

CHAPITRE II ————— APPROCHES METHODOLOGIQUES DANS L'ETUDE EXPERIMENTALE DES COULIS D'INJECTION

II.1 INTRODUCTION

Le problème d'injection de coulis hydrauliques pour la réparation et le renforcement des maçonneries anciennes a été relevé par de nombreux praticiens, et a fait l'objet de divers travaux de recherche. Les premières études systématiques réalisées étaient mises à l'actif du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Paris, France). La Commission des Communautés Européennes (Direction Générale XII chargée des sciences, de la recherche et du développement) a apporté son soutien à une recherche en coopération européenne dans le cadre du programme « Science » Le LCPC, l'Université Nationale Technique d'Athènes, l'Ecole Polytechnique de Milan et le Centre de recherche de l'Enel (Italie) étaient ainsi associés dans une recherche sur « la réparation et la restauration des monuments historiques et des ouvrages d'art par injection de coulis »

II.2 L'ETUDE DES COULIS D'INJECTION PAR ANDRONIKI. E. MILTIADOU [1990]

Cette étude a été motivée par le contraste entre les lacunes constatées et les atouts potentiels des coulis hydrauliques pour des fins de réparation et renforcement des structures et des monuments historiques en maçonnerie.

II.2.1 Présentation

L'étude de Miltiadou s'est articulée autour de trois thèmes principaux. Elle a cherché dans un premier temps à résoudre le problème posé par le phénomène d'essorage. Pour localiser de manière précise l'origine de ces difficultés ; elle a tout d'abord déterminé les relations pouvant exister entre les caractéristiques granulométriques de la phase solide d'un coulis et ses propriétés d'injectabilité. Sur la base de ces résultats, elle montre ensuite comment, à partir d'un ciment courant, il est possible d'obtenir des coulis stables et parfaitement injectables dans de fines fissures (de l'ordre de 0,2 mm) grâce à une addition d'éléments ultra-fins associée à l'emploi de superplastifiants.

Si la qualité d'une réparation est conditionnée par les propriétés d'injectabilité du coulis utilisé, elle dépend également de manière essentielle de ses propriétés mécaniques et de ses propriétés d'adhérence sur le matériau support. L'évaluation de ces caractéristiques et l'analyse du rôle des principaux paramètres constituent le deuxième thème de cette recherche.

Pour évaluer l'efficacité des coulis proposés, elle a reconstitué en laboratoire un mortier et trois remplissages dont les caractéristiques se rapprochent de celles des composants de murs anciens. Le rôle mécanique du coulis sur ces éléments de structure a été apprécié en comparant les propriétés mécaniques obtenues avant et après injection (troisième partie)

II.2.2 Conduite de la recherche

L'étude préliminaire a porté sur dix sept ciments commerciaux couvrant une large gamme de granularité. Le tableau 1 (en annexe) donne les caractéristiques physiques et chimiques de ces ciments. Leurs courbes granulaires s'insèrent dans le fuseau présenté par la figure 2.1.

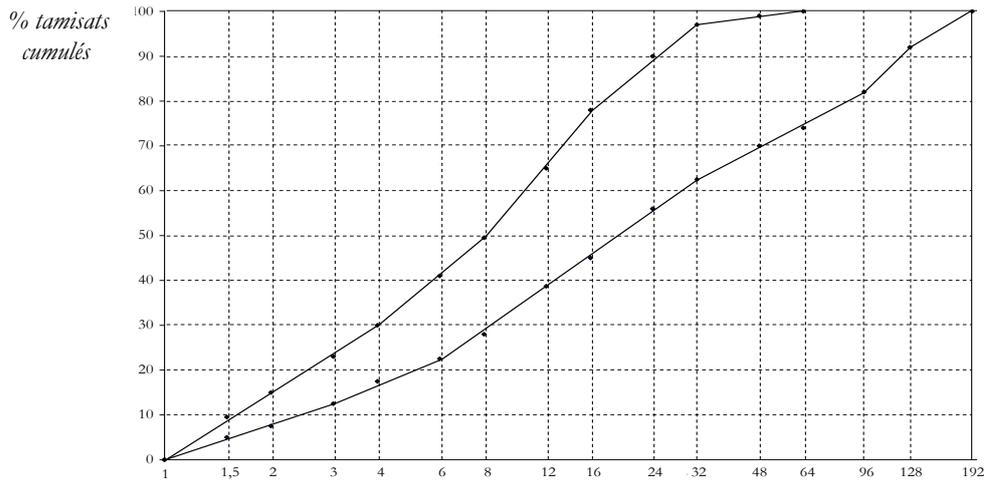


Figure 2.1 : Fuseau granulaire déterminé au granulomètre à laser.

Dans l'étude de la modification de la courbe granulaire du ciment, par des éléments ultra-fins, trois additions ont été étudiées : une fumée de silice densifiée (FSD), une pouzzolane naturelle, la terre de Santorin finement broyée et une chaux éteinte choisie pour sa surface spécifique de 1,05 m²/g. Le tableau 2 (annexe) donne les principales caractéristiques de ces produits.

La figure 2.2 présente les courbes granulaires des trois ultra fines.

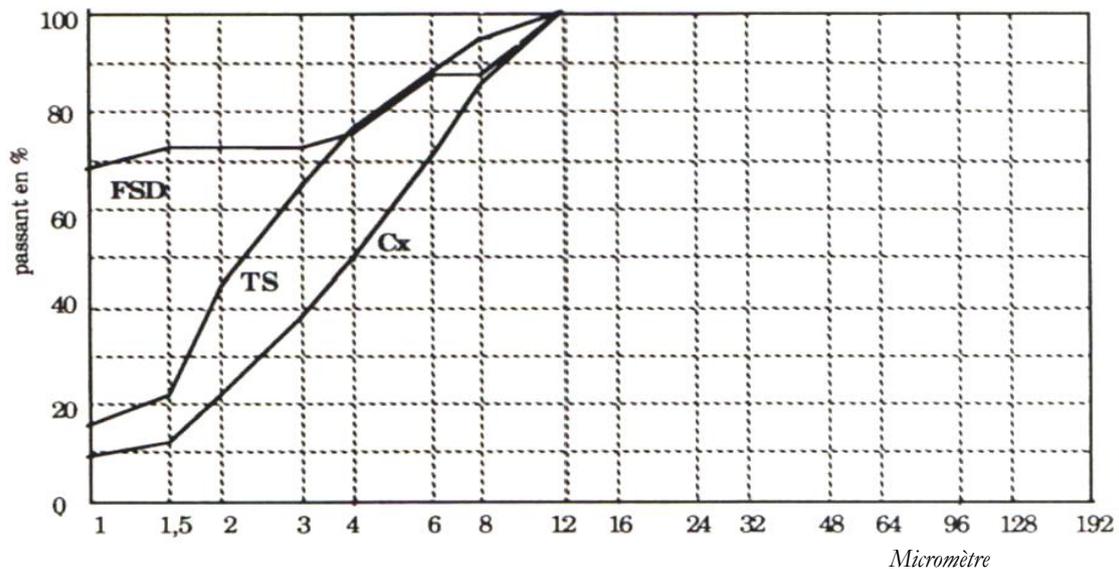


Figure 2.2 : Courbes granulométriques des éléments fins : fumée de silice densifiée (FSD), chaux (Cx) et terre de Santorin (TS)

Pour les mélanges ciment-ultrafines, un adjuvant superplastifiant à base de résine mélamine formaldéhyde a été utilisé dont la teneur en extrait sec était de 33%. Cet adjuvant ne possède, vis à vis des ciments aucun effet secondaire de retard de prise.

En plus de la pénétrabilité, elle a étudié pour chaque formulation de coulis, quelles étaient les possibilités de modification de ses autres caractéristiques essentielles telles que stabilité, résistance mécanique et propriétés d'adhérence.

