

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie Civil



Mémoire
Pour l'obtention du Diplôme de Magister en Génie Civil

Option : **STRUCTURE, GEOTECHNIQUE, MATERIAUX**

THEME :

Etude des coulis d'injection à base de liants minéraux : application aux maçonneries

Présenté par
Shahinaz SAYAGH

Soutenu devant le jury composé de :

Mr GHOMARI Fouad
Mr MEGNOUNIF Abdellatif
Mr MOKHTARI A. Medjdoub
Mr KHELLAFI Hamid
Mr BAGHLI Abdellatif
Mr BEZZAR Abd El Ilah

Maître de conférence
Chargé de cours
Maître de conférence
Maître de conférence
Chargé de cours
Maître assistant

Encadreur
Encadreur
Président
Examineur
Examineur
Examineur

REMERCIEMENTS

Je tiens en premier lieu à exprimer ma profonde reconnaissance à tous ceux qui m'ont aidé dans l'élaboration de ce travail en particulier à Messieurs

GHOMARI Fouad., maître de conférence, à la F.S.I. Tlemcen, département de génie civil, pour la confiance qu'il a mis en moi, pour le suivi permanent de ce travail et pour les efforts qu'il a déployé pour une bonne compréhension du sujet.

MEGNOUNIF Abdellatif, chargé de cours à la F.S.I Tlemcen département de génie civil, pour sa générosité, son aide précieuse et son aimable soutien.

Je tiens aussi à remercier tous ceux qui m'ont fait l'honneur de participer au jury comme :

Président :

Monsieur MOKHTARI Abderrahmane Medjdoub., maître de conférence à la F.S.I. Oran, département de Génie Civil à qui je voudrai exprimer ma profonde gratitude.

Examineurs :

Messieurs : KHELLAFI Abdelhamid maître de conférence à la F.S.I. Oran département de Génie Civil, BAGHLI Abdellatif et BEZZAR Abdel Ilah chargés de cours à la F.S.I. Tlemcen département de Génie Civil. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

Je remercie, par la même occasion Mr KHERBOUCHE Fethi, pour son accueil au sein de son entreprise et pour son aimable générosité, Mercie à Mr BOUGHRARA pour son ingénieux soutien. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma haute considération.

Qu'il me soit permis enfin de remercier Mr HARBIT Yazid pour son soutien permanent, son aide m'a été précieuse, et qui sans elle ce travail n'aura pas vu le jour.

Mercie à tous ceux qui j'ai côtoyé dans le département de Génie Civil.

TABLE DES MATIERES

Résumé	
Abstract	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale	1
Chapitre I : Identification des propriétés des coulis d'injection.....	3
I.1 Définitions.....	3
I.1.1 Propriétés d'un coulis hydraulique.....	3
I.2 Composition et nature des coulis hydrauliques.....	5
I.2.1 Description des principaux constituants.....	5
I.2.2 Nature de suspension d'un coulis hydraulique.....	7
I.3 Injectabilité des coulis hydrauliques.....	9
I.3.1 Comportement rhéologique des coulis hydrauliques.....	9
I.3.2 Influence de la granularité de la phase solide du coulis.....	16
I.4 Propriétés mécaniques des coulis.....	19
I.4.1 Caractéristiques mécaniques intrinsèques des coulis.....	19
I.4.2 Propriétés d'adhérence.....	20
I.5 Travaux de consolidation aux coulis dans le bassin méditerranéen [J. Mayer., 1999].....	21
I.6 Conclusion.....	24
Chapitre II : Approches Méthodologiques dans l'étude expérimentale des coulis d'injection..	25
II.1 Introduction.....	25
II.2 L'étude des coulis d'injection par Androniki E. Miltiadou.....	26
II.3 Travaux de Binda.....	37
II.4 Travaux de E.E Toumbakari.....	40
II.5 Travaux de R. Belgaid et K.Zerg.....	43
II.6 Conclusion.....	44
CHAPITRE III : Consolidation des maçonneries : action des liants minéraux.....	45
III.1 Introduction.....	45
III.2 Etude de la pénétrabilité des coulis hydrauliques.....	45
III.2.1 Présentation des conditions expérimentales.....	45
III.2.1.1 Coulis expérimentés.....	45
III.2.1.2 Condition de réalisation des coulis étudiés.....	46
III.2.2 Mesure de la viscosité.....	47
III.2.2.1 Viscosimètre Marsh.....	47
III.2.2.2 Viscosimètre à cylindres coaxiaux Brookfield.....	48

III.2.3 Mesure du taux d'exsudation.....	52
III.2.4 Essais d'injectabilité à la colonne de sable.....	52
III.2.3.1 Préparation de l'essai.....	54
III.2.3.2 Injection.....	55
III.2.3.3 Expression des résultats.....	55
III.2.4 Caractéristiques mécaniques intrinsèques des coulis étudiés.....	59
III.2.5 Influence d'une injection de coulis sur le comportement mécanique de la maçonnerie....	61
III.2.5.1 Matériaux utilisés.....	61
III.2.5.2 Description des essais réalisés.....	63
III.2.5.3 Confection des corps d'épreuve.....	63
III.2.5.4 Fabrication.....	63
III.2.5.5 Injection.....	64
III.2.5.6 Conservation.....	65
III.2.5.7 Description des essais de compression simple.....	65
a)Description du programme expérimental.....	65
b) Principaux résultats obtenus	66
Conclusion générale.....	70
Références bibliographiques	
Annexes	

RESUME

L'injection de coulis est une méthode de réparation souvent utilisée pour les structures et monuments en maçonnerie. Quel que soit le produit à injecter, il a, sans parler de l'esthétique, au moins deux fonctions : rétablir la continuité et l'étanchéité de l'ouvrage, et améliorer son comportement mécanique. L'utilisation de produits d'injection dont les caractéristiques sont voisines du matériau dégradé est souhaitable, d'où l'intérêt présenté par des coulis à base de liants minéraux. Plusieurs approches ont été, appréhendées afin de déterminer quelles étaient les propriétés essentielles d'un coulis.

Nous nous sommes proposées d'étudier, dans le cadre de ce travail, le comportement de trois compositions de coulis à base de ciment et de chaux éteinte.

Grâce à leur pouvoir de pénétration et à leurs bonnes propriétés mécaniques, les coulis proposés entraînent une amélioration significative des résistances des matériaux injectés. Cette aptitude a été démontrée en étudiant le comportement mécanique avant et après injection d'un matériau de remplissage.

Mots-clés : Maçonnerie, Coulis, Renforcement, Injection, Liant, Monument historique, Fissure, Granularité.

ABSTRACT

The injection of a grout is a repair method most of the time used for the structures and monuments in masonry. Sometimes, the injected product, has, without talking about the esthetic, at least two functions: restoring the continuity and the water-tightness but the work is to modify its mechanical deportment.

The use of products of injection whose characteristics are next to the degraded materials is desirable and advantaged by grouts based on mineral bindings of bricks or stones. Many approaches were feared as to determine the main proprieties of a grout.

We are proposed to study the deportment of three formulations of grouts with cement and hydrated lime, thanks to their strength of penetration and to their good mechanical proprieties; the proposed grouts lead to a significant improvment of the resistance of the injected materials. This aptitude has been proved when studying the mechanic deportment before after the injection of the filling materials.

Key word: Masonry, Groot, Renforcement, Injection, Binding, Monuments, Failure, Granularity.

