

**Résistance à la corrosion
des fibres métalliques amorphes**
-
**Application à la réparation des collecteurs
par béton projeté fibré**

par

Jérémy CATALOT

Ingénieur

SAINT-GOBAIN SEVA, Service Fibraflex

43, Rue du Pont de Fer

BP 176

71105 CHALON SUR SAONE FRANCE

Mondorf-les-Bains (Luxembourg)

30 mai 2006 - 2 Juin 2006_

CEECOR – GROUPE D

Corrosion dans les réseaux d'eaux usées

Résistance à la corrosion des fibres métalliques amorphes Application à la réparation des collecteurs par béton projeté fibré

Corrosion resistance of amorphous metallic fibres Use for repair of waste and rainwater sewers by fibre reinforced shotcrete

Jérémy CATALOT - Ingénieur – SAINT-GOBAIN SEVA, service FIBRAFLEX
43 rue du pont de fer, BP 176, 71105 Chalon sur Saône, France
Tél. : +33 3 85 47 25 88 - Fax : +33 3 85 47 25 99

Résumé

La réhabilitation des réseaux d'assainissement pose des problèmes de plus en plus cruciaux pour de nombreuses collectivités territoriales : importance et diversité des travaux à réaliser, coût et niveau de performances à respecter..., ainsi que des problématiques nouvelles, comme la sécurité des opérateurs, la limitation de la gêne occasionnée pour les usagers, le respect des normes environnementales,...

L'article suivant présente une technique de réhabilitation des collecteurs d'eaux visitables par projection de mortier renforcé de fibres métalliques amorphes.

Dans une première partie, l'article présente en détail les fibres, en particulier les résultats montrant leur très grande résistance à la corrosion. Dans une deuxième partie est développée la technique de projection de mortiers renforcés des fibres métalliques amorphes, en revenant à titre d'exemple sur chantier dont l'évolution au cours du temps a pu être suivie.

L'objectif est de tirer un bilan sur une technique en expansion constante depuis 1990, qui répond aux nouveaux enjeux de la réhabilitation des collecteurs visitables. En 2005, plus de 6000 m³ de mortiers renforcés de fibres métalliques amorphes ont été projetés.

Abstract

Rehabilitation of waste and rainwater sewers networks creates more and more crucial problems for many local authorities : importance and diversity of job sites, cost and level of performance to be reached..., as well as new problems like safety of operators, limitation of nuisances for neighbourhood, respect of environmental standards...

The following article presents a technique of rehabilitation of man-sized water collectors by spraying of mortar reinforced with amorphous metal fibre.

In a first part, the article presents the fibres in detail, in particular the results showing their high corrosion resistance. In a second part, the technique of spraying of mortars reinforced with amorphous metal fibres is developed, with an example of building site whose evolution in time has been followed.

The objective is to draw an assessment on a technique which expands regularly since 1990, and which answers the new stakes of the rehabilitation of man-sized collectors. In 2005, more than 6000 m³ of mortars were sprayed with amorphous metal fibres as reinforcement.

1. Introduction

Les réseaux d'assainissement, dont la construction remonte pour la plupart à près d'un siècle, sont aujourd'hui fragilisés : le chargement pour lequel ils avaient été dimensionnés a nettement augmenté, les attaques chimiques ont détérioré les matériaux... Suivant les dégradations constatées, les réhabilitations à envisager peuvent être très différentes dans leur conception, leur technique de mise en place, comme dans leur rôle.

Aujourd'hui, réhabiliter ces ouvrages visitables, maçonnés ou en béton, signifie fiabiliser un important patrimoine avec des techniques efficaces et des produits durables.

Dans cet article, nous nous intéressons aux cas des ouvrages nécessitant un chemisage structurant, qui sera réalisé par projection de bétons ou mortiers fibrés. Parmi les fibres utilisées, les fibres métalliques amorphes ont notamment une caractéristique très intéressante pour une utilisation en assainissement : la résistance à la corrosion.