II.2.3 Coulis expérimentés

La composition des coulis servant à l'étude de l'influence du facteur granularité est caractérisée par une teneur en eau constante telle que $E/C = 0,75$. Cette valeur a été retenue à la suite d'essais préliminaires ayant montré qu'une teneur en eau supérieure n'améliorait pas la fluidité mais en revanche augmentait l'exsudation (tableau 3 annexe)

II.2.4 Confection des coulis

Le malaxage des coulis à base de ciment a été réalisé à l'aide d'un malaxeur à turbine à très haute turbulence, tournant à la vitesse de 8000 trs/min. la durée de malaxage de chaque formule a été de 6 minutes.

Les formulations de coulis ciment + ultrafines ont été mélangées aux ultrasons pendant 4 min pour une meilleure dispersion et une défloculation des particules.

II.2.5 Conduite des essais

- Mesure de l'injectabilité des coulis hydrauliques

Cette mesure a été effectuée conformément à la méthode d'essai normalisée NF P18891.

- Mesure du taux d'exsudation

Pour apprécier la stabilité des coulis étudiés, l'essai de mesure de l'exsudation défini par la norme NF P18359 a été utilisé. L'essai consiste à mesurer la quantité d'eau qui reste à la surface du coulis laissé au repos et à l'abri de toute évaporation pendant trois heures.

- Mesure des résistances mécaniques des coulis

Des essais de compression et de fendage ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques de coulis durci, le diamètre des éprouvettes est de 20 mm, la hauteur de 40 mm. Trois teneurs en éléments ultra-fins ont été considérés (10, 25, et 40%)

- Détermination des caractéristiques d'adhérence des coulis sur des pierres calcaires

L'évaluation des caractéristiques d'adhérence des coulis est un problème très complexe. Pour obtenir en laboratoire des propriétés reproductibles, il est nécessaire de schématiser la géométrie du problème. La configuration qu'elle a adopté est celle d'un joint de coulis peu épais entre deux pierres aux faces planes.

Les deux éprouvettes support étaient des cylindres de diamètre et de longueur 40 mm prélevés par carottage dans la roche à tester. Leurs extrémités ont été rectifiées pour permettre un réglage précis de l'épaisseur du joint de coulis et obtenir un état de surface constant. Après injection et conservation pendant 28 jours à 20 °C et 95 % d'humidité relative, on a collé des têtes de traction en acier sur les éprouvettes pour permettre la fixation d'un système de traction à double rotule.

II.2.6 Principaux résultats

- Influence de la granularité du ciment

Les figures 2.3 et 2.4 et 2.5 démontrent de manière explicite qu'il existe une forte corrélation

entre la granularité du ciment et l'injectabilité.

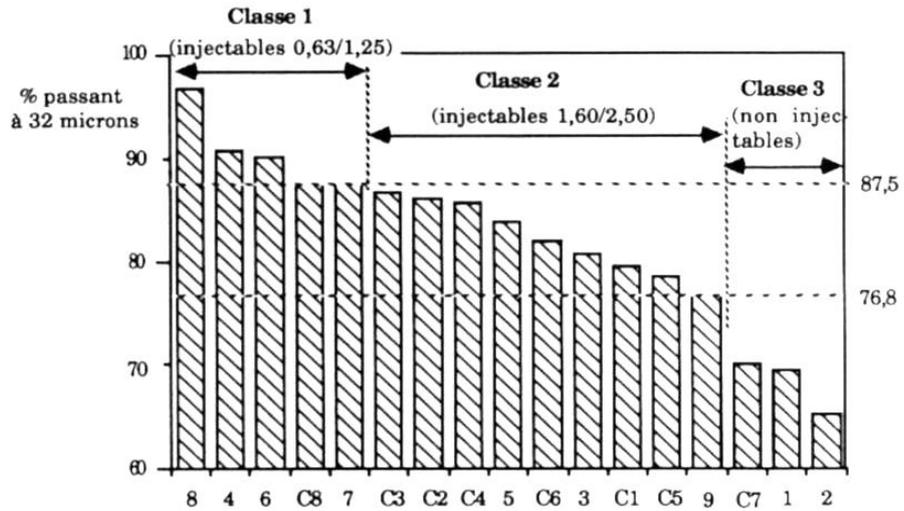


Figure 2.3 : Influence du pourcentage de passant à 32 μm sur l'injectabilité des coulis de ciment.

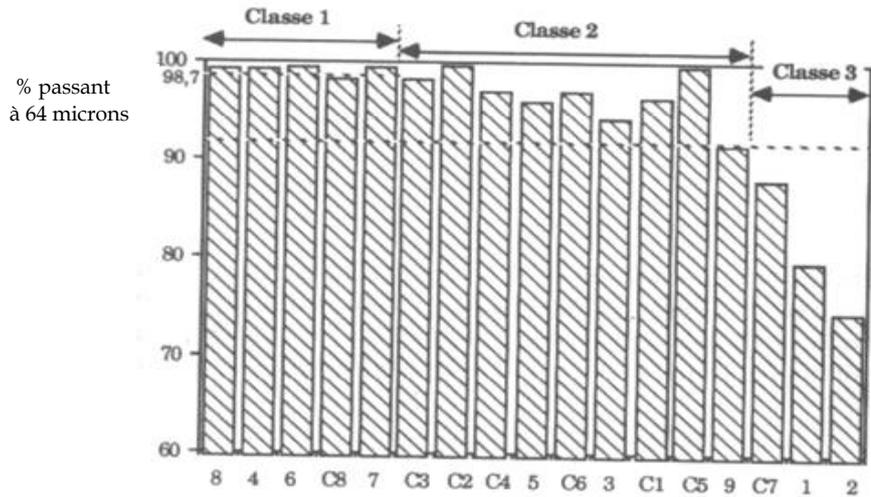


Figure 2.4 : Influence du pourcentage de passant à 64 μm sur l'injectabilité des coulis de ciment.

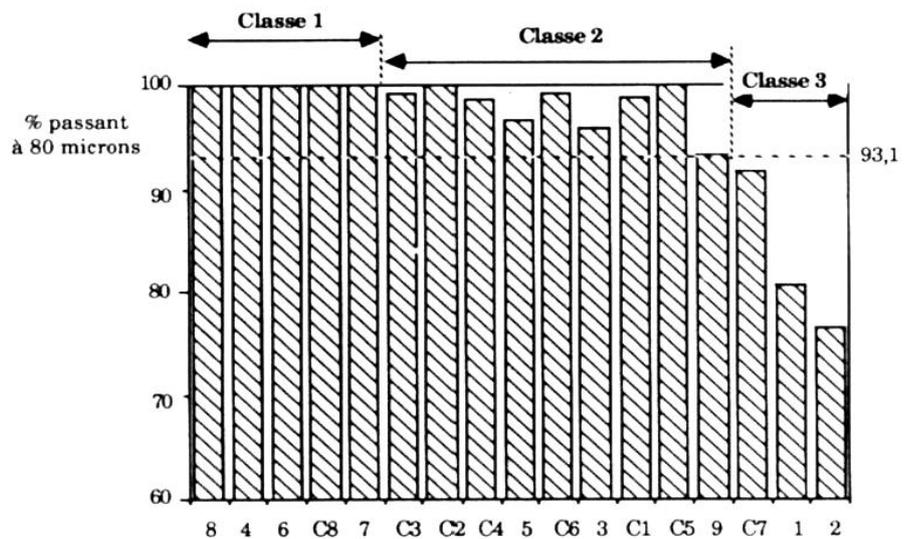


Figure 2.5 : Influence du pourcentage de passant à 80 μm sur l'injectabilité des coulis de ciment

Un critère granulométrique est tiré de ces résultats et est synthétisé dans le tableau 2.1

Tableau 2.1 : Critères granulométriques d'injectabilité.

Granularité du sable de la colonne (mm)	Pourcentages de refus à :			
	160 μm	80 μm	64 μm	32 μm
0,63/1,25	0	0	≤ 1	≤ 12
1,60/2,5	0	≤ 7	≤ 8	≤ 23

Les paramètres globaux tels que surface spécifique Blaine ou le rapport diamètre des plus gros grains sur dimension d'ouverture des fissures se sont avérés insuffisants. On a montré que ces critères d'injectabilité devaient porter sur la répartition de l'ensemble des grains de diamètre supérieur à 32 μm . Ainsi, pour qu'un coulis de ciment soit injectable dans une colonne remplie d'un sable de granularité 0,63/1,25 mm, le ciment ne doit pas posséder de grains supérieurs à 80 μm et ne doit pas avoir plus de 12% de grains supérieurs à 32 μm .

