le calcul																												
<b>Système</b>	Sika® CarboDur® / Sikadur®-30																											
<b>Application</b>																												
Consommation de colle	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Largeur du Sika® CarboDur®</th> <th>Sikadur®-30 (sur support et lamelle)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50 mm</td> <td>= 0,35 kg/m</td> </tr> <tr> <td>80 mm</td> <td>= 0,55 kg/m</td> </tr> <tr> <td>100 mm</td> <td>= 0,80 kg/m</td> </tr> <tr> <td>150 mm</td> <td>= 1,20 kg/m</td> </tr> </tbody> </table> <p>La consommation peut varier suivant la rugosité et la planéité du support et les éventuels croisements de lamelles.</p>	Largeur du Sika® CarboDur®	Sikadur®-30 (sur support et lamelle)	50 mm	= 0,35 kg/m	80 mm	= 0,55 kg/m	100 mm	= 0,80 kg/m	150 mm	= 1,20 kg/m																	
Largeur du Sika® CarboDur®	Sikadur®-30 (sur support et lamelle)																											
50 mm	= 0,35 kg/m																											
80 mm	= 0,55 kg/m																											
100 mm	= 0,80 kg/m																											
150 mm	= 1,20 kg/m																											
<b>Qualité du support</b>	<p>Planéité / Irregularité du support (selon Bulletin FIB 14)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ La surface à renforcer ne doit pas présenter de bavures de coffrage ni saillies excédant 0,5 mm.</li> <li>■ Vérifier la planéité de la surface à l'aide d'une règle métallique : la tolérance est fixée à 10 mm sous la règle de 2 m, et 4 mm sous la règle de 30 cm.</li> </ul> <p>La qualité du support doit être contrôlée dans tous les cas. Un diagnostic de l'ouvrage est recommandé (norme EN 1504-9, Réparation et protection des structures en béton).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Support en béton : la résistance moyenne en traction directe de la surface de béton préalablement préparée doit être de 1,5 MPa au minimum. Si ces valeurs ne sont pas atteintes, se reporter à la notice technique du SikaWrap®-230 C/45 pour étudier des solutions alternatives. Le béton doit avoir 28 jours (sinon prendre en considération les conditions environnementales, et les résistances de ce dernier).</li> <li>■ La structure bois, maçonnerie, ou métallique doit également faire l'objet d'un diagnostic.</li> </ul>																											



**Préparation du support****Supports Béton et maçonnerie:**

- Le support doit recevoir une préparation de surface adaptée pour le rendre propre, sain, exempt de laitance, d'agents polluants, de graisse, d'huile, de particules friables, d'anciens revêtements, ...
- Le support ne doit pas être gelé, ni présenter de film d'eau en surface au moment de la mise en oeuvre de la colle.
- Ne pas réaliser d'opération de collage en cas de risque de condensation sur le support. Contrôle à faire préalablement au démarrage du mélange du kit de Sikadur®-30.
- Si la surface présente des défauts, procéder à un reprofilage avec le mortier de réparation Sikadur®-41F. Si cette dernière opération a été faite plus de 2 jours avant de coller les lamelles, il est nécessaire de poncer légèrement puis de nettoyer la surface pour assurer une adhérence efficace entre le Sikadur®-41F et le Sikadur®-30.
- Selon les cas, si les délais de durcissement et de séchage sont suffisants, la réparation du béton peut aussi être effectuée à l'aide d'un mortier hydraulique de réparation sélectionné dans les gammes SikaTop®, Sika® Monotop® ou Sikarep® (en fonction des niveaux d'adhérence et de résistance souhaités). Nous consulter.
- En cas de présence de fissures inertes, la maîtrise d'oeuvre peut décider de recréer le monolithisme de l'ouvrage par injection de ces fissures à l'aide de la résine époxydique Sikadur®-52 Injection.

**Support Bois :**

- Les surfaces doivent être préparées mécaniquement
- Traitement par sablage, rabotage ou ponçage.

A la suite des travaux préparatoires, les surfaces doivent être dépoussiérées au moyen d'un aspirateur industriel.

**Support Métallique :**

- Les surfaces doivent être sablées (degré de finition Sa 2.5) pour éliminer la graisse, l'huile, la corrosion, et autres contaminants....
- Utiliser le primaire Icosit-277 ou SikaGard®-63 en tant que protection anticorrosion temporaire, ou Icosit-EG1 en tant que protection anticorrosion permanente. Pendant cette opération, vérifier la condition de non apparition de condensation sur les surfaces préparées (conditions du point de rosée).

	+10°C	+20°C	+30°C
1) Temps d'attente maximum entre le sablage de l'acier et l'application du primaire / ou Sikadur®-30 colle. (l'application sans primaire est possible, si aucune protection anticorrosion n'est nécessaire).	48 heures	48 heures	48 heures
2) Temps d'attente minimum entre l'application du primaire et l'application de Sikadur®-30 colle (sans préparation supplémentaire du primaire)	48 heures	24 heures	12 heures
3) Temps d'attente maximum entre l'application du primaire et l'application de Sikadur®-30 colle (sans préparation supplémentaire du primaire)	7 jours	3 jours	36 heures
4) Temps d'attente entre l'application du primaire et l'application de Sikadur®-30 colle (avec préparation supplémentaire du primaire) *.	> 7 jours	> 3 jours	> 36 heures

\* Si une préparation supplémentaire du primaire est nécessaire (voir §4 du tableau ci-dessus), ceci doit être fait au plus tôt le jour précédent l'application. Après préparation du primaire, la surface doit être propre et sans poussière.