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Etats d'équilibre d'un coulis	4
Figure 1.2 : Représentation schématique de la structure floculante de la pâte de ciment [Legrand C., 1982]	8
Figure 1.3 : Suspension de C ₃ S dans l'eau pure [Bombléd J.P., 1974]	8
Figure 1.4 : Suspension de C ₃ A dans l'eau pure [Bombléd J.P., 1974]	8
Figure 1.5 : Comportement visqueux et viscoplastique [Legrand C., 1982]	9
Figure 1.6 : Phénomène de thixotropie [Shaughnessy et col., 1988]	10
Figure 1.7 : Evolution de la viscosité en fonction de la concentration volumique	12
Figure 1.8 : Distance intergranulaire dans une suspension de ciment	15
Figure 1.9 : Dispositif de l'essai " d'injectabilité à la colonne de sable" (NF P 18-891)	18
Figure 1.10 : Courbe d'injectabilité des coulis hydrauliques et des polymères	19
Figure 2.1 : Fuseau granulaire déterminé au granulomètre à laser	26
Figure 2.2 : Courbes granulométriques des éléments fins : fumée de silice densifiée (FSD), chaux (Cx) et terre de Santorin (TS)	26
Figure 2.3 : Influence du pourcentage de passant à 32 µm sur l'injectabilité des coulis de Ciment	28
Figure 2.4 : Influence du pourcentage de passant à 64 µm sur l'injectabilité des coulis de Ciment	28
Figure 2.5 : Influence du pourcentage de passant à 80 µm sur l'injectabilité des coulis de Ciment	28
Figure 2.6 : Evolution du taux d'exsudation en fonction du paramètre E/(C+F) pour des coulis constitués de ciment et de chaux	29
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	30
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	30
Figure 2.9 : Dispositif d'injection des éprouvettes de remplissage	32
Figure 2.10 : Courbes effort-déformation obtenues en compression simple sur deux éprouvettes de référence, de porosité respectives 32 et 40 %	33
Figure 2.11 : Epreuve de remplissage après rupture	33
Figure 2.12 : Influence d'une injection de coulis sur les courbes effort-déformation obtenues en compression simple	34
Figure 2.13 : Epreuve de remplissage injectée après rupture	34
Figure 2.14 : Epreuve de remplissage injectée après rupture. Essai de cisaillement direct	34
Figure 2.15 : Influence d'une injection de coulis sur les courbes effort-déplacement obtenues en cisaillement direct	35
Figure 2.16 : Influence de la nature du coulis sur le comportement mécanique des remplissages	36
Figure 2.17 : Schémas des modes de construction des murets	37
Figure 2.18 : Vue de dessus d'un muret en pierres : vue des parements et du remplissage	38
Figure 2.19 : Vue des deux types de murets munis des événements	38
Figure 2.20 : Courbes effort-déformation	39
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. Le coulis qui a rempli les cavités ne contient pas de bulles d'air)	40
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	42
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	42
Figure 3.1 : Viscosimètre Marsh	47
Figure 3.2 : Evolution du temps d'écoulement et de la concentration volumique en fonction du rapport E/liant	48
Figure 3.3 : Viscosimètre Brookfield type LVF	49
Figure 3.4 : Evolution de la viscosité apparente et de la concentration volumique en fonction du rapport E/C	50
Figure 3.5 : Evolution de la viscosité apparente et de la concentration volumique en fonction du rapport E/Cx	51
Figure 3.6 : Evolution de la viscosité apparente et de la concentration volumique en fonction du rapport E/C+Cx	51
Figure 3.7 : Mesure du taux d'exsudation	52
Figure 3.8 : Schéma du dispositif d'injectabilité	54
Figure 3.9 : Courbe granulométrique du sable utilisé	62
Figure 3.9 : Programme d'essai	65

LISTE DES PHOTOS

Photo 1.1 : Pompe d'injection	22
Photo 1.2 : Application de l'injection dans l'arc	22
Photo 1.3 : Application de l'injection dans le poteau	22
Photo 3.1 : Dispositif d'injectabilité	53
Photo 3.2 : Injectabilité du coulis E/C=0.9	57
Photo 3.3 : Essorage du coulis de chaux	57
Photo 3.4 : Essorage du coulis de ciment	57
Photo 3.5 : Essorage du coulis de (ciment + chaux)	58
Photo 3.6 : Coulis injectable : coulis de chaux (E/Cx = 1.9)	58
Photo 3.7 : Eprouvettes de coulis de ciment	59
Photo 3.8 : Eprouvettes de coulis de chaux	59
Photo 3.9 : Eprouvettes de coulis de ciment + chaux (1 :1)	59
Photo 3.10 : Banc didactique	60
Photo 3.11 : Essai de traction par flexion	60
Photo 3.12 : Essai de compression simple	60
Photo 3.13 : Eprouvettes de mortier utilisé	62
Photo 3.14 : Pierres calcaires utilisées	63
Photo 3.15 : Composants du mortier sec	63
Photo 3.16 : Malaxage du mortier humide	64
Photo 3.17 : Mortier prêt à l'emploi	64
Photo 4.18 : Mélange du mortier aux cailloux	64
Photo 4.19 : Eprouvettes de remplissage	64
Photo 4.20 : Perçage de l'éprouvette	64
Photo 4.21 : Conservation des éprouvettes	65
Photo 4.22 : Remplissage de porosité 40%	66

Photo 4.23 : Remplissage de porosité 32%	66
Photo 4.24 : Essai de compression simple (éprouvette de référence)	67
Photo 4.25 : Eprouvette injectée (coulis de ciment)	67
Photo 4.26 : Eprouvette injectée (coulis de ciment + chaux)	67
Photo 4.27 : Eprouvette injectée de ciment (prise de vue de haut)	67
Photo 4.28 : Eprouvette injectée (coulis de chaux)	68
Photo 4.29 : Eprouvette injectée de chaux (prise de haut)	68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Correspondance entre les paramètres E/C et C_v	11
Tableau 1.2 : Correspondance entre les paramètres E/Cx et C_v	11
Tableau 1.3 : Expression de la viscosité en fonction de la concentration volumique. Cas de particules sphériques sans interaction	11
Tableau 1.4 : Expression de la viscosité en fonction de la concentration volumique	13
Tableau 1.5 : Expression du seuil de cisaillement en fonction de la concentration volumique	13
Tableau 1.6 : Conditions d'essai des mesures des paramètres rhéologiques	13
Tableau 1.7 : Distance intergranulaire moyenne	14
Tableau 1.8 : Distances intergranulaires moyennes pour différents coulis caractérisés par un seuil de cisaillement constant et égal à 30 Mpa [Bomble J.P., 1974]	15
Tableau 1.9 : Valeurs du diamètre d (μm) pour différentes classes granulaires du sable de la colonne	18
Tableau 2.1 : Critères granulométriques d'injectabilité	29
Tableau 2.2 : Résistance à la compression et au fendage des coulis étudiés [Miltiadou A.E., 1990]	31
Tableau 2.3 : Composition et porosité de mortier utilisé [Miltiadou A.E., 1990]	31
Tableau 2.4 : Caractéristiques physiques et mécaniques des pierres utilisées	31
Tableau 2.5 : Composition des remplissages (pour 1 m ³ de matériau fini) [Miltiadou A.E., 1990]	32
Tableau 2.6 : Composition des coulis utilisés [Miltiadou A.E., 1990]	32
Tableau 2.7 : Comparaison des caractéristiques mécaniques obtenues avec un coulis ciment- fumée de silice et un coulis de ciment pur	36
Tableau 2.8 : Influence de la nature des pierres (résistance en compression)	36
Tableau 2.9 : Description des corps d'épreuve [Binda., 1993]	37
Tableau 2.10 : Composition des coulis utilisés [Binda., 1993]	39
Tableau 2.11 : Caractéristiques mécaniques des coulis préparés au chantier [Binda., 1993]	40
Tableau 2.12 : Mélange utilisés pour la formulation des coulis [Toumbakari., 1999]	41
Tableau 2.13 : Caractéristiques mécaniques et vides à l'intérieur des murs avant injection	41
Tableau 2.14 : Comparaison des résistances des murs en compression monoaxiale et de la déformation correspondante avant et après injection [Toumbakari., 1999]	43
Tableau 2.15 : Composition du mortier utilisé [Zerg, Belgaid., 2002]	43
Tableau 2.16 : Composition des coulis utilisés [Zerg, Belgaid., 2002]	43
Tableau 2.17 : Résistances à la compression uniaxiale [Zerg, Belgaid., 2002]	43
Tableau 3.1 : Composition chimique et masse volumique des liants utilisés	46
Tableau 3.2 : Opérations de malaxage des coulis étudiés	46