- Influence d'une addition d'éléments ultra-fins

L'addition en quantité suffisante d'ultrafines permet l'obtention de coulis à haute pénétrabilité à partir de ciments ordinaires, la quantité minimale d'éléments fins qu'il convient d'ajouter dépend essentiellement de la granularité du ciment de départ. Le pourcentage de refus à 32 μm de la phase solide du mélange doit toujours rester inférieur à 12 %.

L'addition d'ultrafines a également des conséquences très favorables sur la stabilité des coulis (fig. 2.6, 2.7, et 2.8)

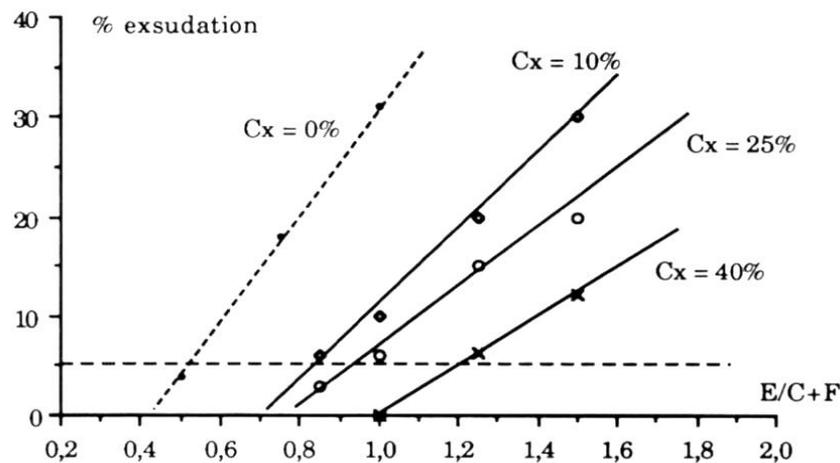


Figure 2.6 : Evolution du taux d'exsudation en fonction du paramètre $E/(C+F)$ pour des coulis constitués de ciment et de chaux.

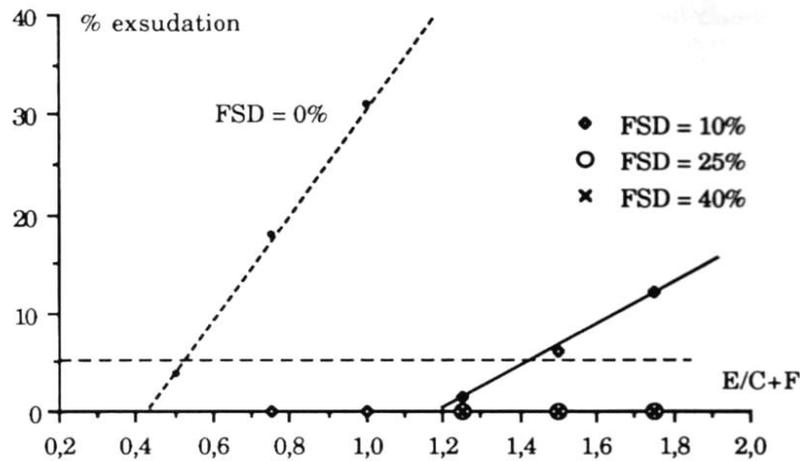


Figure 2.7 : Evolution du taux d'exsudation en fonction du paramètre $E/(C+F)$ pour des coulis constitués de ciment et de fumée de silice densifiée.

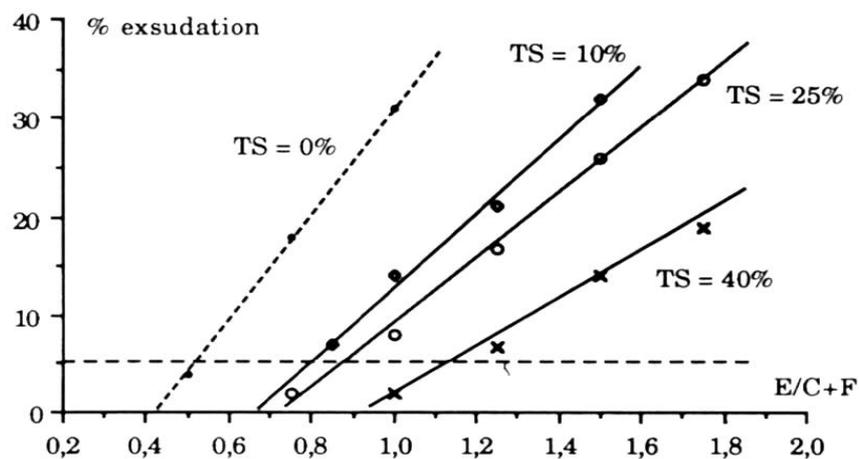


Figure 2.8 : Evolution du taux d'exsudation en fonction du paramètre $E/(C+F)$ pour des coulis constitués de ciment et de terre de Santorin.

En effet, les coulis de ciment pur présentent un ressuage devenant rapidement élevé dès que le rapport E/C dépasse la valeur 0,5. La présence d'éléments ultra-fins permet l'obtention de coulis demeurant stables pour des teneurs en eau et en superplastifiant beaucoup plus importantes, le taux d'exsudation d'un coulis contenant 25% de fumée de silice reste ainsi encore nul pour des teneurs en eau égales à 1,75.

Les valeurs limites des teneurs en eau et en superplastifiant conduisant à des coulis stables et injectables ont été déterminées; les limites supérieures étant imposées par les conditions de stabilité, les limites inférieures par les conditions de pénétrabilité.

- Résistances mécaniques des coulis

Les principaux résultats sont présentés dans le tableau 2.2.

L'analyse des caractéristiques mécaniques des coulis lui a permis de montrer qu'il était possible d'obtenir une large gamme de résistances en jouant sur la teneur et la nature des éléments fins utilisés. A titre d'exemple, les résistances en compression obtenues à 28 jours varient entre 3.2 MPa pour un coulis contenant 50% de chaux à 31 MPa pour un coulis contenant 25% de fumée de silice. L'existence d'une telle palette de propriétés est intéressante d'un point de vue pratique.

Tableau 2.2 : Résistance à la compression et au fendage des coulis étudiés

Composition de coulis						Résistance en compression R _{c28} (MPa)	Résistance ou fendage R _{f28} (MPa)
Ciment	FSD	Cx	TS	E / C+F	% SP		
100	-	-	-	0,5	-	34,0	3,9
90	10	-	-	0,75	0,66	25,9	2,4
75	25	-	-	0,75	1,16	31,0	2,5
60	40	-	-	1,00	1,66	21,9	2,5
90	-	10	-	0,75	0,33	17,2	2,1
75	-	25	-	0,75	0,5	13,1	1,8
60	-	60	-	1,00	0,66	4,2	0,7
90	-	-	10	0,75	0,16	21,5	2,1
75	-	-	25	0,75	0,33	18,6	1,8
60	-	-	40	1,00	0,5	10,7	1,2
70	13,5	16,5	-	0,75	1,0	18,0	1,7
50	22,5	27,5	-	1,0	1,66	12,5	1,4

Il est en effet important de pouvoir choisir un coulis dont les caractéristiques mécaniques sont adaptées aux performances de la structure dégradée et aux exigences de la réparation à effectuer.

- Propriétés d'adhérence.

Les essais de traction réalisés sur des assemblages coulis-pierres calcaires montrent que les coulis hydrauliques étudiés possèdent de très bonnes propriétés d'adhérence. Les caractéristiques d'adhérence se classent de manière conforme à l'échelle de résistance intrinsèque des coulis.

On ne s'attarde pas sur le sujet, mais il faut noter que l'ensemble des résultats obtenus et les analyses partielles déjà effectuées ont montré la complexité des phénomènes mis en jeu et le nombre important des paramètres influençant ces caractéristiques.