2. Description des fibres métalliques amorphes

2.1. Procédé & caractéristiques générales

Les fibres métalliques amorphes ont été développées en 1985 par PONT-A-MOUSSON et sont industrialisées aujourd'hui par sa filiale SAINT-GOBAIN SEVA. Elles se présentent sous la forme d'un ruban étroit (1 à 1,6 mm de large), de longueur comprise entre 5 et 30 mm de long suivant l'utilisation.

Ce ruban est obtenu par trempe d'un jet de métal liquide sur une roue en rotation à grande vitesse (Figure 1).

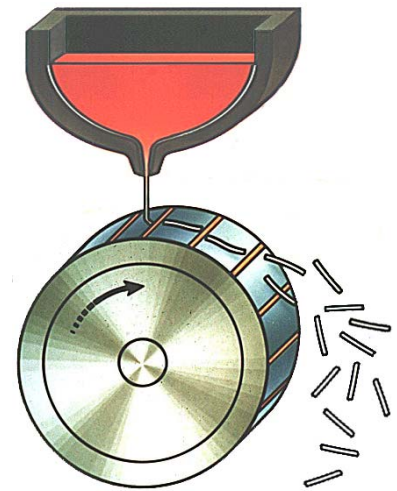


Figure 1. Schéma présentant le procédé d'obtention par hypertrempe des fibres métalliques amorphes

Cette technique permet d'obtenir des rubans extrêmement minces (24 à 29 microns) avec une vitesse de trempe élevée de l'ordre du million de degrés par seconde (Figures 2 et 3).

Ce refroidissement fige le métal liquide dans l'état amorphe (non cristallin), qui lui confère trois propriétés intéressantes :

- une résistance mécanique exceptionnelle : dans le cas des fibres métalliques amorphes, la résistance en traction est de l'ordre de 1700 MPa ;
- une souplesse dans le sens transversal : une fibre peut aisément se plier entre deux doigts ;
- une très grande résistance à la corrosion, point que nous allons développer.

Fibre métallique amorphe (Nom commercial : FIBRAFLEX)	
Composition	: $Fe_{75} Cr_5 P_8 C_{10} Si_2$
Largeur	: 1 ou 1,6 mm
Epaisseur	: 24 à 29 microns
Longueur	: 5 à 30 mm
Résistance mécanique	: ≈ 1700 MPa
Densité	: 7,2

Figure 2. Caractéristiques des fibres métalliques amorphes

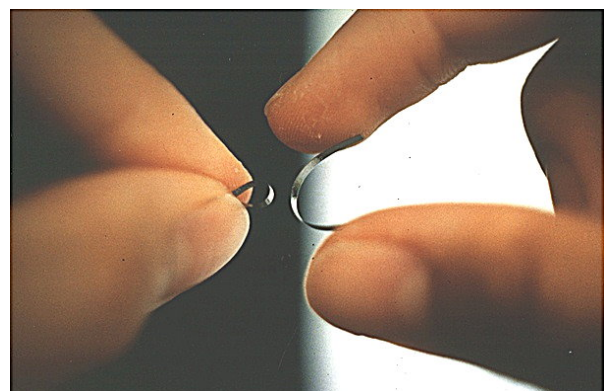


Figure 3. Photographie montrant une fibre métallique amorphe pliée entre deux doigts