Tableau 3.3 : Taux de cisaillement relatifs aux mobiles Brookfield utilisés	49
Tableau 3.4 : Viscosités relatives au coulis de ciment	50
Tableau 3.5 : Viscosités relatives au coulis de chaux	50
Tableau 3.6 : Viscosités relatives au coulis de ciment + chaux (1 : 1)	51
Tableau 3.7 : Granulométrie du sable normal 0.63/1.25 mm	54
Tableau 3.8 : granulométrie du sable normal 1.6/2.5 mm	54
Tableau 3.9 : Injectabilité des coulis les plus stables pour les 3 liants préconisés	55
Tableau 3.10 : Injectabilité des coulis de ciment, de chaux et de ciment + chaux (1 :1) étudiés	56
Tableau 3.11 : Caractéristiques mécaniques intrinsèques des coulis étudiés	59
Tableau 3.12 : Composition et porosité du mortier utilisé	61
Tableau 3.13 : Caractéristiques mécaniques du mortier utilisé	62
Tableau 3.14 : Composition des remplissages (pour 1 m ³ de matériau fini)	62
Tableau 3.15 : Composition des coulis utilisés	63
Tableau 3.16 : Programme expérimental. Essais de compression	66
Tableau 3.17 : Expression des résultats d'essais de compression simple sur éprouvettes de remplissage	68

Nomenclature

τ	contrainte de cisaillement
$\dot{\epsilon}$	vitesse de déformation de cisaillement
η	coefficient de viscosité
τ_0	seuil de cisaillement
C_v	concentration volumique
V_s	volume de la phase solide
V_e	volume de l'eau
E/L	rapport de la masse d'eau sur la masse de la phase solide du liant
E/C	rapport de la masse d'eau sur la masse du ciment
E/Cx	rapport de la masse d'eau sur la masse de chaux
C	ciment
Cx	chaux éteinte
C+Cx	ciment + chaux éteinte (1 :1)
γ_s	masse volumique de la phase solide
γ_e	masse volumique de l'eau
S_b	surface spécifique Blaine
n	nombre de liaisons par unité de volume
e	distance intergranulaire des particules solide en suspension
d_g	diamètre des plus gros grains de la phase solide,
d_0	dimension caractéristique de l'ouverture de fissure ou orifice à injecter
h	hauteur atteinte par le coulis dans la colonne de sable
t	temps
D	diamètre d'un grain solide
d	diamètre inscrit entre 3 grains solides
k	constante dépendant de la nature du liant et des granulats
ρ_c	densité du ciment
Rt	résistance en traction
Rs	résistance en cisaillement
C	cohésion
Φ	angle de frottement
R_{c28}	résistance à la compression à 28 jours
R_{f28}	résistance au fendage à 28 jours
FSD	fumée de silice densifiée
TS	terre de Santorin
SP	superplastifiant
ρ	masse volumique absolue
TK	pouvoir de torsion du ressort (viscosimètre Brookfield)
SMC	constante caractéristique du mobile Brookfield
RPM	vitesse de rotation
η_{app}	viscosité apparente
T _{exs}	taux d'exsudation
T ₃₆	temps mis par le coulis pour atteindre le sommet de la colonne (36 cm)

La sauvegarde de l'héritage architectural constitue une préoccupation croissante pour de nombreux pays. Les architectes et ingénieurs sont ainsi fréquemment confrontés au problème de la restauration et de la consolidation de monuments historiques ayant subi des dommages divers. Les réparations effectuées sont soumises à de multiples contraintes parmi lesquelles le respect de l'authenticité et de la qualité esthétique de la structure revêt une importance particulière.

La technique d'injection de coulis constitue l'une des méthodes de réparation les plus employées du fait de son aptitude à améliorer le comportement mécanique de la structure sans en altérer l'aspect. Le concept d'injection n'est pas récent puisque d'aucuns en attribuent la paternité aux Romains. L'histoire moderne de l'injection comme méthode de réparation ne débute néanmoins qu'au 19^e siècle avec la consolidation des murs en maçonnerie du port de Dieppe par l'ingénieur français Charles Bérigny. Les progrès réalisés depuis lors, tant au niveau des matériaux qu'à celui des équipements d'injection sous pression, ont permis un rapide développement de ces techniques. Les coulis utilisés sont réalisés soit avec des liants hydrauliques ou pouzzolaniques, soit avec des polymères ; ces derniers étant apparus dans les techniques d'injection à partir des années 1950.

Les polymères présentent l'intérêt d'offrir une gamme très étendue de viscosités. Ils peuvent de ce fait être aisément injectables dans les structures à réparer. Leur emploi dans la restauration de monuments historiques en maçonnerie pose cependant un certain nombre de problèmes. Leurs caractéristiques mécaniques (module d'élasticité, résistance, coefficient de dilatation...) sont en particulier très différentes de la structure à injecter. De plus, leur utilisation relativement récente ne permet pas la connaissance précise de leur comportement à long terme.

Les coulis hydrauliques ont l'avantage d'être constitués de matériaux bien connus aux propriétés très analogues à celles de la structure à réparer. Malheureusement, l'une des difficultés majeures rencontrée avec ces coulis réside dans leur inaptitude à traverser les fissures dont la largeur d'ouverture est inférieure à 2 ou 3mm. Pour qu'une suspension granulaire, comme l'est un coulis à base de ciment puisse être injectée, il est en effet indispensable que la granularité du coulis soit compatible avec les dimensions minimales de ces fissures. Dans le cas contraire, il se produit dès les premiers centimètres de pénétration, un phénomène d'essorage qui peut compromettre de manière déterminante la qualité de l'injection réalisée. Ce problème est particulièrement gênant pour la réparation des monuments en maçonnerie car les fines fissures constituent le plus souvent des points de passage obligés pour les coulis d'injection.

Ce problème a été relevé par de nombreux praticiens. Divers travaux de recherche se sont intéressés au sujet de l'injectabilité des coulis hydrauliques et ont abouti à une approche expérimentale permettant d'obtenir des formulations conformes aux exigences demandées.

La présente étude, s'inscrit dans le même cadre de recherche, et s'organise autour des paragraphes suivants :

Nous avons consacré le premier chapitre à définir les principales propriétés d'un coulis hydraulique, de manière générale un coulis peut être caractérisé par quatre propriétés essentielles : l'injectabilité, la stabilité, les caractéristiques mécaniques et la durabilité. Un bref aperçu sur

l'évolution de formulations de coulis d'injection pour le renforcement des mortiers et monuments anciens est ensuite résumé.

Le deuxième chapitre présente une revue bibliographique sur les différentes approches expérimentales abordant le travail envisagé à travers tout le bassin méditerranéen.

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude expérimentale proprement dite. Nous essaierons dans cette partie d'étudier quelques formulations de coulis d'injection à base de liants minéraux, il s'agira de ciment et de chaux hydratée. L'influence d'une injection de coulis sur le comportement mécanique d'un élément de remplissage est ensuite analysée.

Enfin nous concluons ce travail en précisant ses limites et ses perspectives.

I.1 DEFINITIONS

I.1.1 Propriétés d'un coulis hydraulique :

De manière générale, un coulis peut être caractérisé par quatre propriétés essentielles :

- le pouvoir de pénétration.
- la stabilité.
- les caractéristiques mécaniques.
- la durabilité.

Dans le domaine particulier de la réparation des monuments historiques, il convient de prendre en compte les conséquences esthétiques entraînées par l'utilisation de coulis.

I.1.1.1 Pouvoir de pénétration

La première condition que doit satisfaire un coulis d'injection porte tout naturellement sur son aptitude à pénétrer dans le milieu à injecter. Deux paramètres prépondérants vont influencer la pénétrabilité d'un coulis :

- la granularité de sa phase solide.
- ses caractéristiques rhéologiques (fluidité).

Pour qu'une suspension granulaire plus ou moins concentrée, comme l'est un coulis hydraulique puisse être injectée, il est en effet tout d'abord indispensable que la granularité de sa phase solide soit compatible avec les dimensions minimales des fissures ou des cavités de la structure à réparer.

Les caractéristiques d'injectabilité sont également fortement conditionnées par les propriétés rhéologiques du coulis. La fluidité doit en particulier être telle que l'injection puisse être réalisée sous faible pression de telle sorte que l'on ne dégrade pas davantage la structure à réparer.

I.1.1.2 Stabilité

La stabilité traduit l'aptitude d'un coulis à garder son homogénéité pendant la durée de l'injection et jusqu'à la fin de la prise.