II.2.7 Influence d'une injection de coulis sur le comportement mécanique d'éléments de structure

II.2.7.1 Matériaux utilisés

La composition du mortier utilisé est donnée par le tableau 2.3

Les remplissages étudiés ont été constitués à l'aide du mortier défini par le tableau 2.3 et de cailloux de diamètre compris entre 20 et 40 mm obtenus par concassage de la pierre. Deux types de remplissage se différenciant par la nature des pierres employées, calcaire d'Ecuelles ou de St-Maximin (tableau 2.4), et par leur porosité (32% ou 40%) ont été considérés.

La composition des remplissages définis est présentée par le tableau 2.5.

Tableau 2.3 : Composition et porosité de mortier utilisé.

Composition	Ciment CPJ : 6 %
	Chaux éteinte : 9 %
	Sable 0.16-4 mm (80% calcaire, 20% siliceux) : 85%
	Teneur en eau E/C+Cx : 0.60
Porosité	33%

Tableau 2.4 : Caractéristiques physiques et mécaniques des pierres utilisées.

Type de pierre		Porosité (%)	ρ (g/cm ³)	R _c (MPa)
Dénomination	Origine			
Ecuelles (E)	Seine-et-Marne	6.46	2.65	96
St-Maximin (SM)	Oise	23.75	1.95	43

Tableau 2.5 : Composition des remplissages (pour 1 m³ de matériau fini).

Porosité du remplissage (%)	Pierres			Mortier	
	Volume (dm ³)	Masse (kg) Pierre Ecuelles	Masse (kg) Pierre St-Maxime	Masse phase solide (kg)	Masse d'eau (kg)
32	473	1260	900	322	32
40	473	1260	900	530	53

Les coulis d'injection utilisés sont quatre, deux coulis d'injectabilité comparable contenant des éléments ultra-fins (F1, F3) et un coulis de ciment servant de témoin (T) de fluidité comparable à F1 et F3 mais non injectable dans la colonne de sable 0,63/1,25 mm. Le tableau 2.6 donne la composition de ces coulis.

Tableau 2.6 : Composition des coulis utilisés.

Formulation de coulis	Nature du ciment	Ciment %	FSD %	Cx %	E/(C+F)	% SP
F1	C2	75	25		0,75	1,16
F3	C2	50	22,5	27,5	1,00	1,66
T	C2	100			0,75	

II.2.7.2 Description des essais réalisés

Des essais de compression simple et de cisaillement ont été réalisés sur des éprouvettes de remplissage injectées et non injectées. Dans le cas de la compression, les injections ont été réalisées sur deux types d'éprouvettes :

- éprouvettes de remplissage initial : injection dite « préventive »,
- éprouvettes de remplissage préalablement endommagées par un essai de compression poussé au delà du pic de résistance : injection dite de « réparation ».

Dans le cas du cisaillement, l'injection a seulement été réalisée sur des éprouvettes de remplissage initial (injection « préventive »).

II.2.7.3 Confection des corps d'épreuve

Deux types d'éprouvettes ont été utilisés :

- des cylindres de diamètre 25 cm et de hauteur 50 cm pour la compression uniaxiale,
- des prismes droits à base carrée de hauteur 20 cm et d'arête 25 cm pour le cisaillement.

Le coulis est injecté, sous une pression de 40 KPa, (fig. 2.9)

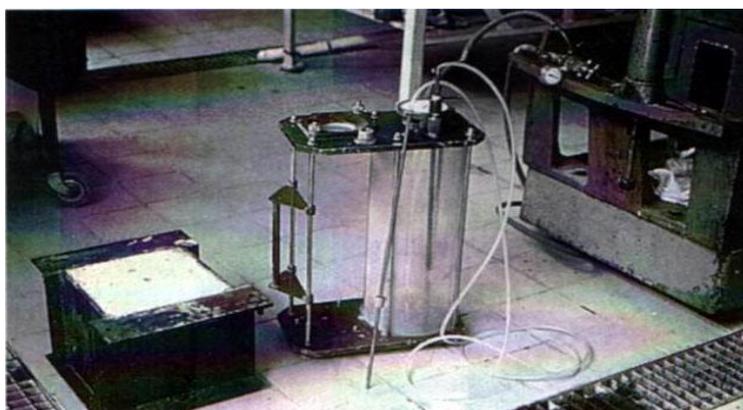


Figure 2.9 : Dispositif d'injection des éprouvettes de remplissage

Les éprouvettes ont été conservées en atmosphère humide ($90 \pm 5\%$ HR) et à une température constante ($20^\circ \pm 2^\circ\text{C}$). Les résistances ont été mesurées à 28 jours pour les éprouvettes de remplissage non injectées et à 56 jours pour les éprouvettes injectées à 28 jours.

II.2.7.4 Principaux résultats

a) Caractéristiques générales du comportement mécanique

Pour illustrer les caractères généraux des comportements mécaniques observés, nous présentons les résultats obtenus sur des remplissages constitués avec les cailloux d'Ecuelles, à l'état initial et injectés au coulis F1.

- Courbes « effort-déformation » en compression simple

Eprouvettes de référence

Comme le montre la figure 2.10, relative à des éprouvettes non injectées, le remplissage de porosité 32% se distingue du remplissage de porosité 40% par sa rigidité plus forte et sa résistance plus élevée.

Les cycles ont été réalisés en déclenchant la décharge lorsque la contrainte normale σ valait 80% du maximum précédemment atteint.

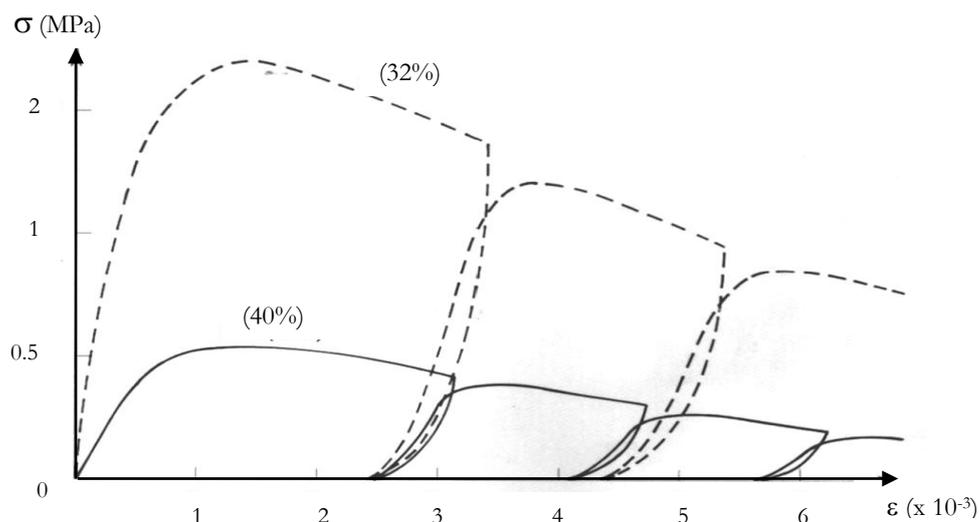


Figure 2.10 : Courbes effort-déformation obtenues en compression simple sur deux éprouvettes de référence, de porosité respectives 32 et 40 %.

Par ailleurs, l'observation des éprouvettes après destruction montre que la rupture se fait presque uniquement dans le mortier et aux interfaces mortier-cailloux (fig. 2.11).