2.2. Résistance intrinsèque à la corrosion des fibres métalliques amorphes

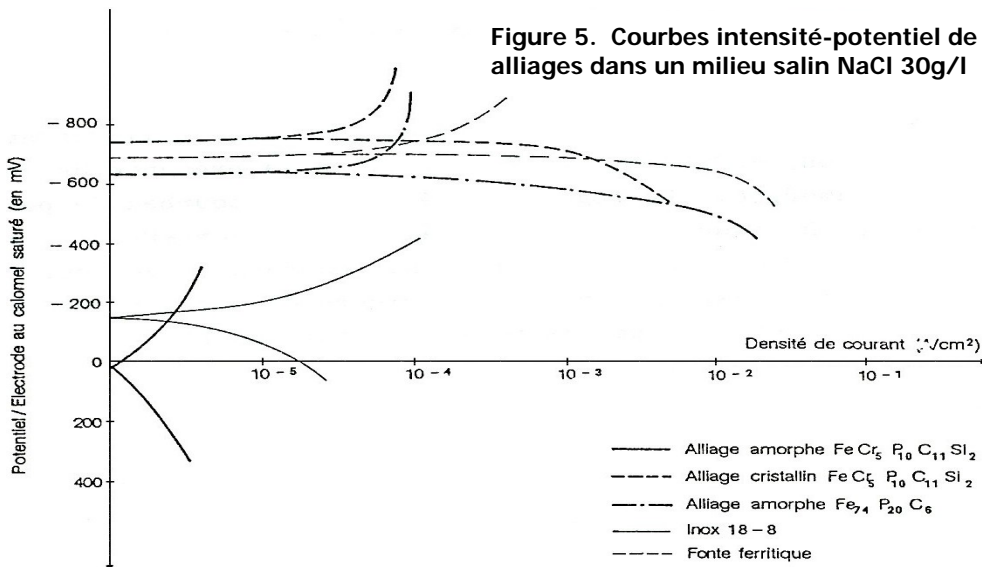
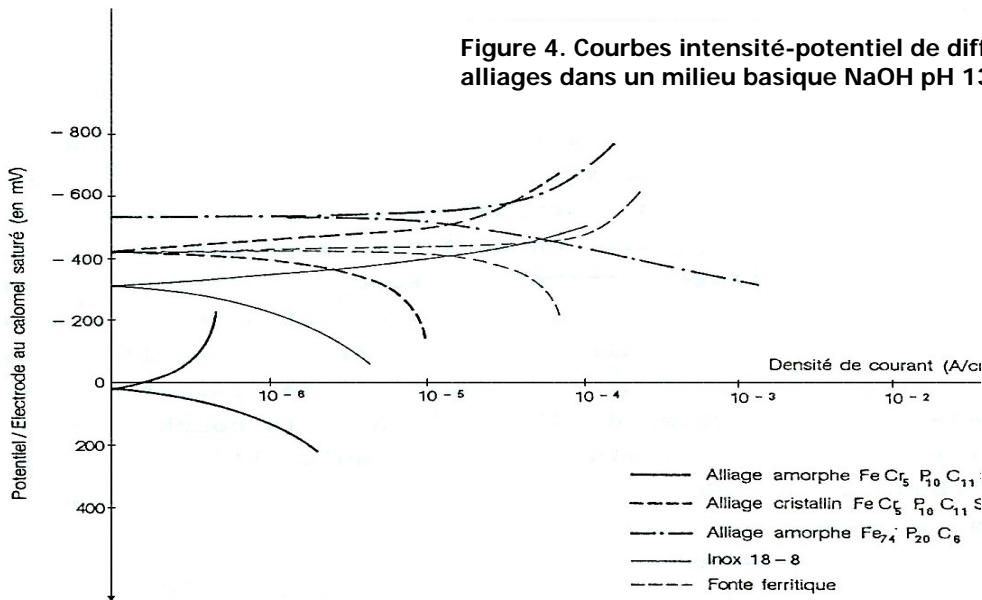
La résistance à la corrosion des matériaux métalliques est déterminée par la composition, la stabilité et l'uniformité de la couche passive qui se forme en surface de ces matériaux, ainsi que par la cinétique de formation de cette couche passive.

Dans le cas des matériaux amorphes, il a été montré que la couche passive se forme plus rapidement, et que, si l'alliage contient du chrome, celui-ci est présent en quantité importante à la surface du film, sous la forme d'oxyhydroxydes de chrome hydratés protecteurs.

Afin de valider ce point et de comparer avec d'autres matériaux, des essais d'intensité-potential (Figures 4 et 5) ont été réalisés dans deux milieux corrosifs : un bain d'eau salée (30g/L), et un milieu chlore (NaOH) au pH très élevé (pH 13). Les matériaux testés étaient les suivants :

- une fonte ferritique,
- un acier inoxydable 18-8,
- un alliage amorphe contenant 5 % de chrome (cas des fibres métalliques amorphes),
- un alliage amorphe sans chrome,
- un alliage cristallin contenant 5 % de chrome.