**Conditions d'Application / Limites**

**Température du support** Consulter la notice technique du Sikadur®-30.

**Température ambiante** Consulter la notice technique du Sikadur®-30.

<b>Humidité du support</b>	<p>Consulter la notice technique du Sikadur®-30.</p> <p>Béton : max. 4%</p> <p>Quand le support est légèrement humide (sans film d'eau en surface), bien faire pénétrer la colle dans le support.</p>
<b>Condensation – point de rosée</b>	Consulter la notice technique du Sikadur®-30.
<b>Mise en oeuvre</b>	
<b>Mélange</b>	Consulter la notice technique du Sikadur®-30.
<b>Méthode d'application / outils</b>	<p><b>Préparation des Sika® CarboDur® Lamelles :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Poser les Sika® CarboDur® Lamelles sur une surface plane et nettoyer le côté à coller (côté opposé à la face faisant l'objet du marquage du numéro de lot) au moyen d'un chiffon blanc imbibé de Nettoyant Sikadur®. Attendre que la surface soit sèche avant d'appliquer la résine Sikadur®-30. (10 minutes au minimum)</li> <li>■ Préparer le mélange de colle (voir notice technique du Sikadur®-30).</li> <li>■ A l'aide d'une spatule, tout en respectant le temps ouvert de la colle, appliquer le Sikadur®-30 en double encollage (sur les Sika® CarboDur® Lamelles et sur le support).</li> <li>■ Dans l'intervalle du temps limite d'assemblage, soit 50 minutes environ à 20 °C, positionner et plaquer manuellement la Sika® CarboDur® Lamelle encollée sur le support. Le pouvoir collant du Sikadur®-30 Colle permet de la maintenir sans dispositif d'étalement particulier.</li> <li>■ A l'aide du rouleau de marouflage, presser fortement sur toute la largeur de la lamelle jusqu'à ce que la colle refue par les deux côtés. Enlever les reflux de colle époxy à l'aide d'une spatule avant durcissement.</li> </ul> <p><b>Lamelles juxtaposées</b> Dans le cas de juxtaposition de deux ou plusieurs lamelles, prévoir un espace libre d'au moins 5 mm entre elles afin de permettre l'évacuation de l'excès de colle.</p> <p><b>Couches multiples</b> Si une ou deux lamelles supplémentaires doivent être collées sur la première, alors toutes les faces doivent être préalablement nettoyées au Nettoyant Sikadur immédiatement avant l'opération de collage.</p> <p><b>Croisements</b> En cas de croisement de lamelles, la première lamelle collée doit être dégraissée à l'aide du Nettoyant Sikadur® à l'endroit du croisement, préalablement au collage de la seconde lamelle.</p> <p><b>Protection</b> La surface de la lamelle peut recevoir un revêtement de protection à base de liant hydraulique (mortier de la gamme Sikatop®, Sika® Monotop®, Sikarep®), ou à base de résine Sikagard®-550 W Elastic, Sikagard®-680 S Betoncolor, ou Sikagard®-675 W Elastocolor. Nous consulter pour déterminer le produit le plus adapté au cas rencontré (délai de chantier, délai de recouvrement entre couches, protection complémentaire du béton support en environnement agressif,...).</p> <p><b>Plan Assurance Qualité sur chantier</b> L'entreprise doit mettre en place un plan d'auto contrôle: en particulier pour vérifier de l'état du support et mesurer sa résistance à la traction superficielle, vérifier la non condensation sur le support, mesurer régulièrement la dureté shore D des mélanges de colle Sikadur®-30. Consulter également l'Avis Technique qui propose un exemple de fiche d'auto contrôle.</p>
<b>Nettoyage des outils</b>	Nettoyer le matériel avec le Nettoyant Sikadur® (notice technique n° 6.90) avant polymérisation de la résine. Une fois durcie, la résine s'enlève mécaniquement.
<b>Durée de vie en pot (Sikadur®-30)</b>	Consulter la notice technique du Sikadur®-30.
<b>Protection au feu de la structure</b>	Dès lors que la structure est vérifiée conformément au principe de dimensionnement retenu dans l'avis technique valide par le CSTB, aucune protection au feu du système n'est à prévoir : « structure vérifiée à l'E.L.U. en situation de projet accidentel, sans les Sika® CarboDur® Lamelles, en tenant compte uniquement des aciers internes »