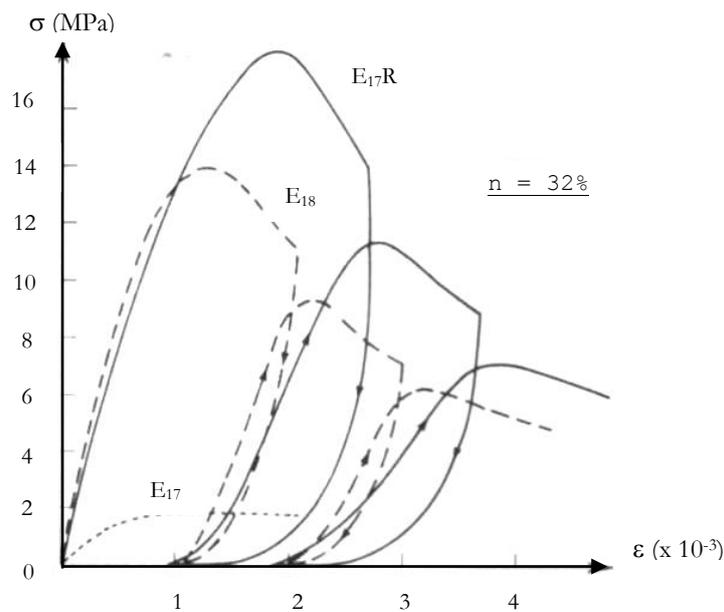
Eprouvettes injectées

La figure 2.12 permet d'apprécier l'influence de l'injection de coulis sur les courbes « effort-déformation » (éprouvette à 32% de porosité initiale).

Les gains de résistance et de rigidité obtenus après injection de coulis sont très importants.

La résistance en compression simple est, en particulier, multipliée par sept lorsque l'éprouvette est injectée dans sa configuration initiale, et par dix quand l'injection est réalisée sur une éprouvette préalablement dégradée par compression. Dans ce dernier cas, la valeur élevée des résistances peut être attribuée à une injection plus pénétrante et diffuse dans le matériau préalablement fissuré.

La rupture des éprouvettes se fait cette fois en bonne partie à travers les cailloux (figure 2.13)



E₁₇: Eprouvette de référence non injectée

E₁₈: Eprouvette de référence injectée (injection « préventive »)

E_{17R}: Eprouvette de référence injectée après endommagement (injection de « réparation »)

Figure 2.12 : Influence d'une injection de coulis sur les courbes effort-déformation obtenues en compression simple.



Figure 2.13 : Epreuve de remplissage

injectée après rupture

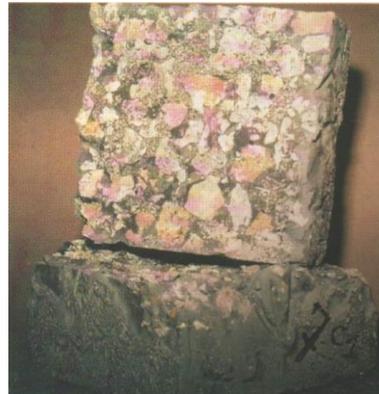


Figure 2.14 : Epreuve de remplissage injectée

après rupture. Essai de cisaillement direct.

- Courbes « effort-déplacement » en cisaillement direct

De manière comparable aux résultats obtenus en compression simple, on peut, ici, noter le rôle important tenu par la porosité des éprouvettes sur les résistances au cisaillement. Par ailleurs, elle note que les éprouvettes à 40% ont un comportement assimilable au type élasto-plastique parfait, alors que celles à 32% de porosité, plus résistantes, ont un comportement plus fragile.

Enfin, la rupture se fait uniquement dans le mortier et aux interfaces entre celui-ci et les cailloux, tout comme dans le cas des essais de compression simple. Là encore, on constate que l'injection renforce notablement les remplissages, avec une accentuation du comportement fragile pour les deux types de porosité. Par ailleurs, l'observation des éprouvettes après essai montre que de nombreux cailloux sont brisés dans le « plan » de rupture (fig. 2.14).

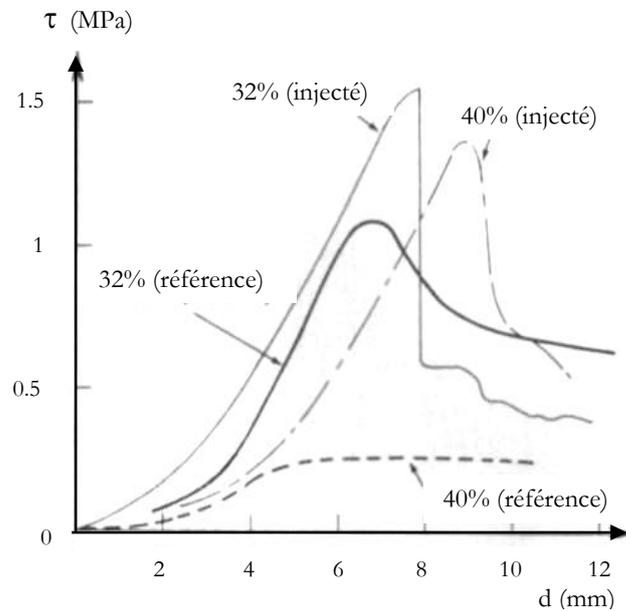
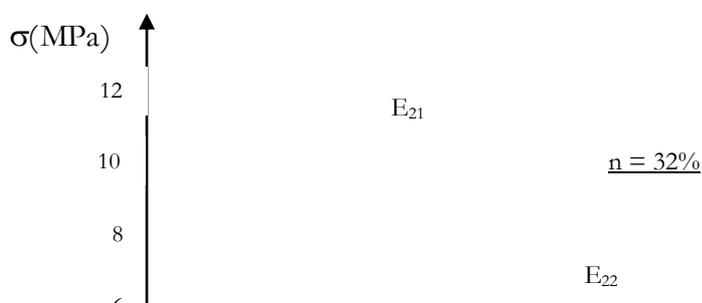
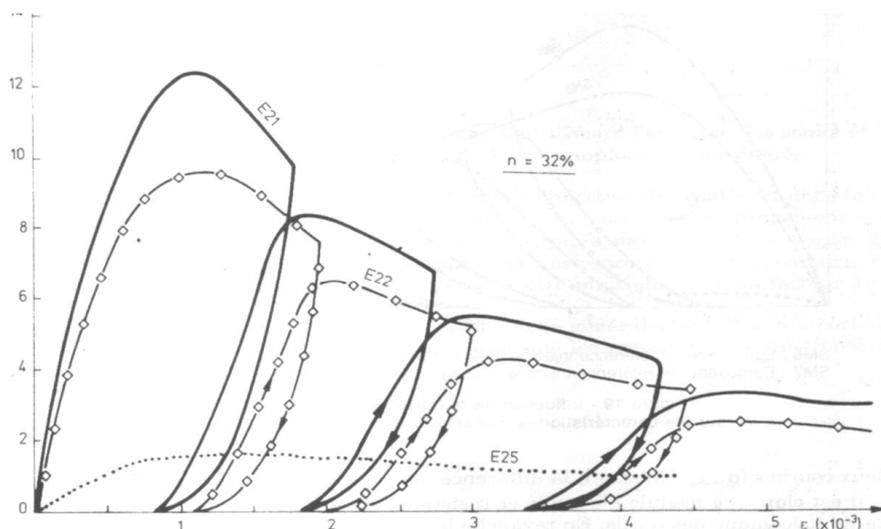


Figure 2.15 : Influence d'une injection de coulis sur les courbes effort-déplacement obtenues en cisaillement direct.

- Influence de la nature du coulis (comparaison des coulis F1 ET F3)

La figure 2.16 présente deux courbes de compression uni-axiale, relatives aux remplissages à base de calcaire d'Ecuellen, et montre que la supériorité intrinsèque du coulis F1 sur le coulis F3 se transmet aux remplissages.





E25 : Epreuve de référence
 E22 : Epreuve de référence injectée coulis F3
 E21 : Epreuve de référence injectée coulis F1

Figure 2.16 : Influence de la nature du coulis sur le comportement mécanique des remplissages.

- Comparaison coulis de ciment pur – coulis de ciment avec éléments ultra-fins
 On a été constaté que la résistance en compression obtenue avec le coulis témoin est nettement inférieure à celle trouvée avec le coulis ciment-fumée de silice (tableau 2.7). Outre la part due aux caractéristiques mécaniques intrinsèques des coulis, ces résultats s’expliquent essentiellement par le meilleur pouvoir de pénétration du coulis F1.

Tableau 2.7 : Comparaison des caractéristiques mécaniques obtenues avec un coulis ciment-fumée de silice et un coulis de ciment pur.