Lorsque l'on remplit un récipient avec un coulis les grains de la phase solide, plus dense que l'eau ont tendance à sédimenter. Outre cet effet de la pesanteur, les particules solides sont également soumises à des forces d'origines diverses. Notons en particulier les forces de frottement et les forces d'origine électrostatiques. Cet ensemble de sollicitations va entraîner le coulis vers l'un des trois états d'équilibre schématisés par la figure 1.1.

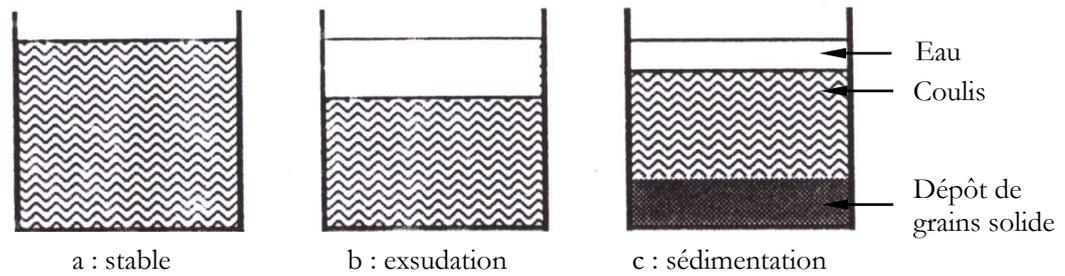


Figure 1.1 : Etats d'équilibre d'un coulis

Dans le cas de la figure (a), le coulis reste homogène. Nous dirons alors qu'il est parfaitement stable. Dans le cas (b), le contenu du récipient est composé de deux phases distinctes. La suspension, restée homogène, est ici surmontée d'une couche d'eau exsudée. Cette couche représente la quantité d'eau qui n'a pu être retenue par la suspension. Cette eau excédentaire ne peut avoir que des conséquences négatives sur le maintien de l'homogénéité du coulis en cours d'utilisation. Une formulation de coulis ne sera ainsi considérée comme stable que si la quantité d'eau exsudée reste inférieure à une valeur limite. Cette valeur limite dépend du domaine d'application de l'injection. A titre d'exemple, les normes françaises NF P-18 359 portant sur les coulis d'injection pour précontrainte prévoient que la quantité d'eau ressuée ne doit pas représenter plus de 2% du volume total du coulis. Dans le cas des monuments en maçonnerie, l'injection est réalisée dans un milieu constitué de matériau dont la porosité peut être importante, cette porosité entraîne l'absorption d'une quantité non négligeable de l'eau du coulis. Ces observations vont conduire à considérer comme tolérable une valeur du taux d'exsudation de l'ordre de 5% [A.E. Miltiadou., 1990]

Dans le cas schématisé par la figure (c), la suspension n'est pas homogène. Nous pouvons constater ici dans le fond du récipient un dépôt constitué par les grains les plus lourds de la phase solide. Cette sédimentation, survenant le plus souvent de manière relativement rapide, n'est pas acceptable pour un coulis d'injection.

Un coulis est ainsi généralement dit stable s'il présente une exsudation faible et une absence de sédimentation.

1.1.1.3 Injectabilité

Un coulis hydraulique est dit « injectable » dans des fissures ou des cavités s'il possède un pouvoir de pénétration satisfaisant et s'il est stable.

1.1.1.4 Caractéristiques mécaniques

L'objectif essentiel d'une injection de coulis est le plus souvent la restauration, voir l'amélioration de la capacité d'une structure à résister aux sollicitations qu'elle reçoit. L'aptitude du coulis à renforcer les caractéristiques mécaniques du milieu traité constitue ainsi un point particulièrement important. Elle sera conditionnée par les caractéristiques mécaniques intrinsèques du coulis et par ses propriétés d'adhérence au milieu injecté.

1.1.1.5 Durabilité

L'évolution à terme des produits injectés et leur résistance aux milieux agressifs conditionne la pérennité de la réparation effectuée. On conçoit facilement que cette propriété doit être étudiée avec un soin tout particulier dans les cas où la restauration porte sur des monuments historiques.

I.2 COMPOSITION ET NATURE DES COULIS HYDRAULIQUES

I.2.1 Description des principaux constituants

Généralement, on appelle coulis hydraulique les suspensions de ciment dans l'eau. Les propriétés de ces coulis peuvent être modifiées par l'adjonction d'éléments divers et d'adjuvants. Nous allons, ci-dessous, décrire de manière schématique la nature et le rôle de ces différents constituants.

I.2.1.1 Ciments

Le ciment est le constituant de base. Par ses propriétés liantes, c'est lui qui donnera au coulis sa résistance et par conséquent son aptitude à réparer une structure dégradée.

Les ciments sont généralement constitués par du clinker broyé (ciment Portland) ou par un mélange de clinker et des constituants secondaires comme des laitiers de haut-fourneau, des pouzzolanes ou des cendres volantes. Les clinkers se composent essentiellement de silicate tricalcique (C_3S), de silicate bicalcique (C_2S), d'aluminate tricalcique (C_3A) et d'alumino-ferrite (C_4AF). La norme française NF P15301 définit différentes catégories de ciment, une catégorie étant caractérisée par les résistances mécaniques atteintes à des échéances déterminées.

Dans les catégories, nous pouvons en particulier distinguer :

- les ciments Portland artificiels contenant au moins 97% de clinker notés CPA,
- les ciments Portland à constituants secondaires contenant plus de 65% de clinker notés CPJ,
- les ciments à forte teneur en laitier (moins de 20% de clinker, plus de 80% de laitier) notés CLK.

Les classes de résistance sont définies dans une fourchette faisant intervenir la résistance à la compression minimale et maximale à 28 jours. Les dénominations 35, 45, 55 font ainsi référence au milieu de la fourchette ± 10 à 28 jours exprimée en MPa.

Le type de ciment utilisé pour un coulis d'injection est choisi en fonction de plusieurs critères parmi lesquels nous pouvons citer :

- la granularité,
- la résistance aux milieux agressifs éventuellement rencontrés sur le site à réparer.
- les caractéristiques mécaniques espérées.
- l'aptitude à la prise sous faible concentration.

I.2.1.2 Additions diverses

Des éléments de nature diverse peuvent être utilisés en addition du ciment pour constituer la phase solide d'un coulis hydraulique. Réduction des coûts et amélioration des caractéristiques des coulis constituent les deux principales motivations pour l'utilisation de tels éléments additifs. Parmi les plus employés, nous pouvons citer :

- Les pouzzolanes

Les pouzzolanes sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux qui ne possèdent pas en eux même de propriétés liantes mais qui, sous forme finement divisée et en présence d'humidité, réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former des composés stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [Lea F.M., 1956]. Cette réaction pouzzolanique confère donc à ces matériaux un rôle actif entraînant un certain nombre de conséquences favorables sur le comportement des coulis. D'un point de vue mécanique, si le remplacement d'une partie du ciment par un matériau pouzzolanique réduit les résistances à court terme, on note par contre généralement une augmentation des résistances à long terme, [Kalogeras A.N. et col., 1958], [Fticos Ch., 1977], [Massazza, 1980], [Furlan V. et col., 1982]. Par ailleurs, l'absorption de la chaux libérée par l'hydratation du ciment donne au matériau durci une meilleure résistance à l'action des eaux pures et des eaux agressives [Nicolaidès N., 1958], [Venuat M., 1984]. Les coulis hydrauliques constitués par une association ciment-

pouzzolanes pourront ainsi avoir de meilleures propriétés de durabilité que les coulis de ciment pur [Bowen M., 1981].

Les pouzzolanes peuvent également avoir un effet bénéfique sur le comportement des coulis à l'état liquide. Leur réactivité étant d'autant plus importante qu'elles sont finement divisées [Kalogeris A.N. et col., 1958]. Cette finesse va entraîner une augmentation de la cohésion du coulis par conséquent une amélioration de sa stabilité.

- Les fumées de silice

Les fumées de silice sont des sous-produits de l'industrie du silicium et de ses alliages récupérés dans les fumées produites par les fours électriques de fabrication de ces alliages. Leur composition dépend de la nature de l'alliage produit et de son procédé d'élaboration. Elle est cependant caractérisée par une forte teneur en dioxyde de silicium (SiO_2) généralement comprise entre 85 et 98% [Sellevold E.J., 1987].