Notes sur l'application / limites	<p><b>Dimensionnement des renforts.</b> Il est conseillé de faire appel à un Bureau d'Etudes qualifié en calcul de structures pour réaliser le dimensionnement des renforts Sika® CarboDur® Lamelles. Nous consulter.</p> <p><b>Qualification de l'entreprise spécialisée</b> Le Maître d'ouvrage, le Maître d'œuvre, doivent faire appel à une entreprise spécialisée pour la réalisation des travaux de réparation et de renforcement des structures. Pour le domaine du Génie Civil, faire référence à la nomenclature FNTP N°7 Travaux Spéciaux (N° Identification Professionnelle 721). L'entreprise retenue doit être qualifiée, expérimentée, assurée pour la réalisation de ces travaux dits « spéciaux ». Le personnel doit être spécialement formé par le service technique Sika pour l'application des composites PRFC et des produits associés.</p> <p><b>Application des lamelles:</b> les lamelles doivent être appliquées durant le temps limite d'assemblage du Sikadur®-30.</p> <p><b>Précautions d'emploi.</b> Pendant la préparation, notamment pendant la phase de découpage des lamelles, ainsi que pendant l'application du système, veiller à se conformer aux fiches de données de sécurité (lamelle et résine associée) : porter les Equipements de Protection Individuelle : vêtement adapté, gants, lunettes, appareil respiratoire si nécessaire, ...</p> <p><b>Protection vis-à-vis des rayons directs solaires</b> Les lamelles, une fois mises en place, doivent être protégées du rayonnement solaire direct permanent. Le revêtement de protection vis-à-vis des rayons UV est soit un produit à base de résine (Sikagard®-550 W Elastic, Sikagard®-680 S Betoncolor, ou Sikagard® -675 W Elastocolor -Coloris disponible suivant nuancier RAL) soit un produit à base de liant hydraulique modifié (Sikatop®-121 ou 107).</p> <p><b>Température en service</b> <b>Sikadur®-30:</b> concernant la température de transition vitreuse (Tg), la température HDT (Heat Deflection Temperature), la température en service, voir la notice technique correspondante.</p> <p><b>Système Sika® CarboDur® (selon Avis technique CSTB):</b> la température maximum admise en service continu est fixée à +35°C et correspond à la température maximum à laquelle le Sikadur®-30 peut être soumis en permanence (service continu).</p> <p>Sur courte durée (maintien en température fixée à 24 h maximum), la température peut aller jusqu'à +45°C en pointe.</p> <p>Par ailleurs, des essais en laboratoire montrent que la protection de la lamelle notamment par le revêtement Sikagard®-680 S Betoncolor de couleur blanche permet de limiter la sensibilité du composite vis-à-vis de la température: réduction de 10°C environ de la température au niveau de la lamelle Sika® CarboDur® (comparativement à la lamelle non protégée).</p>
Note	Toutes les données techniques de cette notice sont basées sur des résultats d'essais de laboratoires. Les caractéristiques mesurées peuvent varier en fonction de circonstances indépendantes de notre contrôle.
Précautions d'emploi	Consulter la fiche de données de sécurité pour les précautions d'emploi.
Mentions légales	<p>Produit réservé à un usage strictement professionnel Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.</p> <p>«Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qu'il leur sera remise sur demande.»</p>



Sika El Djazair  
08 route de l'Arbaa, 18111 Eucalyptus  
Alger ALGERIE  
www.sika-eljazair.com

Tel: 213 (0) 21 50 21 84  
213 (0) 21 50 18 02 à 95  
Fax: 213 (0) 21 50 22 08  
Email: sika.commercial@dz.sika.com



## **Annexe 7 : Essais de glissement**

$\Delta L_1$	$\Delta L_2$	$\Delta L_1 - \Delta L_2$	$\gamma_{ad}(m/m)$	$\tau_{ad}[MPa]$
0	0	0	0	0
0,1	0,095	0,005	0,0025	0,0625
0,2	0,19	0,01	0,005	0,125
0,32	0,305	0,015	0,0075	0,1875
0,4	0,376	0,024	0,012	0,25
0,45	0,4	0,05	0,025	0,3125
0,6	0,495	0,105	0,0525	0,375

Résultats du test 1

## **Annexe 8 : Calcul aux éléments finis**

## I. Objectif :

Le but de cette partie est de valider le modèle «élément fini » réalisé avec le code Aster, en élasticité linéaire. Pour ce faire, deux modèles ont été réalisés, le premier avec le code\_aster en utilisant des éléments plaques 3D (DKT) et le second avec RDM6 en utilisant des éléments poutres 2D. Les modèles développés représentent une voûte soumise à un déplacement imposé depuis l'extrados en clé (essai d'écrasement de la voûte).

Une confrontation entre les deux modèles nous permettra d'en conclure sur la pertinence du modèle développé.

## II. Modélisation de la voûte à écraser

Le modèle représenté sur la figure ci-dessous est une voûte en 2D d'un rayon de 0.55 m. La voûte a une section rectangulaire 0.15 m x 1 m (figure 1).