Coulis	Résistance en compression Rc (MPa)
F1/75	17.0 (2)
T/75	13.3 (1)

- Influence de la nature des pierres

Tableau 2.8 : Résistance en compression

Type de pierres	Résistance en compression (MPa)
Ecuelles	0.48
St-Maximin	0.50

La différence de résistance entre les deux pierres (Ecuelles, St-Maximin) ne se trouve pas pour les remplissages (tableau 2.8). Ce sont les « ponts » de mortier entre les cailloux qui gouvernent les propriétés mécaniques de l’ensemble.

II.3. TRAVAUX DE BINDA, A.M PAILLÈRE, J.J SERRANO, ET A.E MILTIADOU [1993]

II.3.1 Préparation des corps d'épreuve

Des formulations de coulis ont été expérimentées en semi grandeur.

Des essais ont été réalisés, d'abord au LCPC (Paris, France) sur des éprouvettes cylindriques poreuses [Miltiadou, Durville, Massieu, Martineau, Serrano., 1993], puis en Italie et en Grèce sur des murets en briques pleines ou en pierres calcaires jointoyées avec un mortier [Binda, Baronio., 1991]. Ces essais ont permis :

- d'une part de vérifier l'injectabilité de ces coulis dans de fines fissures, cavités ou anfractuosités ;
- d'autre part d'apprécier le rôle mécanique de tels coulis, injectés à titre préventif (renforcement) ou curatif (réparation), en étudiant le comportement global de la structure injectée.

Des murets en maçonnerie, dont le mode de construction se rapproche des ouvrages anciens, fréquemment rencontrés en laboratoire comme suit :

- 16 murets en briques pleines (Italie),
- 9 murets et 1 mur avec parements en pierres calcaires séparés par un « remplissage » présentant une porosité totale de 30% (Grèce).

Le tableau 2.9 donne une description sommaire des corps d'épreuve et les figures 2.17 et 2.18 montrent les deux modes de construction.

Tableau 2.9 : Description des corps d'épreuve

Nombre de Murets	Dimensions (cm)	Matériaux de construction	Type d'injection	Pays
5 9 2	25 x 50 x 60 25 x 60 x 110 40 x 50 x 70	Briques	Réparation	Italie
4 3 2 1	40 x 70 x 120 40 x 70 x 120 40 x 70 x 60 40 x 250 x 260	Parements En pierres + remplissage	Réparation Renforcement Réparation Réparation	Grèce

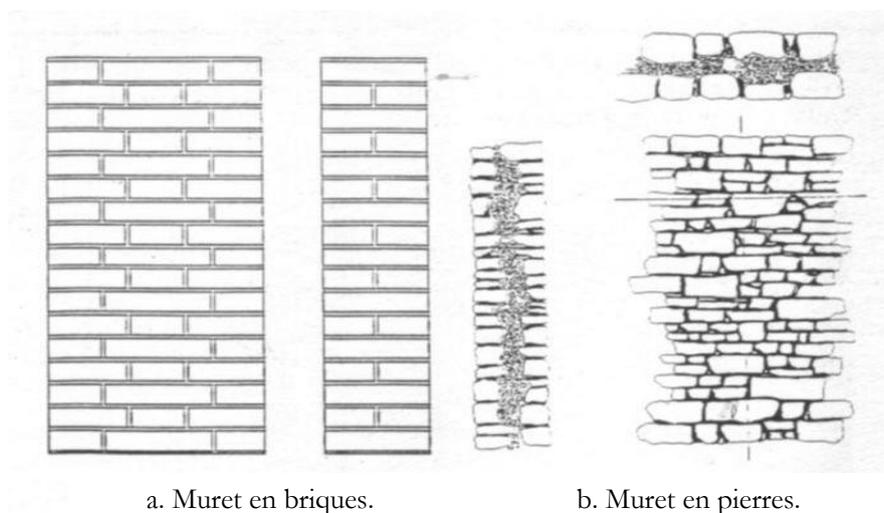


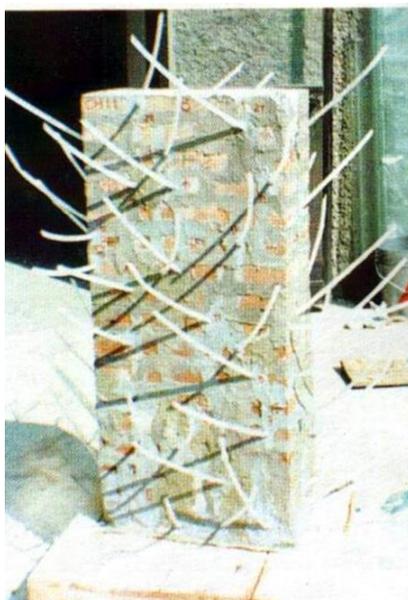
Figure 2.17 : Schémas des modes de construction des murets



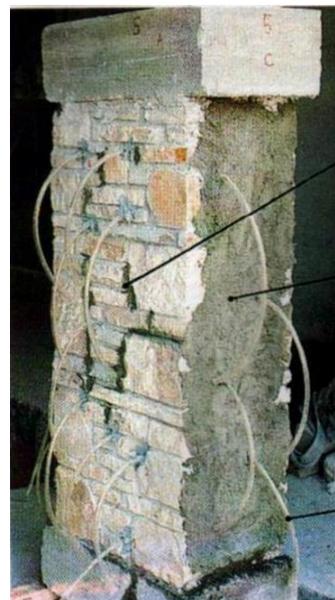
Figure 2.18 : Vue de dessus d'un muret en pierres :
vue parements et du remplissage

Les murets destinés aux injections dites de réparation ont été préalablement endommagés en compression simple pour créer des fissures et connaître leur comportement mécanique avant l'injection du coulis.

Des événements, constitués de tuyaux souples transparents de 1 cm de diamètre, ont été implantés sur les quatre faces dans des orifices de 10 cm de profondeur percés au droit des fissures et des joints de mortier (fig. 2.19)



a. Muret en briques



b. Muret en pierres

Figure 2.19 : Vue des deux types de murets munis des événements.

II.3.2 Injection du coulis

Deux coulis hydrauliques à base de ciment et d'ultrafines fabriqués avec un mélangeur à ultrasons ont été utilisés. La composition pondérale de ces coulis est donnée dans le tableau 2.10.

Chaque coulis a été injecté sous une pression de 0,07 MPa, à partir de l'évent le plus bas, qui offrait les meilleures possibilités de communication.

Tableau 2.10 : Composition des coulis utilisés

Coulis	Ciment (kg)	Fumée de silice densifiée (kg)	Chaux (kg)	Super-plastifiant extrait sec	Eau
1	75	25	0	1,33	90
2	50	22,5	27,5	1,66	100

La méthode suivie a été pratiquement la même au cours des quatre campagnes d'injection en Italie et en Grèce.

Compte tenu du mode de construction utilisé et des dimensions du mur, celui-ci a été injecté en trois phases correspondant chacune au tiers de sa hauteur. L'injection de chaque muret a duré de une à trois heures. L'essai d'endommagement final est en cours, mais la pénétration du coulis hydraulique injecté n'a pas posé de problème.

II.3.3 Résultats des essais au comportement mécanique

La comparaison du comportement mécanique des murets neufs, endommagés par compression, et de ces mêmes murets soumis à la compression simple après réparation par injection, montre une amélioration très significative (100 %) de la résistance des murets injectés par rapport à leur résistance initiale, c'est à dire avant l'endommagement (fig.2.20). Le renforcement et l'augmentation de la rigidité liés à l'injection prouvent que le coulis a non seulement rempli les fissures créées lors de l'endommagement, mais aussi comblé les vides préexistants, tels que la porosité ouverte du mortier de jointoiement (fig.2.21).