Seul l'alliage amorphe contenant 5 % de chrome présente un comportement meilleur que l'acier inoxydable, confirmant ainsi que ce sont les influences combinées du chrome et de l'état amorphe qui permettent d'avoir un bon comportement à la corrosion.



Voisin de ces essais, le comportement de la fibre métallique amorphe dans les matrices cimentaires a été testé (Figure 6) : la fibre a été plongée dans un lait de ciment (rapport eau/ciment = 80) à 80 % pendant plus d'un mois. Alors qu'une fibre de verre alcali-résistante voit sa résistance diminuer de moitié après seulement 5 jours, la résistance mécanique de la fibre métallique amorphe trempée est légèrement supérieure à celle de la fibre témoin.

Ce résultat confirme la passivation des fibres métalliques amorphes dans les milieux alcalins, se traduisant par un maintien, voire une augmentation des performances mécaniques.

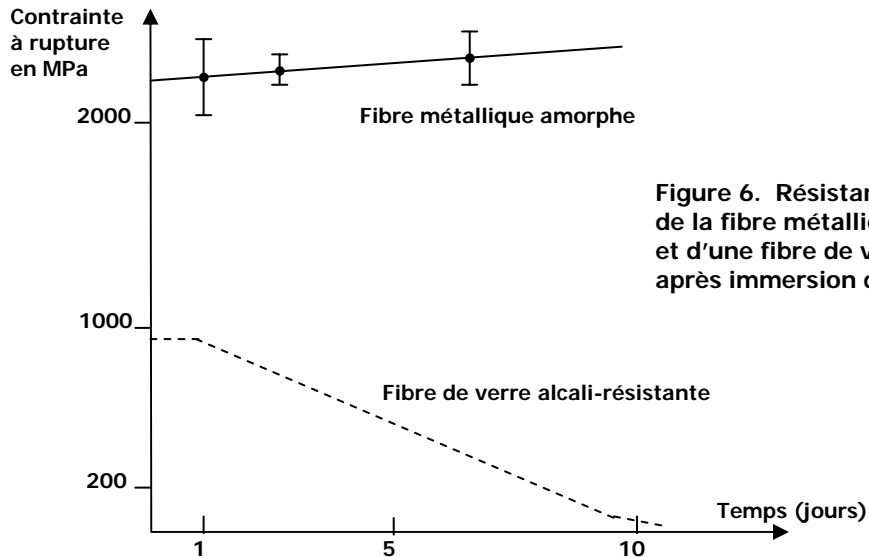
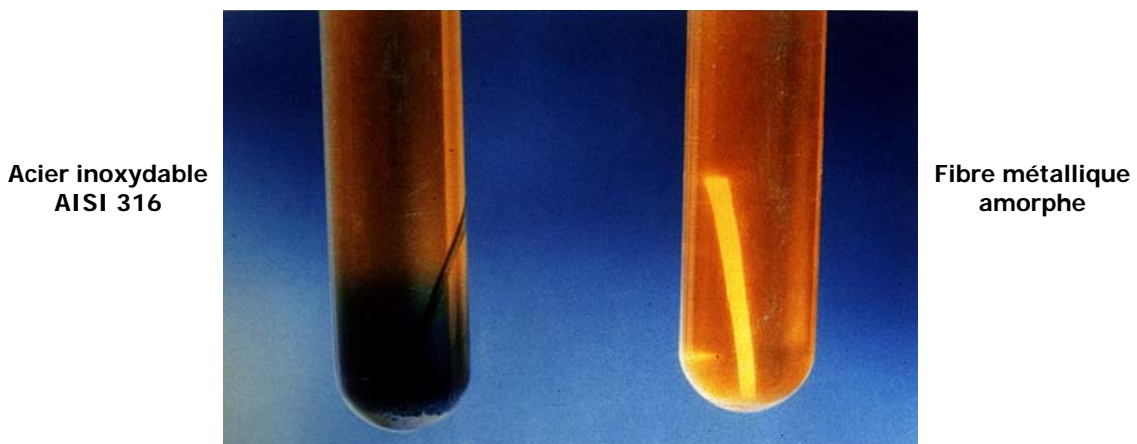