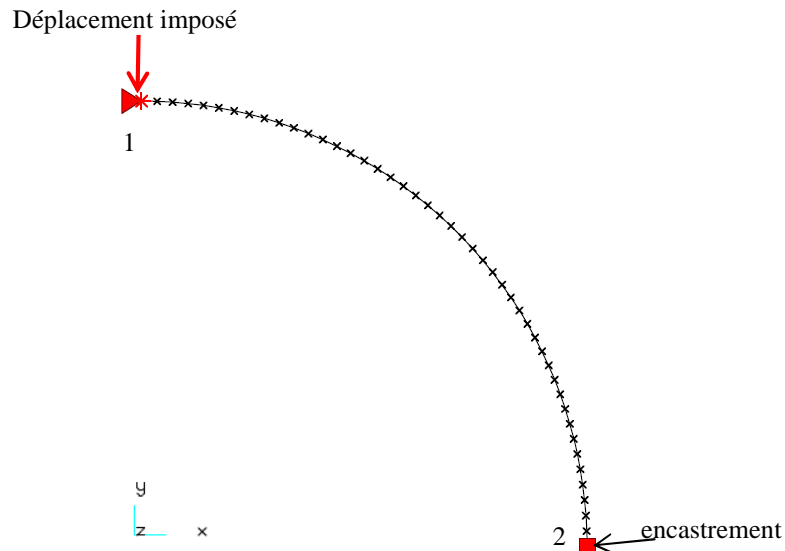


Figure 1 : Modèle d'une voûte en 2D « RDM6 »

### a. Conditions de limites :

Les conditions aux limites sont définies par le blocage au niveau du nœud 2 ( $DX=0$ ,  $DY=0$ ,  $RZ=0$ ). Un déplacement imposé de 1 mm sur le nœud 2 suivant y et bloqué suivant x ( $DX=0$ ).

Le coque représenté sur la figure ci-dessous a un rayon de 55 cm, une largeur de 1 m et une épaisseur de 0.15 m (figure 2).

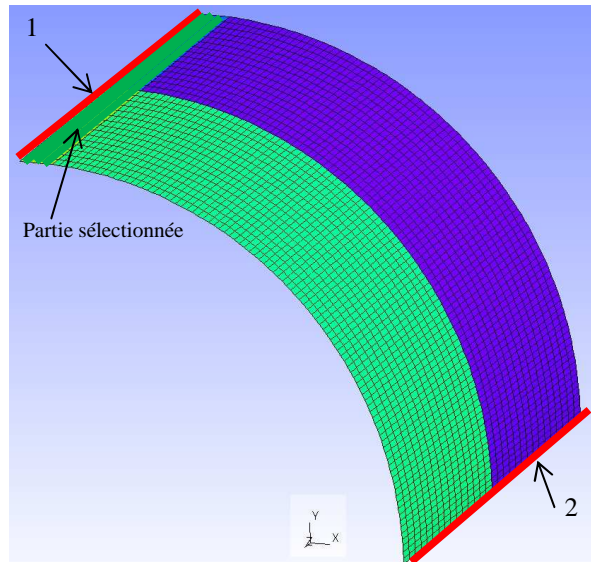


Figure 2: Modèle d'une voûte en 3D « code\_aster »

b. Conditions de limites :

Les conditions aux limites sont définies par le blocage au niveau de la ligne 2 ( $DX=DY=DZ=0$ ,  $DRX=DRY=DRZ=0$ ) et bloqué suivant ( $DX=DRY=DRZ=0$ ) au niveau de la ligne 1. Un déplacement imposé de 1 mm sur la partie sélectionnée suivant y ( $DY=1$  mm).

c. Loi de comportement de matériau :

La voûte est composée d'un matériaux : maçonnerie (bloc de meulière + mortier de liaison)

Caractéristiques	[MPa]
Module de Young	2500
Masse volumique	1800
Coefficient de Poisson	0.18

Tableau 1 : caractéristiques mécaniques de la maçonnerie

d. Chargement :

On applique un déplacement imposé en clé à l'extrados de 1 mm pour chaque modèle.

e. Maillage du coque :

Nous avons adopté un maillage quadrangulaire QUAD4 sur toute la surface du coque , 3067 nœuds ont été maillés (figure 2). Nous avons 2880 éléments QUAD4 découpées en 1 élément QUAD4 à 4 nœuds.

Nous présentons les résultats de la modélisation de la voûte en 2D « RDM6 » et d'un coque en 3D « code\_aster ».



### III. Confrontation entre les deux modèles

Le but de cette partie est comparer les deux modèles en termes du moment et d'effort tranchant. Nous présentons les digrammes des moments de la voûte en 2D « RDM6 » dans les figures 3 et 4.