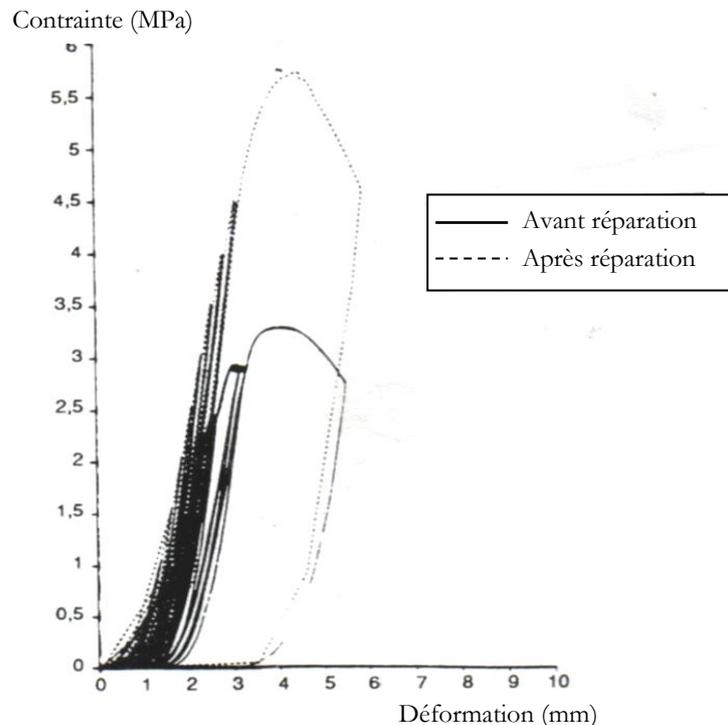


Figure 2.20 : Courbes effort-déformation.



Figure 2.21 : Détail des fissures après injection du coulis maintenu sous pression et sciage du muret (le coulis a pénétré dans les fissures situées à l'interface mortier-brique. Le joint de mortier a une épaisseur d'environ 10 mm).

Les résultats des essais effectués en semi grandeur sur des murets ont confirmé ceux obtenus en laboratoire, tant du point de vue de l'injectabilité des coulis que du point de vue du renforcement. L'injection de ces coulis a permis de doubler la résistance à la compression simple des structures en maçonnerie réparées.

II.4 TRAVAUX DE E.E. TOUMBAKARI [1999]

Une étude préliminaire a porté sur la formulation de coulis. La pénétrabilité en terme de dimensions des interstices que le coulis doit injecter, a été choisie à 0,3 mm.

Des murs à trois parements ont été construits destinés à la compression. Leurs dimensions étaient 60 x 40 x 150 cm. Au total 9 murs ont été construits, 5 en briques et 4 en pierre calcaire. Les caractéristiques mécaniques de ces derniers sont rapportées au tableau 3.10. Un mortier bâtard d'une résistance de 3,4 MPa en compression et 1,2 MPa en traction a aussi été utilisé. La partie centrale des murs a été remplie par un mélange de mortier et de cailloux d'une résistance de 3 MPa en compression.

Les murs ont d'abord été testés en compression et ensuite injectés avec deux types de coulis (13b-0 et Cb-0) présentés dans le tableau 2.11. Après conservation de 90 jours, les murs ont de nouveau été testés en compression.

La difficulté des études expérimentales en mécanique de la maçonnerie réside en (a) la nécessité de construire des échantillons (murs) d'une taille assez grande, afin qu'ils soient pertinents et significatifs d'un point de vue structurel et, par conséquent, (b) la difficulté de construire des échantillons reproductibles.

Les caractéristiques mécaniques des coulis produits et utilisés pour la réparation des murs endommagés sont rapportées aux tableaux 2.11 et 2.12

Tableau 2.11 : Caractéristiques mécaniques des coulis préparés au chantier

Age [jours]	Résistance en compression [MPa]		Résistance en traction [MPa]	
	13b-0	Cb-0	13b-0	Cb-0
28	5.2	14.6	1.8	5.6
60	6.6	18.0	1.9	4.8
90	7.3	19.5	1.7	4.5

Tableau 2.12 : Mélange utilisés pour la formulation des coulis

Identification du coulis	Composition [%-poids]			Chaux hydratée : (Trass+FS)
	Chaux Hydratée	RH.Trass (pouzzolanne naturelle)	Ciment Portland CEM I	
13b-0	17.5	52.5	30.0	1:3
Cb-0	20.0	-	80.0	

Pour améliorer la dispersion des grains du coulis, un superplastifiant à base de naphthalène formaldéhyde a été ajouté dans l'eau de gâchage. Le rapport E/Liant était de 0.85.

II.4.1 Caractéristiques des murs avant injection

Deux caractéristiques ont été retenues pour l'évaluation de la reproductibilité des murs à injecter :

- la résistance initiale
- et le volume des vides à l'intérieur de la masse du mur, qui est considéré égal au volume de coulis consommé par le mur pendant l'injection.

Ces données sont rapportées au tableau 2.13.

La reproductibilité des murs en briques est excellente : leur résistance initiale en compression est pratiquement égale et le volume des vides ne présente pas une différence significative. Les résultats des murs construits en pierre calcaire présentent une dispersion plus importante, ceci est due au mode de construction.

Tableau 2.13 : Caractéristiques mécaniques et vides à l'intérieur des murs avant injection

Identification du mur	Type de coulis d'injection	Vcoulis/Vint [%]	Vcoulis/Vtot [%]	Résistance en compression $f_{c,0}$ [MPa]
BC3 (briques)	Cb-0	19	11	2.1
BC4 (briques)	13b-0	25	14	2.2
SC2 (pierre)	Cb-0	46	17	2.1
SC4 (pierre)	13b-0	30	11	2.7

II.4.2 Caractéristiques des murs après injection

Les courbes représentant l'évolution du déplacement vertical des murs, suite à l'application d'une force normale, sont rapportées aux figures 2.22 et 2.23. L'étude des courbes révèle que la résistance en compression des murs injectés est la même, malgré le fait que les caractéristiques mécaniques des coulis Cb-0 et 13b-0 sont très différentes (fig. 2.22). En d'autres termes, l'amélioration induite par l'injection a été la même dans les deux cas. Les valeurs de la résistance en compression initiale et après injection sont rapportées au tableau 2.12. La comparaison des murs en pierre calcaire a été plus difficile, étant donné la plus grande dispersion des caractéristiques des murs avant injection.

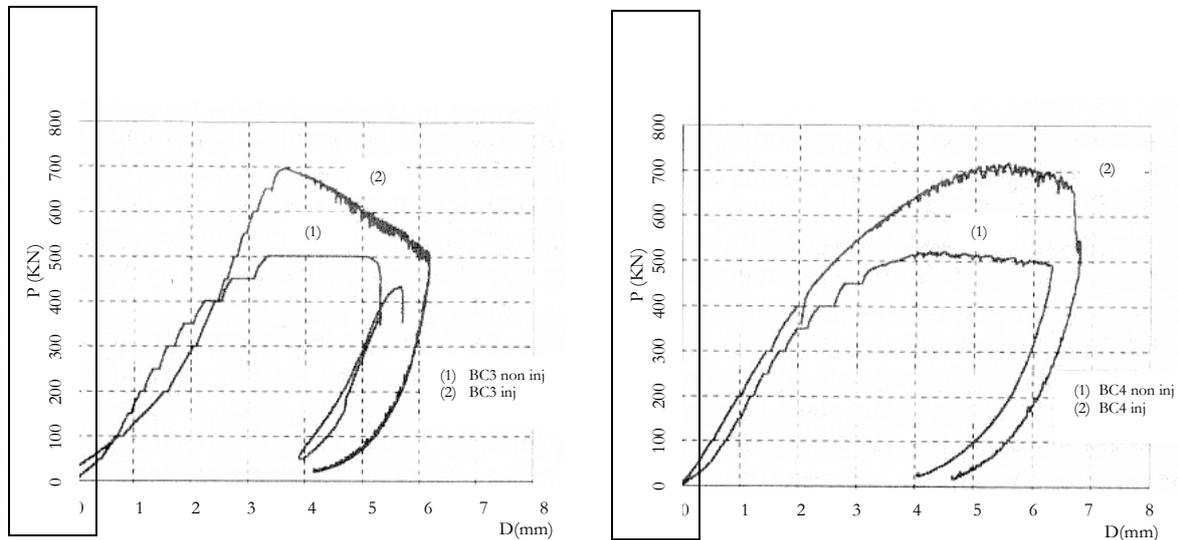


Figure 2.22 : Courbes force-déplacement des murs en brique avant et après injection
 A gauche : mur BC3 injecté au Cb-0. A droite : mur BC4 injecté au 13b-0.