Figure 6. Résistance mécanique de la fibre métallique amorphe et d'une fibre de verre alcali-résistante après immersion dans un lait de ciment à 80°C

La résistance des fibres métalliques amorphes aux ions chlorures a également été testée, dans des solutions de HCl (0,1 N) et de FeCl₃ (0,4 N), pendant 24 h à 35 °C (norme ASTM G48-76-A) (Figure 7). La comparaison a été effectuée entre une fibre métallique amorphe et un fil en acier AISI 316 (Type Z6 CND 17-11 ou Z6 CND 17-12). A l'issue de l'essai, on observe que la solution contenant l'acier inoxydable prend une teinte verdâtre. Ce changement de coloration traduit une réaction chimique, en l'occurrence la transformation des ions ferriques Fe³⁺ en ions ferreux Fe²⁺. L'observation du fil inox, à l'œil nu et au microscope, montre la présence d'une piqûration importante, et une pesée montre une perte en poids de 26 %. Dans le cas de la fibre métallique amorphe, on n'observe ni coloration du milieu, ni piqûration de la fibre, ni perte en poids.

Figure 7. Essais de corrosion en milieu FeCl₃ 6 % - Aspect des échantillons après 24 heures à 35° C



De par leur composition chimique et leur procédé d'obtention, les fibres métalliques amorphes montrent une résistance à la corrosion meilleure que celle des aciers inoxydables.

2.3. Résistance à la corrosion de matrices cimentaires fibrées

Pour étudier le vieillissement de matrices cimentaires en différentes ambiances, des plaques de mortiers renforcés de fibres métalliques amorphes ont été placées sous eau chaude à 50°C pendant 84 jours. Aucune altération de la résistance à la flexion du composite n'a été constatée : 17 MPa à J-0, 18 MPa à J-84.

Ensuite, des éprouvettes prismatiques (4 x 4 x 16 cm) composées d'une pâte pure de ciment (E/C = 0.3) renforcée de 2.8 % en poids de fibres métalliques amorphes ont été immergées verticalement jusqu'à mi-hauteur dans une solution saline à 50°C (58 g/l de NaCl et 5 g/l de MgSO₄, soit le double de la concentration de l'eau de mer). L'essai a été poursuivi pendant 18 mois avec un contrôle régulier des propriétés mécaniques des éprouvettes (**Figure 10**).

Dans le cas des échantillons non fibrés, la résistance à la flexion augmente dans un premier temps grâce à l'action de l'eau chaude (traitement de cure). En revanche, après un an, la résistance se dégrade, alors que les échantillons renforcés de fibres métalliques amorphes voient leur résistance augmenter. Aucune trace de rouille n'est observée sur les fibres métalliques amorphes alors que sur des éprouvettes contenant des fibres d'acier, immergées dans les mêmes conditions, on observe des traces importantes de rouille.