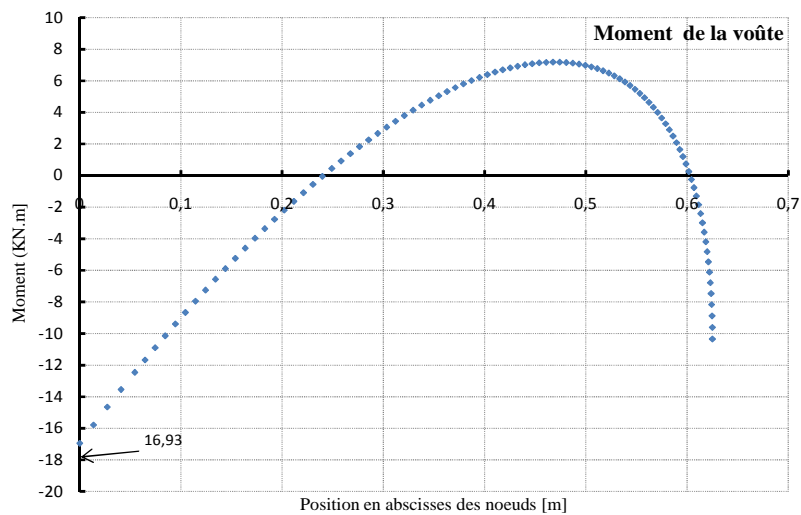
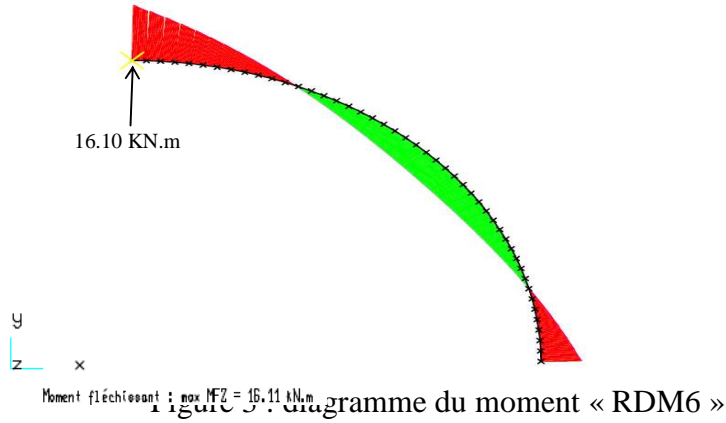


Figure 4 : diagramme du moment « code\_aster »

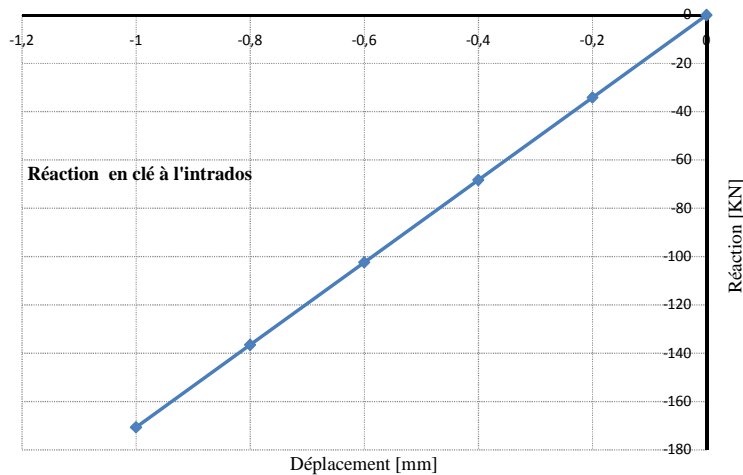


Figure 5 : diagramme de la réaction « code\_aster »

D'après les 2 diagrammes du moment, nous obtenons des valeurs similaires pour le moment ainsi pour la réaction, présentés dans le tableau ci-dessous.

	RDM6	code_aster
Moment (Mxx) (KN.m)	16,11	16,93
Réaction (KN)	175,70	170,70

Tableau 2 : confrontation « RDM6 »/« code-aster »

Après la confrontation entre les deux modèles, un écart de 5% pour le moment et 2% pour la réaction est obtenu.

Après avoir réalisé le modèle en 3D « code\_aster » en élasticité et comparer avec les résultats de RDM6 en termes du moment et de réaction. Nous avons obtenu des résultats semblables, d'où la validation du modèle élastique. Nous pourrions passer à la prochaine étape : création d'un modèle « parabole-rectangle ».

#### IV. Conclusion :

Après avoir modéliser les deux modèles « RDM6 », « code\_aster » et la validation de modèle « code\_aster » en élasticité linéaire, nous passerons à la prochaine étape : création le modèle «Parabole\_Rectangle». Nous précisons la critère de résistance d'une structure avec la courbe de convexe de stabilité.

## Tables des figures

### Chapitre 1

Fig. I- 1 : ovoïde en maçonnerie.....	13
Fig. I- 2: collecteurs d'assainissement en meulière.....	14
Fig. I- 3: défauts des pierres en présence d'infiltrations d'eau.....	20
Fig. I- 4 : déjointolement de maçonnerie.....	21
Fig. I- 5 : auscultation par radar géophysique .....	22
Fig. I- 6 : impédance mécanique .....	22
Fig. I- 7 : système Avari.....	23
Fig. I- 8: vérinage interne .....	23
Fig. I- 9 : mise en place des canules d'injections.....	24
Fig. I- 10: voie sèche et mouillé Fig. I- 11 : ouvrage renforcé par béton projeté [21] .....	25
Fig. I- 12 : principe de réhabilitation par coque complète et partielle.....	25
Fig. I- 13 : principe de calage de coques complètes avec étau vertical.....	26
Tableau I- 1: classification des chaux selon Durand-Claye. ....	17
Tableau I- 2 : résistance caractéristique à la compression simple des maçonneries (Recommandations Internationale pour les Structures en maçonnerie) [8].....	19