Ce matériau est également caractérisé par l'extrême finesse de ses particules (diamètre moyen = $0,2 \mu\text{m}$) dont la forme est presque parfaitement sphérique.

Les surfaces spécifiques mesurées par la méthode B.E.T. s'échelonnent entre 13 et $30 \text{ m}^2/\text{g}$ [Malhotra V.M. et col., 1987]. La masse spécifique est celle de la silice amorphe soit environ $2,2 \text{ g}/\text{cm}^3$.

Outre leur réactivité pouzzolanique très élevée, ces matériaux doivent également leurs performances à leurs particularités granulaires.

Quelques auteurs [Aitcin P.C. et col., 1984], [Domone P.L. et col., 1986], [Ranisch E.H. et col., 1989] ont également étudié les effets d'une addition de fumée de silice sur les caractéristiques des coulis d'injection. Ils montrent en particulier l'effet bénéfique de cet ajout sur la stabilité des coulis et sur les résistances mécaniques obtenues. Paillère et col. [1986] montrent les perspectives offertes par ce matériau pour améliorer l'injectabilité des coulis hydrauliques dans les fines fissures.

1.2.1.3 La chaux aérienne

La chaux possède des propriétés qu'il peut être intéressant de prendre en compte pour certaines applications particulières. Sa finesse (surface spécifique Blaine comprise entre $0,8$ et $1,2 \text{ m}^2/\text{g}$) peut en particulier être mise à profit pour diminuer l'exsudation et la sédimentation des coulis de ciment [Duriez M. et col., 1961], [Vénuat M., 1976].

Par ailleurs, dans le cas de réparation de monuments historiques, sa couleur blanchâtre permet l'obtention de coulis dont la teinte peut être adaptée aux contraintes esthétiques imposées. La contrainte de compatibilité aux mortiers anciens (dont le liant est composé principalement de chaux) est également écartée.

1.2.1.4 Adjuvants

Les adjuvants sont utilisés (dans le cas des coulis hydrauliques) pour améliorer les caractéristiques d'injectabilité. Leur choix sera ainsi essentiellement conditionné par leur aptitude à :

- défloculer les fines particules de la phase solide du coulis,
- améliorer les caractéristiques rhéologiques du coulis (fluidité).

Parmi les adjuvants classiques actuels, ceux communément appelés « fluidifiants » ou « super plastifiants » semblent correspondre le mieux à ces exigences [Malhotra V.M., 1979], [Paillère A.M., 1984].

Les fluidifiants du commerce sont élaborés à partir de résines de synthèse à masses moléculaires élevées. Celles ci peuvent dans la plupart des cas se ranger dans l'une des deux catégories suivantes :

- mélamine sulfonée formaldéhyde,
- naphthalène sulfoné formaldéhyde.

1.2.1.5 L'eau

Ce composant nécessaire à la fabrication des coulis doit être propre, sans impuretés (eau potable) ou autres produits nuisibles aux effets des liants. L'eau de mer, ou l'eau pure et celle contenant des matières chimiques ou organiques sont à exclure.

1.2.2 Nature de la suspension d'un coulis de ciment

Un coulis hydraulique se présente sous la forme d'une suspension.

Les grains présents dans l'eau sont tout d'abord soumis aux actions d'origine mécaniques que sont les forces de pesanteur et les frottements liquides ou solides. Si ces forces mécaniques étaient seules à agir, les grains tomberaient sous l'effet de la pesanteur pour former au fond d'un récipient contenant le coulis un sédiment surmonté d'une épaisse couche d'eau, or il n'en est rien. Les coulis hydrauliques peuvent être stables malgré des teneurs en eau élevées. Cette stabilité nous indique qu'il n'est pas possible de considérer les grains comme neutres et qu'il faut ajouter aux efforts mécaniques les actions d'origine électrique. Cet ensemble de forces d'attraction et de répulsion s'exerçant entre les particules ou entre celles-ci et les ions présents dans le liquide va entraîner un état d'équilibre de la suspension [Bombled J.P., 1974], [Legrand C., 1982].

Notre objet n'est pas ici d'effectuer le bilan complet des forces en présence. Il est néanmoins important de rappeler l'origine des forces électrostatiques jouant un rôle essentiel dans le comportement des coulis hydrauliques.

Obtenus par broyage, les grains de ciment anhydres présentent une surface désorganisée chargée électriquement. On constate généralement que les grains de silicate (C_3S , C_2S) entrant de manière prépondérante dans la composition des ciments sont davantage chargés négativement que positivement. Dès que le ciment et l'eau sont mélangés, les produits les plus solubles passent très rapidement en solution. Ainsi, la phase aqueuse est pratiquement saturée en ions Ca^{++} , Na^+ , K^+ , SO_4^- , OH^- . Compte tenu du fait que la surface du grain est électriquement chargée, il se forme autour de celui-ci une couche d'ions cherchant à assurer la neutralité de la surface. Cette couche est appelée « couche diffuse de Gouy-Chapmann ». La densité ionique varie de manière exponentielle lorsqu'on s'éloigne de la particule pour tendre asymptotiquement vers la densité moyenne dans le liquide. La particule et le liquide environnant peuvent ainsi être assimilés à un condensateur dont le potentiel est souvent appelé potentiel ζ . Les ions entourant le grain forment un réseau enfermant des molécules de liquide. Une certaine quantité d'eau sera ainsi liée aux grains. L'existence de cette couche d'eau « liée » influence naturellement les propriétés physiques du liquide.

Outre les forces de pesanteur aux quelles ils sont soumis, les grains de ciment feront ainsi également l'objet de forces de répulsion et d'attraction d'origine électrostatique. Les forces de répulsion peuvent s'expliquer par le fait que lorsqu'on rapproche deux grains de même nature une force tendant à les éloigner apparaît, les couches diffuses qui les entourent commencent à s'interpénétrer.

Il peut également exister entre deux grains des attractions coulombiennes directes. Nous avons déjà indiqué que les grains de ciment étaient à l'état anhydre chargés électriquement. Plongés dans l'eau, les ions de la couche diffuse ont tendance à neutraliser cette charge.

Néanmoins, compte tenu des très fortes aspérités des grains, l'empilage des ions compensateurs est relativement instable. Il reste donc, et ce plutôt dans les parties anguleuses, des zones non saturées pouvant être attirées par des charges de signe opposées situées sur les faces planes des grains. Nous aurons alors des associations de type pointe-face se substituant à la couche d'eau

liée. Les grains sont ainsi naturellement enclins à se grouper en chaînes par attraction électrostatique.

Il résulte de cet ensemble de forces que l'état normal d'une suspension de grains de ciment est l'état « floculé » (figure 1.2)

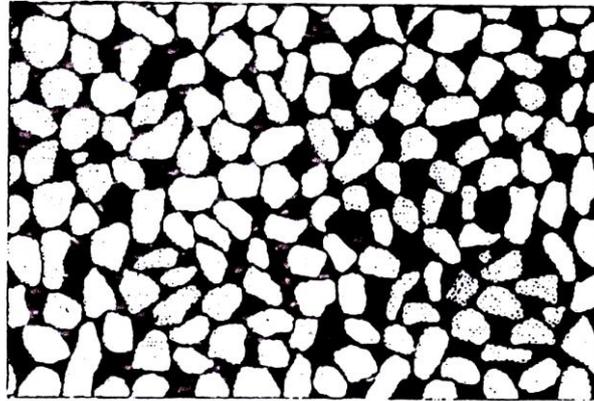


Figure 1.2 : Représentation schématique de la structure floculante de la pâte de ciment [Legrand C., 1982].

Cette floculation peut avoir un caractère défavorable vis-à-vis des caractéristiques d'injectabilité des coulis. Le rôle de certains additifs tels que les fluidifiants consiste ainsi à atténuer les effets de cette floculation en augmentant les forces de répulsion entre les grains. Les fluidifiants sont en effet généralement composés de molécules à caractère anionique ayant la propriété de se fixer sur les plages positives des grains de ciment. Bien que ces dernières soient moins importantes que les plages négatives, la dimension très grande de ces anions (10 à 60 Å) devant les ions minéraux à la surface du grain provoque une dilatation importante des couches diffuses et accroît ainsi les forces de répulsion. Ces adjuvants auront ainsi tendance à disperser les grains dans la suspension.