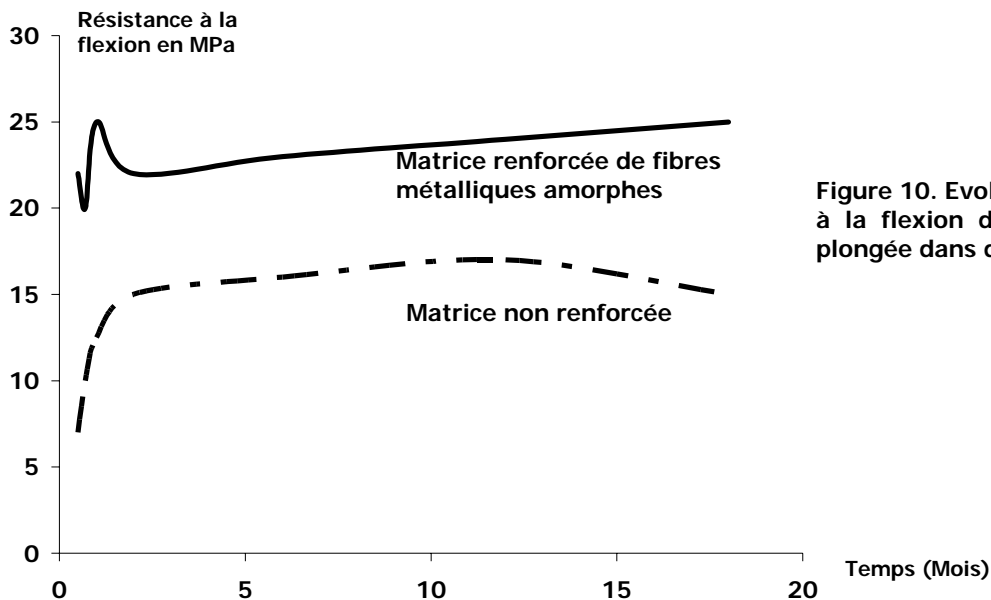


Figure 10. Evolution de la résistance à la flexion d'une pâte de ciment plongée dans de l'eau de mer

2.4. Conclusion sur l'utilisation des fibres

La résistance à la corrosion des fibres métalliques amorphes est remarquable : leur passivation dans les milieux agressifs permet une grande durabilité du renforcement dans le temps.

Depuis leur invention, ces fibres ont naturellement trouvé des applications dans le renforcement des bétons et mortiers soumis à des agressions corrosives, comme :

- des bétons de parement, où aucune trace de rouille ne peut être tolérée ;
- Des bétons de préfabrication aux spécifications nucléaires. Les bétons renforcés de ce type de fibres sont garantis 300 ans par les autorités nucléaires françaises ;
- des mortiers de scellement soumis aux sels de déverglaçage. Outre la durabilité de renforcement, les fibres permettent de limiter les effets néfastes dus à la fatigue ;
- des mortiers de réparation soumis aux effluents : nous allons détailler en § 3 cette dernière application.

3. Réhabilitation par béton projeté renforcé de fibres métalliques amorphes

3.1. Principe général

Pour réparer un réseau d'assainissement, différentes techniques coexistent. Une technique bien maîtrisée aujourd'hui consiste à projeter un mortier sur le support afin de le renforcer structurellement.

La « structure » est apportée par un treillis soudé métallique ou par des fibres métalliques mélangées au mortier. Les fibres métalliques amorphes sont utilisées depuis 20 ans dans cette application.

Il a notamment déjà été démontré à de nombreuses reprises que les mortiers renforcés de ce type de fibres utilisés en réhabilitation offraient une technique très intéressante, tant au niveau de la mise en place qu'au niveau des résultats "expérimentaux".

3.2. Apport mécanique

La **Figure 11** présente l'évolution de plusieurs paramètres mécaniques d'un mortier à projeter renforcé en différents dosages de fibres métalliques amorphes (composition **Figure 12**).

Figure 11.
Essais sur mortier
projection voie sèche

	Témoïn	Dosage en kg/m ³ Fibres métalliques amorphes 30 mm long				
		5	10	20	30	40
Fendage en Mpa sur carottes diam 50 mm	5,3	6,1	6,8	6,7	6,4	6,5
Résistance à la compression en Mpa Eprouvettes 4 x 4 x 16 cm	40	47	51	46	46	52
Flexion 3 points en Mpa Eprouvettes 4 x 4 x 16 cm	6,5	6,6	8,5	7,8	7,3	8,5

Figure 12.
Composition du mortier

Composant	Dosage en kg/m ³
Ciment	350
Gravillon 5/10	650
Sable 0/5	1100
Filler 0/0,6	50

Ces résultats montrent que l'apport des fibres métalliques amorphes est perceptible à partir de 10 kg/m³ (30 % de gain en résistance à la flexion). A dosage plus élevé, les performances stagnent, confirmant l'existence d'un dosage sur-critique (couramment observé vers 25 kg/m³).

Les essais laboratoire sur ce mortier ont été complétés par des essais « grandeur nature » en liaison directe avec la problématique de réparation des réseaux d'assainissement.

Ces essais consistent à projeter un chemisage en béton renforcé de fibres sur un ovoïde standard préalablement affaibli par une entaille au piedroit. L'ovoïde est ensuite écrasé à l'aide d'un vérin creux et d'un câble de précontrainte (**Figure 13**).