### Chapitre 2

Fig. II- 1: ouvrages renforcées par matériaux composites.....	30
Fig. II- 2: mise en œuvre de béton armé [2].....	31
Fig. II- 3 : fibre de verre [5] Fig. II- 4 : fibre de carbone [6] Fig. II- 5 : fibre d'aramide [7].....	32
Fig. II- 6 : mise en place des lamelles sur une poutre [9].....	34
Fig. II- 7: mise en place des lamelles sur une structure bois [9] .....	34
Fig. II- 8 : mise en place des lamelles sur un mur en briques [9].....	34
Fig. II- 9 : mise en place d'équerres de renforcement sur une poutre en Té [9].....	35
Fig. II- 10: mise en place de lamelles de carbone autour d'un poteau [9].....	35
Fig. II- 11: Essai de compression diagonale sur un mur en maçonnerie [11] .....	36
Fig. II- 12: ruptures des murs renforcés – Gabor [11].....	37
Fig. II- 13: essais de compression sur des murs renforcés par les matériaux composites.....	37
Fig. II- 14: essais de compression sur des murs renforcés par les matériaux composites.....	38
Fig. II- 15 : mode de rupture .....	39
Fig. II- 16: ligne de poussée pour le renforcement de l'extrados [16] .....	40
Fig. II- 17: schéma statique pour le renforcement à l'extrados.....	41
Fig. II- 18: ligne de poussée pour le renforcement à l'intrados.....	41
Fig. II- 19: schéma statique pour le renforcement à l'intrados.....	41
Fig. II- 20: voûtes en maçonnerie de briques .....	42
Fig. II- 21 : le glissement le long d'un joint de mortier .....	42
Fig. II- 22 : détachement des fibres.....	43
Fig. II- 23: essais sur voûtes renforcées non enduites .....	44
Fig. II- 24: rupture de la voûte renforcée à l'intrados .....	44
Fig. II- 25: diagrammes charge/déplacement d'une voûte renforcée à l'intrados .....	45
Fig. II- 26: arcs renforcés à l'intrados par les matériaux composites.....	45
Fig. II- 27: arcs renforcés à l'extrados par les matériaux composites .....	46

Fig. II- 28: essais sur des arches renforcés .....	46
Fig. II- 29: essais sur des coupoles renforcées .....	46
Fig. II- 30 : géométrie de l'arc    Fig. II- 31 : différents phases de la construction .....	47
Fig. II- 32: mode de ruine.....	48
Fig. II- 33: 3 types de renforcement    Fig. II- 34: application des feuilles de FRP .....	48
Fig. II- 35: mode de ruine.....	49
Fig. II- 36: mode de ruine.....	49
Fig. II- 37: application des fils pour les essais de CSI-3 et CSI-4.....	50
Fig. II- 38: mode de ruine.....	50
Fig. II- 39 : mode de rupture .....	51
Fig. II- 40: mode de la rupture.....	51
Fig. II- 41 : essais sur maçonnerie brique-mortier .....	52
Fig. II- 42 : a) essais et modélisation des briques et ; b) mortier de chaux. ....	53
Fig. II- 43 : chargement du pont, position du tandem sur l'ouvrage. ....	53
Fig. II- 44 : les fissures s'ouvrent dans les joints d'interface .....	53
Fig. II- 45: comparaison entre les essais réalisés par Sanchez et le modèle numérique réalisé par Stablon [29] .....	54
Fig. II- 46 : arcs en brique .....	54
Fig. II- 47 : comportement des arcs non renforcés.....	55
Fig. II- 48 : fissuration dans les joints du mortier .....	55
Fig. II- 49: courbe charge-déplacement pour les voûtes testées.....	56
Tableau II- 1 : comparaison entre les matériaux composites [8].....	33
Tableau II- 2: différents types de renforcement .....	47
Tableau II- 3: résultats des essais de différents types de renforcement.....	51

### Chapitre 3

Fig. III- 1: principe de fabrication .....	63
Fig. III- 2: principe de l'essai de flexion 3 points [1] (3) .....	63
Fig. III- 3 : principe de l'essai de compression (4).....	64
Fig. III- 4: colle de composition A    Fig. III- 5: colle de composition B.....	65
Fig. III- 6: dispositif expérimental des essais d'arrachement par traction directe.....	66
Fig. III- 7: principe de l'essai d'arrachement .....	66
Fig. III- 8 : principe de l'essai de fendage.....	67
Fig. III- 9: principe de l'essai de Module de Young .....	68
Fig. III- 10: mesure du retrait    Fig. III- 11: conservation des éprouvettes .....	69
Fig. III- 13: conservation des éprouvettes .....	71
Fig. III- 14: courbe de gonflement en fonction du temps.....	71
Fig. III- 15: essai sur éprouvettes cubiques .....	73
Fig. III- 16: rupture lors des essais d'arrachement par traction directe .....	74
Fig. III- 17 : dimensions de l'éprouvette .....	77
Fig. III- 18 : principe de l'essai .....	77
Fig. III- 19: diagramme contrainte-déformation .....	78
Fig. III- 20 : rupture dans les joints de mortier.....	79
Fig. III- 21: dimensions des corps d'épreuve [4] .....	80