La floculation est essentiellement une caractéristique des particules de silicate (C_3S , C_2S). Le comportement des aluminates également contenus dans le ciment est différent. Quand les grains d'aluminate tricalcique sont plongés dans l'eau, il y a dissolution des deux constituants alumine et chaux et formation d'hydroxydes électropositifs. Tous les grains d'aluminates étant de même signe vont ainsi repousser et former un ensemble dispersé.

Les figures 1.3 et 1.4 présentées par Bombléd illustrent la différence de comportement des grains de silicate et d'aluminate.

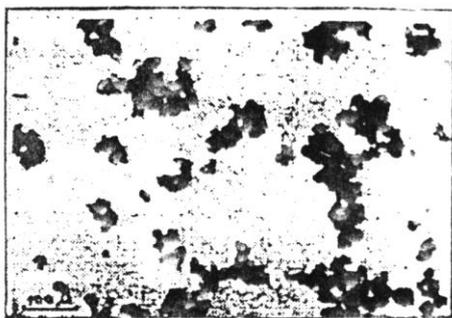


Figure 1.3 : Suspension de C_3S dans l'eau pure [Bombléd J.P., 1974].



Figure 1.4 : Suspension de C_3A dans l'eau pure [Bombléd J.P., 1974].

I.3 INJECTABILITE DES COULIS HYDRAULIQUES

Ainsi que nous l'avons indiqué, le pouvoir de pénétration d'un coulis est influencé de manière déterminante par deux paramètres essentiels : ses caractéristiques rhéologiques « fluidité » et la granularité de sa phase solide.

Ce paragraphe tente de résumer les principaux résultats publiés dans ce domaine et qui ont servi de support à notre travail.

I.3.1 Comportement rhéologique des coulis de ciment

L'importance du comportement rhéologique des suspensions de ciment est illustrée par l'abondance de la littérature consacrée à ce thème. Il convient malgré tout de noter que l'essentiel de ces publications porte sur les pâtes de ciment utilisées dans la confection des bétons et se différencie généralement des coulis hydrauliques d'injection par des concentrations plus élevées.

Compte tenu de l'ampleur et de la complexité de ce sujet, nous n'aurons pas ici la prétention de présenter une synthèse bibliographique exhaustive. Après avoir brièvement rappelé quelques définitions de rhéologie, nous tenterons cependant de mettre en évidence dans ce paragraphe l'influence des paramètres jouant un rôle sur le comportement rhéologique des coulis.

I.3.1.1 Lois de comportement [Legrand C., 1982]

D'un point de vue rhéologique, les coulis hydrauliques peuvent être assimilés à des fluides visqueux ou viscoplastiques. Leur aptitude à l'écoulement est ainsi généralement caractérisée par la courbe représentant l'évolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction de la vitesse de déformation de cisaillement $\dot{\epsilon}$. Legrand [Legrand C., 1982] schématise les différents types de modèles de comportement rhéologique auxquels obéissent le plus souvent les suspensions de ciment par la figure 1.5.

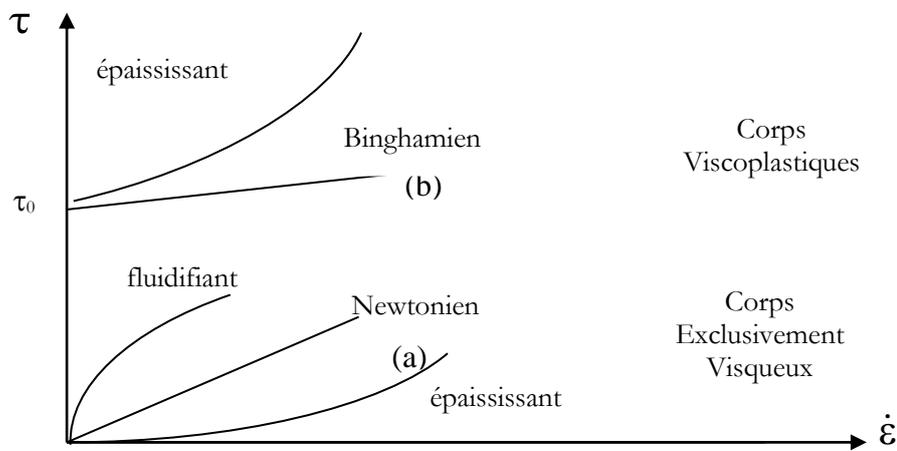


Figure 1.5 : Comportement visqueux et viscoplastique [Legrand C., 1982]

Le comportement rhéologique est dit exclusivement visqueux si l'écoulement se produit dès qu'il y a une contrainte de cisaillement non nulle. Lorsque le modèle rhéologique est une droite, le corps est dit Newtonien (courbe a, fig. 1.5).

Nous avons dans ce cas :

$$\tau = \eta \dot{\epsilon} \quad (1.1)$$

avec η : coefficient de viscosité.

Le comportement est dit viscoplastique si l'écoulement ne se produit que lorsque la contrainte dépasse une certaine valeur appelée « seuil de cisaillement ». Lorsque le modèle rhéologique est une droite, le comportement est dit « binghamien » (courbe b, fig. 1.5). La relation de comportement s'écrit dans ce cas :

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\epsilon} \quad (1.2)$$

avec τ_0 : seuil de cisaillement
 η : coefficient de viscosité plastique.

Cette relation, et par voie de conséquence les deux paramètres τ_0 et η , sont le plus souvent utilisés pour caractériser le comportement rhéologique d'un coulis hydraulique.

Certains auteurs [Costa U. et col., 1986], [Dyduch K. et col., 1987], [Shaughnessy R. et col., 1988], tiennent compte du caractère non linéaire du modèle rhéologique à l'aide de relations de comportement de la forme :

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\epsilon}^n \quad (1.3)$$

L'exposant n est ici inférieur à 1 si le coulis a un comportement « fluidifiant » et supérieur à 1 s'il a un comportement « épaississant ».

L'évaluation des paramètres rhéologiques d'un coulis hydraulique peut être compliquée par l'apparition plus ou moins marquée du phénomène de thixotropie. Ce dernier se caractérise par le fait qu'une fois franchi le seuil de cisaillement on constate généralement que l'effort nécessaire pour faire écouler le coulis à vitesse constante diminue au cours du temps. Ce phénomène traduit la destruction progressive de la structure floculée que possède une suspension de ciment au repos. Les courbes d'écoulement obtenues au viscosimètre sont dans ce cas caractérisées par une boucle d'hystérésis (fig. 1.6).



Figure 1.6 : Phénomène de thixotropie [Shaughnessy et col., 1988]

1.3.1.2 Influence de la concentration en solide

La concentration volumique en solide, notée ici C_v , se définit par la relation :

$$C_v = \frac{V_s}{V_s + V_e} \quad (1.4)$$

avec V_s : volume de la phase solide du liant.
 V_e : volume d'eau.

La concentration volumique et la teneur en eau E/L sont liées par les relations simples suivantes :

$$C_v = \frac{1}{\frac{\gamma_s}{\gamma_e} \frac{E}{L} + 1} \quad (1.5)$$

Avec E/L : rapport de la masse d'eau sur la masse du liant
 γ_s : masse volumique de la phase solide
 γ_e : masse volumique de l'eau.

Les tableaux 1.1, 1.2 donnent à titre d'exemple les concentrations volumiques correspondant à quelques teneurs en eau caractéristiques dans le cas d'un ciment dont la masse volumique est prise égale à 3,15 g/cm³ ou d'une chaux à masse volumique égale à 2,26 g/cm³.

Tableau 1.1 : Correspondance entre les paramètres E/C et C_v ($\gamma_s = 3.15$ g/cm³).

E/C	C_v
0,4	0,442
0,5	0,388
0,6	0,346
0,7	0,312
0,8	0,284

Tableau 1.2 : Correspondance entre les paramètres E/Cx et C_v ($\gamma_s = 2.26$ g/cm³).