Les résultats de ces essais montrent qu'un chemisage fibré (**Figure 14**) permet de ramener l'ouvrage dégradé à des performances supérieures à celles qu'il avait à l'origine, même à dosage réduit (15 kg/m³). Au-delà de 30 kg/m³, le renforcement est équivalent à celui apporté par un treillis soudé classiquement utilisé dans ce type de réparation, quelle que soit la méthode de projection retenue.

Figure 13. Schéma de montage des essais sur ovoïdes entaillés

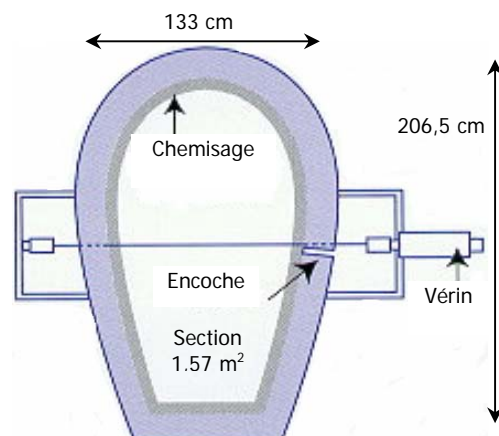


Figure 14. Résultats des essais d'écrasement d'ovoides

		Charge à la fissuration en kN	Charge à la rupture en kN
	Témoin neuf	82	120
	Témoin scié	64	85
VOIE SECHE	Chemisage seul (3 cm)	58 (-9%)	111 (+31%)
	Treillis soudé P400 (2,275 kg/m ²)	134 (+109%)	163 (+92%)
	Fibres métalliques amorphes 15 kg/m³	99 (+55%)	163 (+92%)
	Fibres métalliques amorphes 30 kg/m³	134 (+109%)	192 (+126%)
	Fibres à crochets 50 kg/m ³		170 (+100%)
VOIE MOUILLEE (*)	Fibres métalliques amorphes 35 kg/m³		174 (+105%)
	Fibres à crochets 50 kg/m ³		170 (+100%)

Chemisages fibrés : 7 cm
 (*) résultats extrapolés d'une seconde campagne

Entre () : comparaisons avec le témoin scié

Ces essais ont notamment permis l'élaboration de mortiers en sacs pré-fibrés à 20 kg/m³ qui servent encore à réparer –en projection voie mouillée– les égouts de Milan et de Rome (30 000 m³ projetés depuis 1995).

3.3. Recul sur la durabilité

Une inspection d'un des premiers ouvrages réhabilités en mortier projeté renforcé de fibres métalliques amorphes –le collecteur "Croix de Bourgogne" à Nancy– a été menée après 10 ans de service. L'intérêt de suivre cet ouvrage est double :

- Le collecteur réhabilité offre des conditions difficiles : il est situé dans une zone de terrain instable constamment gorgée d'eau, offrant de mauvaises butées aux piédroits, ce qui avait entraîné des aplatissements de voûte. Avant sa rénovation, ce collecteur était très dégradé et déformé.

- Différentes techniques de réhabilitation avaient été testées à l'époque (1986). Outre les fibres métalliques amorphes, plusieurs tranches avaient été réhabilitées au moyen d'un mortier renforcé de fibres à crochets rigides, non résistantes à la corrosion.

La technique retenue fut la projection par "voie sèche" d'un mortier fin en deux passes recouvertes d'un enduit de finition non fibré mis en œuvre manuellement.

Les principaux résultats de l'inspection visuelle et des essais menés sur les carottages sont présentés dans le tableau suivant (Figure 15).