Fig. III- 22: alignement des blocs à l'aide de gabarit [4] .....	80
Fig. III- 23: schéma de l'assemblage structure mortier fibré/composite [4] .....	81
Fig. III- 24: dimensions 140 x 140 x 250 mm <sup>3</sup> .....	81
Fig. III- 25 : collage de la première lamelle .....	82
Fig. III- 26: mise en place de l'ensemble sur la machine .....	82
Fig. III- 27 : Loi de comportement Charge-Déformation pour les essais réalisés.....	84
Fig. III- 28 : Loi de comportement Contrainte-Déformation pour les essais réalisés .....	84
Fig. III- 29: rupture du mortier      Fig. III- 30: rupture de la colle .....	86
Tableau III- 1: essais de flexion 3 points à 28 jours.....	64
Tableau III- 2: Essais de compression à 28 jours .....	65
Tableau III- 3 : caractéristiques des colles .....	65
Tableau III- 4: essais d'arrachement à 28 jours.....	66
Tableau III- 5 : essais en traction par fendage.....	67
Tableau III- 6 : résistance à la traction .....	68
Tableau III- 7: détermination du module de Young à 28 jours .....	69
Tableau III- 8 : résultats des essais de retrait ( $\Delta l/L$ ) en mm/m .....	70
Tableau III- 9: résultats des essais de gonflement ( $\Delta l/L$ ) en mm/m.....	72
Tableau III- 10 : caractéristiques mécaniques des mortiers fibrés .....	72
Tableau III- 11 : essais de compression sur éprouvettes cubiques .....	73
Tableau III- 12 : essais d'arrachement sur des éprouvettes cylindriques de meulière .....	74
Tableau III- 13 : modules d'élasticité de la meulière .....	74
Tableau III- 14 : caractéristiques mécaniques de la meulière .....	74
Tableau III- 15: quantité des matériaux.....	75
Tableau III- 16: caractéristiques mécaniques du mortier .....	75
Tableau III- 17 : caractéristiques mécaniques des lamelles et tissus de carbone .....	76
Tableau III- 18: caractéristiques des colles pour les plats de carbone.....	76
Tableau III- 19: caractéristiques des colles pour les tissus de carbone .....	76
Tableau III- 20: résultats des essais sur murets .....	78
Tableau III- 21 : Détermination des valeurs particulières des essais .....	85

## Chapitre 4

Fig. IV- 1 : diagramme des moments d'un ovoïde.....	93
Fig. IV- 2: mécanisme de ruine d'un ovoïde.....	93
Fig. IV- 3: principe de l'essai .....	95
Fig. IV- 4: caractéristiques géométriques d'une voûte.....	96
Fig. IV- 5: coffrage en bois      Fig. IV- 6: construction des voûtes .....	97
Fig. IV- 7: dispositif expérimental .....	97
Fig. IV- 8: voûte de la famille A      Fig. IV- 9: voûte de la famille B .....	98
Fig. IV- 10: comportement des voûtes non enduites .....	99
Fig. IV- 11: comportement des arcs non renforcés [7].....	100
Fig. IV- 12: variation de la charge en fonction de la flèche pour les voûtes non enduites B .....	100
Fig. IV- 13: fissuration dans les joints du mortier au niveau des reins à l'extrados et en clé .....	101
Fig. IV- 14: cartographie d'apparition des fissures pour la voûte non enduite A1 .....	101

Fig. IV- 15 : cartographie d'apparition des fissures pour la voûte non enduite A2 .....	102
Fig. IV- 16: cartographie d'apparition des fissures .....	102
Tableau IV- 1 : essais sur des voûtes.....	98
Tableau IV- 2: résultats des essais sur voûtes non enduites .....	98
Tableau IV- 3: résultats des essais sur voûtes non enduites .....	100