E/Cx	C_v
0,8	0,356
0,9	0,329
1,0	0,306
1,1	0,286
1,2	0,269

La concentration volumique est assurément l'un des paramètres, voire le paramètre, ayant une influence majeure sur le comportement rhéologique des coulis. Parmi les nombreux travaux abordant cette question, il est tout d'abord intéressant de relever les contributions théoriques proposant une expression des paramètres rhéologiques en fonction de la concentration volumique dans le cas où les particules sont supposées n'avoir aucune interaction entre elles. Les relations le plus souvent utilisées sont celles d'Einstein, de Guth-Simha-Gold et de Brinkman exprimant la viscosité en fonction de la concentration volumique.

Le tableau 1.3 rappelle ces relations et leurs conditions d'application.

Tableau 1.3 : Expression de la viscosité en fonction de la concentration volumique.
 Cas de particules sphériques sans interaction
 (η_0 : viscosité du fluide contenant les particules solides).

Type	Relation	Condition d'application
Einstein [Einstein A., 1906]	$\eta = \eta_0 (1 + 2,5 C_v)$	Particules sphériques Concentrations faibles ($C_v \leq 0,05$)
Guth-Simha-Gold [Frish et Simha, 1956]	$\eta = \eta_0 (1 + 2,5 C_v + 14,1 C_v^2)$	Particules sphériques Concentrations moyennes ($C_v \leq 0,30$)
Brinkman [Brinkman H.C., 1952]	$\eta = \eta_0 (1 - KC_v)^{-2,5}$	Particules sphériques unidimensionnelles Concentrations élevées

La figure 1.7 visualise l'évolution de la viscosité en fonction de la concentration pour chacune des trois relations proposées dans le tableau 1.3.

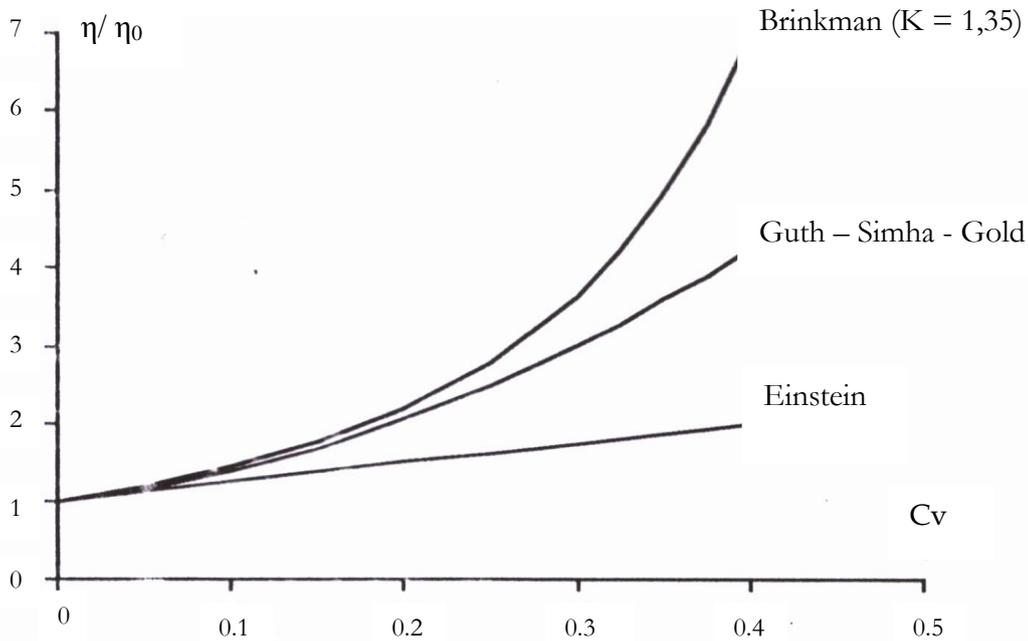


Figure 1.7 : Evolution de la viscosité en fonction de la concentration volumique

La figure 1.7 nous indique déjà que la viscosité croît de manière significative avec la concentration volumique. L'hypothèse de base sous-jacente à chacune de ces trois relations exprime le fait que les particules n'ont aucune interaction entre elles.

Nous avons pu voir dans le paragraphe I.2.2, que ceci était loin d'être vérifié dans le cas d'une suspension de ciment. Outre les efforts d'origine mécanique, les particules sont en effet soumises en particulier à des forces d'origine électrique. Ces forces étant d'autant plus importantes que les particules sont rapprochées et donc que la concentration est élevée, on imagine facilement que les paramètres rhéologiques vont croître de manière plus rapide que ne peuvent le prévoir les trois relations explicitées par le tableau 2.2. Les nombreux résultats publiés dans la littérature [Helmuth R.A., 1980], [Vom Berg W., 1979], [Ish-Shalom M. et col., 1960], [Hobbs D.W., 1976] confirment naturellement cette prévision.

Malgré leur nombre conséquent, il reste difficile d'effectuer une synthèse cohérente des publications portant sur ces problèmes rhéologiques car les résultats publiés sont relativement disparates. Cette disparité s'explique surtout par l'influence importante des conditions d'essais sur les résultats obtenus. Parmi ces conditions, nous pouvons en particulier noter :

- le type de viscosimètre considéré,
- la plage de vitesse de déformation retenue,
- la température du mélange,
- le type et la durée de malaxage,
- le temps laissé entre la fin du malaxage et la réalisation des essais.
- la nature du liant hydraulique.

A ces difficultés d'ordre expérimental viennent s'ajouter des imprécisions liées à la nature même de la loi de comportement.

Dans le paragraphe I.3.1.1, nous avons pu en effet noter que les courbes d'écoulement n'avaient pas toujours la linéarité des fluides newtoniens ou de Bingham et que de plus les suspensions de

ciment pouvaient présenter un phénomène de thixotropie. La détermination des paramètres rhéologiques et en particulier la viscosité s'avère ainsi douteuse. Il n'en demeure pas moins que tous ces résultats montrent la très rapide croissance des paramètres « seuil de cisaillement » et « viscosité plastique » en fonction de la concentration volumique. Pour illustrer cette affirmation nous avons reporté sur les tableaux 1.4 et 1.5 les résultats de Ish-Shalom [Ish-Shalom M. et col., 1962] et Vom Berg [Vom Berg W., 1979] servant très souvent de référence dans la littérature spécialisée.

Nous avons reporté également sur ces mêmes tableaux les résultats des travaux de Miltiadou [Miltiadou A, E., 1990] obtenus sur des coulis réalisés à l'aide d'un ciment CPA-55 PM. Le tableau 1.6 présente les conditions dans lesquelles ont été réalisés ces essais.

Tableau 1.4 : Expression de la viscosité en fonction de la concentration volumique.
(S_b = surface spécifique Blaine).

E/C	C_v	Viscosité plastique η (10^3 Pa.s)				
		Relation d'Einstein $\eta = \eta_0 (1 + 2,5 C_v)$	Brinkman $\eta = \eta_0 (1 - 1,35 C_v)$	Ish-Shalom $S_b = 2260 \text{ cm}^2/\text{g}$	Vom Berg $S_b = 3250 \text{ cm}^2/\text{g}$	Coulis CPA 55 PM $S_b = 3489 \text{ cm}^2/\text{g}$
0,4	0,442	2,10	9,68	39,0	300	77,2
0,5	0,388	1,97	6,39	16,0	120	28,6
0,6	0,346	1,86	4,82	12,0	45	18,3
0,7	0,312	1,78	3,92	8,5	20	11,9
0,8	0,284	1,71	3,34	5,8	9	-

Tableau 1.5 : Expression du seuil de cisaillement en fonction de la concentration volumique

E/C	C_v	Seuil de cisaillement τ_0 (Pa)		
		Ish-Shalom	Vom Berg	CPA 55 PM
0,4	0,442	81	37,0	108
0,5	0,388	39,0	10,0	27
0,6	0,346	25,0	2,8	11
0,7	0,312	9,0	1,6	8
0,8	0,284	1,6	1,0	-

Tableau 1.6 : Conditions d'essai des mesures des paramètres rhéologiques.

Type d'appareil	: Viscosimètre à cylindres coaxiaux LCPC [1985]
Vitesse de déformation	: 0 à 100 s^{-1}
Malaxage	: Malaxage à ultra-sons – durée 2 mn
Température	: $25 \text{ }^\circ\text{C}$

Le tableau 1.4 montre clairement que les viscosités plastiques mesurées pour des suspensions de ciment croissent très rapidement avec la concentration volumique et qu'elles sont toutes très largement supérieures aux résultats obtenus en appliquant une relation de type Brinkman. Ceci montre, si besoin était, toute l'importance de l'interaction entre les particules.