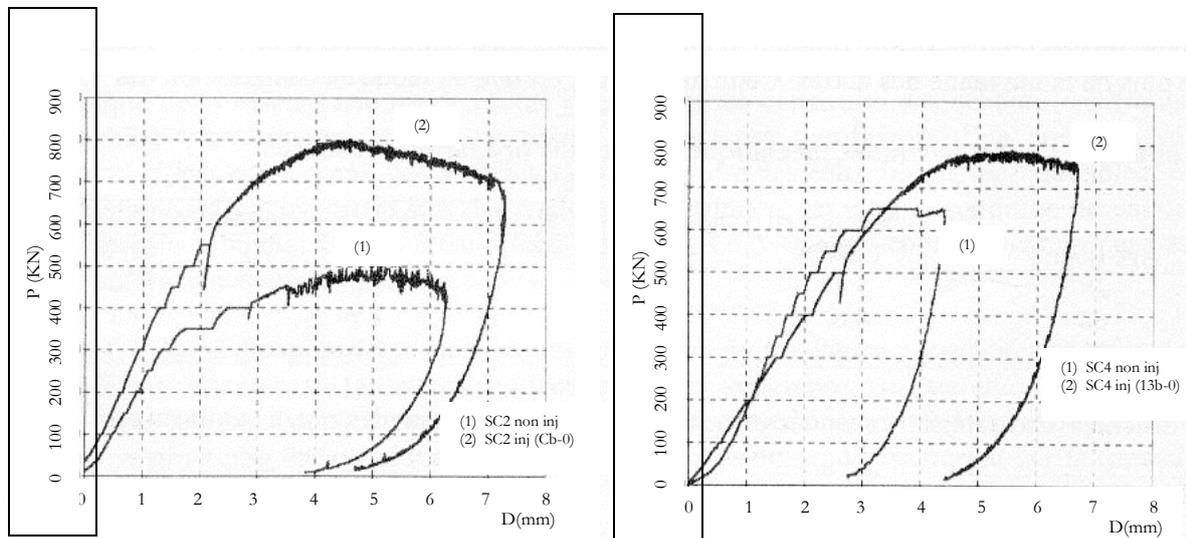


Figure 2.23 : Courbes force-déplacement des murs en pierre calcaire avant et après injection. A gauche : mur SC2 injecté au Cb-0. A droite : mur SC4 injecté au 13b-0.

On constate, néanmoins, que, si la résistance initiale en compression est différente, la résistance en compression des murs injectés est sensiblement identique. Ici aussi, l'amélioration induite par les deux coulis arrive au même niveau, qui semble d'ailleurs être une caractéristique intrinsèque du système. Ces résultats indiquent, par conséquent, que ce n'est pas la résistance en compression d'un coulis qui est le facteur qui influence le plus la résistance en compression d'une structure

injectée. Il est par contre difficile d'évaluer les résultats sur la déformabilité des murs, eu égard la grande dispersion des valeurs $\epsilon_{c,0}$ qui correspondent à la déformation sous un effort $f_{c,0}$. Les résultats sont néanmoins présentés au tableau 2.14, mais il faut souligner la forte dépendance de cette propriété des détails de construction de chaque échantillon.

Tableau 2.14 : Comparaison des résistances des murs en compression monoaxiale et de la déformation correspondante avant et après injection.

Identification Du mur	Type de coulis D'injection	Résistance en compr. $f_{c,0}$ [MPa]	Résistance en compr. $f_{c,inj}$ [Mpa]	Déformation $\epsilon_{c,0}$ corresp. à $f_{c,0}$ [‰]	Déformation $\epsilon_{c,inj}$ corresp. à $f_{c,inj}$ [‰]	$\epsilon_{c,inj} - \epsilon_{c,0}$ [‰]
BC3 (briques)	Cb-0	2,1	2,9	1,8	1,5	-0,3
BC4 (briques)	13b-0	2,2	3,0	2,3	2,9	0,6
SC2 (pierre)	Cb-0	2,1	3,3	1,6	2,3	0,7
SC4 (pierre)	13b-0	2,7	3,3	2,1	3,5	1,4

II.4 TRAVAUX DE R. BELGAID ET K. ZERG [2002]

Une première tentative d'étude au département de génie civil de la FSI de Tlemcen s'est faite à ce sujet, pour la préparation d'un projet de fin d'étude [Zerg, Belgaid., 2002], une influence d'injection de coulis sur le comportement mécanique de la maçonnerie a été expérimenté. Deux remplissages différents par leur porosité ont été réalisés. Les éprouvettes de remplissage étaient cylindriques 16 x 32 cm. Les matériaux utilisés sont reportés dans le tableau 2.15.

Tableau 2.15 : composition du mortier utilisé

Composition	Ciment CPJ-45 : 6%
	Chaux éteinte : 9%
	Sable ENG 2-4 mm : 85%
	Teneur en eau E/C+Cx : 0.6

Le tableau 2.16 nous donne la composition des deux coulis expérimentés

Tableau 2.16 : composition des coulis utilisés

Formulation de coulis	Ciment CPJ-45 (%)	Chaux hydratée (%)	E/L
C1	100	-	0.75
C2	50	50	2

Le tableau 2.17 reprend les principaux résultats :

Tableau 2.17 : Résistances à la compression uniaxiale

Porosité	Coulis	Résistance à la compression (MPa)		
		Référence	Inj. préventive	Inj. de réparation
22%	C1	0.70	5.5	6.3
	C2		2.1	2.7
28%	C1	0.67	6.3	7.5
	C2		2.7	3.4

L'injection de coulis a amélioré considérablement la résistance à la compression des éprouvettes de remplissage. Cette amélioration reste variable en fonction de la nature du coulis et la porosité de la matrice injectée. Les résistances ont été amplifiées par 10 pour les éprouvettes injectées au ciment et par 3 seulement pour le coulis ciment plus chaud. L'injection de réparation donne de meilleurs résultats qu'une injection préventive : ceci peut être attribué à une injection très pénétrante et diffuse dans la maçonnerie dégradée.

II.5 CONCLUSION

L'analyse bibliographique nous a permis la détermination rationnelle de formulations conformes aux exigences d'une injection dans des structures en maçonnerie, ainsi que l'évaluation de leur capacité de réparation et de renforcement.

Deux grandes catégories de critères de formulation ont été définies, à savoir :

- a) celle concernant le comportement mécanique
- b) celle concernant la durabilité de la structure injectée.

L'amélioration du comportement mécanique d'une structure nécessite la formulation d'une injection avec une très bonne injectabilité et une bonne adhérence. Les caractéristiques mécaniques du coulis dépendent de l'état de la structure elle-même, ainsi qu'à l'intervalle temporel, dans lequel ces caractéristiques mécaniques doivent être développées.

Les critères de formulation relatifs au comportement mécanique de la structure sont explicités comme suit :

- Injectabilité : la suspension doit être caractérisée par une basse viscosité (une très bonne fluidité correspondant au « yield value »), une pénétrabilité dans des vides d'un diamètre inférieur à 0.3 mm, et un ressuage limité à 5 % après trois heures de repos.
- Adhérence avec les matériaux existants : le retrait total doit être limité (bien que le retrait « chimique » soit inévitable), la chaleur d'hydratation minimale et la prise et durcissement à des environnements secs aussi bien que humides.
- Propriétés mécaniques suffisantes dans une période définie : le développement des caractéristiques mécaniques doit répondre à une période exigée, les résistances en compression doivent être dictées par l'analyse structurale.

La durabilité, d'autre part, nécessite le développement d'une microstructure la plus proche possible de celle des matériaux (liants) existants. Ce but peut en effet être partiellement atteint avec l'emploi de matériaux traditionnels. Une bonne adhérence, nécessaire pour le renforcement structurel, est aussi un facteur clé.