## Chapitre 5

---

Fig. V- 1 : caractéristiques géométriques des voûtes .....	106
Fig. V- 2: application de l'enduit .....	107
Fig. V- 3: conservation des voûtes .....	108
Fig. V- 4 : comportement des voûtes enduites par mortier fibré A .....	108
Fig. V- 5 : courbe charge/déformation enregistrée par les jauges pour la voûte A1 .....	110
Fig. V- 6 : comportement des voûtes enduites par mortier fibré B .....	111
Fig. V- 7 : courbe Charge/Déformation enregistrées par les jauges pour la voûte B1 .....	112
Fig. V- 8 : comportement des voûtes enduites par mortier fibré C .....	113
Fig. V- 9 : courbe Charge/Déformation enregistrées par les jauges pour la voûte C1 .....	114
Fig. V- 10 : comportement des voûtes enduites par mortier fibré D .....	115
Fig. V- 11 : courbe Charge/Déformation enregistrées par les jauges pour la voûte D1 .....	116
Fig. V- 12 : comportement des voûtes testées.....	118
Fig. V- 13 : cartographie d'apparition des fissures des voûtes enduites .....	119
Fig. V- 14 : fissuration en clé de voûte enduite à l'intrados.....	119
Fig. V- 15 : fissuration dans l'interface meulière/mortier au niveau des reins à l'extrados.....	119
Tableau V- 1: méthodes de renforcement en fonction des pathologies en maçonnerie .....	106
Tableau V- 2: caractéristiques mécaniques des mortiers fibrés .....	107
Tableau V- 3 : résultats des essais sur voûtes enduites A .....	109
Tableau V- 4: résultats des essais sur voûtes enduites B.....	112
Tableau V- 5: résultats des essais sur voûtes enduites C.....	114
Tableau V- 6: résultats des essais sur voûtes enduites D .....	116
Tableau V- 7: résultats des essais sur voûtes enduites par produit.....	117

## Chapitre 6

---

Fig. VI- 1: ouvrages en béton armé renforcées par matériaux composites .....	121
Fig. VI- 2: dispositif expérimental .....	122
Fig. VI- 3: courbe charge flèche pour les voûtes non enduite et enduite .....	122
Fig. VI- 4: application de la colle sur les plats      Fig. VI- 5: application de la colle sur le .....	123
Fig. VI- 6: voûte renforcée par plats .....	124
Fig. VI- 7: découpage des tissus      Fig. VI- 8: application de la colle et des tissus sur la voûte .....	124
Fig. VI- 9: voûte renforcée par des tissus de carbone .....	124
Fig. VI- 10: comportement des voûtes testées (plats de carbone) .....	125



## **Étude du comportement des voûtes en maçonnerie renforcées par matériaux composites – application aux ouvrages d’assainissement**

Les ouvrages d’assainissement en maçonnerie de meulière construits au 19<sup>ème</sup> siècle à Paris ont une forme ovoïdale et sont soumis à des sollicitations agressives qui ont largement augmenté depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle. Si la majorité de ces ouvrages continuent à fonctionner, leur état général se dégrade inexorablement. Comme la reconstruction n’est pas toujours possible pour des raisons de coût et d’impact social, la réhabilitation est la solution adoptée par de nombreux maîtres d’ouvrages. La thèse est une partie du projet RESAME qui a pour but de réduire les coûts de réhabilitation, d’améliorer la durabilité des réparations et de diminuer le temps d’intervention sur le site. L’objectif principal de la thèse est de mettre au point de nouvelles méthodes de restructuration plus économiques que les méthodes usuellement utilisées. Après avoir présenté les ouvrages d’assainissement et leurs types de dégradations. Les techniques d’auscultation et de réhabilitation sont données. Une synthèse bibliographique de l’application des matériaux composites sur des structures en maçonnerie est détaillée en première partie. Du fait de la géométrie et des matériaux, des voûtes ont été substitué aux ovoïdes pour nos essais présentés en seconde partie. Deux procédés ont été mis au point au cours de la thèse : un chemisage mince par mortier fibré de 3 cm et un renforcement par collage de matériaux composites (Lamelles et tissus). Vingt voûtes ont subi un chargement jusqu’à la rupture. Le but de l’ensemble des essais est de déterminer les mécanismes de ruine, les charges de la première fissuration et les charges à la rupture. Un gain important est alors constaté pour les méthodes de renforcement. Les résultats obtenus sont présentés et discutés.

Mots clés : ouvrages d’assainissement, maçonnerie, voûtes, réhabilitation, renforcement, mortier fibré, matériaux composites, béton projeté.

### **Behavior of masonry vaults reinforced by composites materials - Application for sewerage Systems**

In 19th century, Sewerage systems constructed in Paris were egg-shaped and made of masonry. Collectors are subjected to aggressive loads which have largely increased since the early 20th century. Even, if the majority of structures are still in service, their general condition deteriorates inexorably, and as the reconstruction is not always possible for reasons of cost and social impact, rehabilitation is the solution adopted by many clients. The thesis is a part of the project RESAME designed to reduce rehabilitation costs, improve the durability of repairs and reduce response times on the site. The main objective of this thesis is to develop new methods of restructuring. After introducing sewerage systems and their types of damage, auscultation techniques and rehabilitation will be presented. A bibliographical survey of the application of composite materials on planes and curved structures masonry is detailed in first time. Because of the complexity of geometry and materials, the vaults were substituted by the ovoid for our tests presented in the second half. Two methods are developed in this thesis: a thin layer of fiber reinforced mortar (FRM) by 3 cm and reinforcement by composite materials. Twenty vaults have been loading up to failure. The purpose of the tests is to determine the failure mechanisms, the first cracking loads and breaking loads. An important gain is then observed as well as a delay in cracking for every reinforcement method. The results are presented and discussed. These two processes will be applicable on several projects soon.

Key Words: sewerage systems, masonry, rehabilitation, reinforcement, vaults, fiber reinforced mortar, composites materials, shotcrete.