Figure 15. Conclusions des investigations sur ouvrage réhabilité avec les fibres métalliques amorphes

Etat des fibres recueillies	La couche de finition ayant disparu à plusieurs endroits, des fibres métalliques amorphes ont pu être recueillies en parement. Elles sont restées brillantes, flexibles et parfaitement élastiques, ce qui montre une excellente résistance à la fatigue et à la corrosion.
Aspect du chemisage	Pour la partie réhabilitée avec les fibres métalliques amorphes, l'imperméabilité du chemisage ainsi que son intégrité n'ont fait aucun doute.
Auscultation acoustique au marteau	L'auscultation acoustique au marteau n'a révélé aucune zone de décollement de l'enduit de finition ou de rupture adhésive entre les deux couches de béton projeté fibré.
Fissures	Sur plus de 150 mètres visités, une ou deux courtes fissures transversales, sans ouverture mesurable, traduisant très certainement des légers tassements différentiels.
Essais sclérométriques	Bonne résistance du mortier renforcé de fibres métalliques amorphes, qui sera confirmée par les essais. Bonne adhérence de l'enduit.

Carottages Huit sondages prolongés jusqu'au terrain encaissant ont été réalisés à différents endroits de la section visitée. Les huit carottes de 5 cm de diamètre obtenues ont été testées en laboratoire.	
Résistance à la compression	43 MPa sur trois éprouvettes, résistance tout à fait convenable.
Carbonatation	5 mm sur les huit évaluations : la carbonatation est limitée à la couche d'enduit et n'atteint jamais le béton projeté.
Porosité	14 % à 105 °C (moyenne 4 résultats).
Densité	Densité apparente (20°C) : 2300 kg/m ³ Densité apparente (105°C) : 2150 kg/m ³ Densité réelle : 2550 kg/m ³
Observations MEB du mortier	L'analyse minéralogique des interfaces pâte de ciment-granulat ainsi que pâte de ciment-fibre, a montré leur bonne compacité et leur faible cristallisation. Aucune de ces analyses n'a permis de trouver des phases anormales et dangereuses comme des gels d'alcali-réactions ou des aiguilles d'ettringite secondaire.
Observations MEB des fibres	L'examen de la surface des fibres a montré leur excellente adhérence à la matrice. Aucune corrosion n'a été décelée, que ce soit pour les fibres proches de la surface ou pour celles situées plus en profondeur.

A ce jour, soit 20 ans après la réhabilitation, la tranche réhabilitée avec les fibres métalliques amorphes n'a pas fait l'objet de travaux de remise à niveau, les visites régulières ne montrant aucune dégradation ou fissuration importante. Même si la tranche réhabilitée avec les fibres métalliques à crochets n'a pas fait l'objet d'investigations aussi poussées, on peut relever que les fibres métalliques à crochets recueillies étaient très fortement piquées et se désagrégeaient sous les doigts, et que plusieurs décollements et fissurations avaient été relevés après 10 ans.

Ces observations confirmeraient l'intérêt d'utiliser des fibres résistantes à la corrosion dans les travaux de chemisage. Néanmoins, la carbonatation sur les carottes semble limitée à la surface, et la seule résistance à la corrosion ne peut pas tout expliquer : la durabilité d'un chemisage dépend en grande partie de la qualité de projection.

Sur ce point, les fibres métalliques amorphes - flexibles - présentent un réel intérêt, du fait de leur non-dangerosité au rebond. Ainsi, dans un collecteur étroit, le porte-lance peut se placer à la distance adéquate au support sans risquer d'être blessé par les fibres, et soigner son travail. Ce n'est pas le cas des fibres à crochets rigides, délicates à projeter, et provoquant de fréquents bourrages (en voie mouillée, leur usage devient même dangereux pour l'opérateur en cas d'explosion du tuyau d'acheminement du mortier).

Ces paramètres, bien qu'indirects, influent sur la qualité de réalisation de la réparation et donc sur sa durabilité.

4. Conclusion générale

La résistance à la corrosion des fibres métalliques amorphes participe à une plus grande durabilité des matrices cimentaires. Ce point a été prouvé autant en laboratoire qu'au travers d'ouvrages réhabilités, dont on a désormais un recul sur la durabilité.

Ce type de fibre est un matériau de base de choix pour la réhabilitation d'ouvrages soumis à des ambiances agressives. Dans le cas de la réhabilitation en assainissement, elles montrent aussi d'autres avantages liés à l'environnement et aux règles d'hygiène et de sécurité, notions de plus en plus importantes prises en compte autant par les maîtres d'ouvrages que les maîtres d'oeuvre.