Le tableau 1.5 nous permet de noter le même phénomène pour le seuil de cisaillement. Il est également important de relever ici que pour les concentrations « faibles » de l'ordre de 0,3 couramment utilisées dans les coulis hydrauliques, le seuil de cisaillement devient pratiquement nul. Les coulis ont dans ce cas un comportement se rapprochant d'un comportement purement Newtonien.

1.3.1.3 Influence de la granularité de la phase solide

La finesse de la phase solide affecte également de manière importante les caractéristiques rhéologiques d'une suspension. Legrand [Legrand, 1982] attribue cela au fait que l'augmentation de la finesse fait croître de manière considérable le nombre de liaisons intergranulaires. A concentration volumique égale, ce nombre de liaisons est essentiellement fonction du nombre de grains par unité de volume. A partir d'un modèle constitué de sphères identiques, Legrand montre que ce nombre de liaisons est une fonction du cube de la surface spécifique :

$$n = K S_b^3 \quad (1.6)$$

avec n : nombre de liaisons par unité de volume
 S_b : surface spécifique Blaine.

Les travaux expérimentaux de Vom Berg [1979] confirment ce résultat. Ce dernier propose en effet des relations exprimant le seuil de cisaillement et la viscosité initiale en fonction de la surface Blaine ayant la forme suivante :

$$\tau = A S_b^{3,83} \quad (1.7)$$

$$\eta = B S_b^{2,47} \quad (1.8)$$

Dans ces relations les coefficients A et B dépendent principalement de la concentration volumique de la phase solide.

La concentration volumique et la granularité de la phase solide sont assurément deux des facteurs les plus importants jouant un rôle sur les caractéristiques rhéologiques des coulis. Ces deux paramètres déterminent ensemble la distance moyenne séparant deux particules solides du coulis. Bombléd [1974] donne une relation permettant d'estimer cette distance intergranulaire (e) :

$$e [\mu\text{m}] = 2.10^{+4} (E/C - 0,12) / S_b \quad (1.9)$$

avec S_b : surface Blaine de la phase solide exprimée en cm^2/g .

Le tableau 1.7 donne ainsi quelques distances intergranulaires moyennes estimées à l'aide de la relation (1.9) pour diverses valeurs de E/C et de la surface Blaine.

Tableau 1.7 : Distance intergranulaire moyenne (μm)

$S_b(\text{cm}^2/\text{g})$ E/C	4000	6000	8000
0,5	1,90	1,27	0,95
0,75	3,15	2,10	1,57
1	4,40	2,98	2,20

Dans le paragraphe précédent I.2.2, nous avons vu que sous l'effet d'un ensemble de forces d'origine électrostatiques, une certaine quantité d'eau «liée» entourait chaque particule de ciment (fig. 1.8)

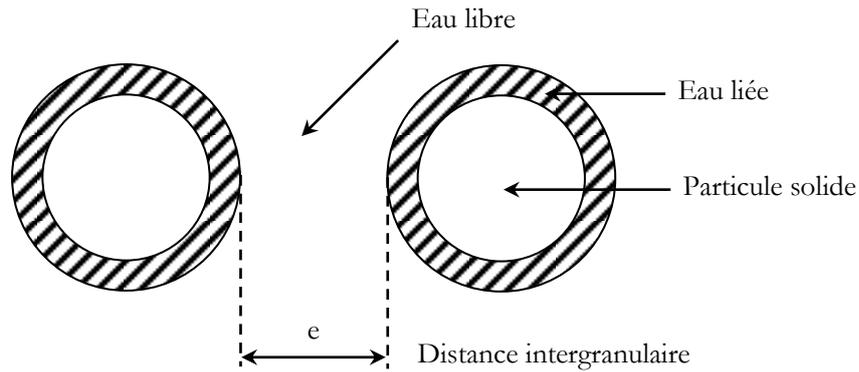


Figure 1.8 : Distance intergranulaire dans une suspension de ciment.

La viscosité de cette eau liée est naturellement beaucoup plus importante que celle de l'eau libre. Il apparaît ainsi clairement que les caractéristiques rhéologiques du coulis dépendront du volume d'eau libre restant et de ce fait de la distance intergranulaire e .

Bombléd [1974] note ainsi que, si pour un même clinker broyé à différentes surfaces spécifiques, on cherche les teneurs en eau nécessaires pour obtenir une valeur constante du seuil de cisaillement, on trouve qu'à τ constant correspond une valeur de la distance intergranulaire e sensiblement constante (tableau 1.8).

Tableau 1.8 : Distances intergranulaires moyennes pour différents coulis caractérisés par un seuil de cisaillement constant et égal à 30 Mpa [Bombléd J.P., 1974]

S_b (cm ² /g)	E/C	e (μm)
2350	0,350	0,85
2780	0,440	1,10
3290	0,475	1,10
4425	0,550	1,00
5600	0,580	0,90

La forme des particules peut également jouer un rôle appréciable sur les caractéristiques rhéologiques des coulis. Helmuth [1980] exprime le seuil de cisaillement τ en fonction de la concentration volumique à l'aide de la relation suivante :

$$\tau_0 = A e^a (C_v - 0,5) \quad (1.10)$$

Il trouve ainsi que le coefficient «a» passe de la valeur 23 pour des particules sphériques à la valeur 48 pour des particules anguleuses.

1.3.1.4 Influence d'une addition d'adjuvant

De manière extrêmement schématique, nous avons déjà indiqué que le rôle essentiel des adjuvants et en particulier des superplastifiants consistait à inhiber autant que faire se peut les interactions électriques entre particules, en entourant ces dernières d'une sorte de « film protecteur » tendant à substituer aux forces d'attraction des forces de répulsion. En diminuant ces forces d'attraction entre particules, les superplastifiants contribuent ainsi à détruire la structure floculée des suspensions de ciment et par là même à diminuer de manière naturelle les valeurs des paramètres rhéologiques : seuil de cisaillement et viscosité.

1.3.1.5 Influence d'une addition d'éléments « fins »

Quand la phase solide du coulis est entièrement constituée de ciment, la mise en évidence de la nature et de l'influence des paramètres jouant un rôle prépondérant sur le comportement

rhéologique est relativement bien connue. Malgré la disparité des résultats reportés dans la littérature, nous avons pu noter que les paramètres seuil de cisaillement et viscosité augmentaient de manière très rapide avec la concentration volumique et la finesse des particules et diminuaient avec la teneur en adjuvant.

L'analyse du comportement rhéologique des suspensions dont la phase solide est hétérogène et beaucoup plus difficile à appréhender dans la mesure où il convient de prendre en compte les effets particuliers de chaque constituant ainsi que leurs interactions.

La majeure partie des études publiées dans ce domaine porte sur l'influence de deux grandes familles d'éléments additifs : les cendres volantes et les fumées de silice.

En ce qui concerne les cendres volantes, la plupart des auteurs [Hobbs D.W., 1980], [Brown J.H., 1980], [Helmuth R.A., 1986] notent qu'à concentration volumique constante les paramètres rhéologiques seuil et viscosité diminuent la plupart du temps quand la teneur en cendres contenue dans la phase solide augmente. Ce résultat pourrait sembler contraire à ce que nous avons vu dans les paragraphes précédents dans la mesure où une addition de cendres volantes augmente le plus souvent la « finesse » de la phase solide. D'après Helmuth [1980], il s'explique essentiellement par le fait que la présence des particules de cendres volantes diminue l'amplitude moyenne des forces électriques à l'origine de la structure floculée d'une suspension de ciment.

Domone et Tank [1986] ont étudié l'influence d'une addition de fumée de silice sur le comportement rhéologique de coulis de ciment. Ces auteurs montrent qu'à concentration volumique constante les paramètres rhéologiques seuil de cisaillement et viscosité augmentent avec la teneur en fumée de silice. Ils attribuent ce phénomène à l'extrême finesse des fumées de silice.

Pour compenser cet effet et obtenir des fluidités comparables à celles des coulis de ciment pur, l'utilisation de superplastifiants s'avère ainsi indispensable. Domone et Tank [1986] notent ainsi que, pour obtenir un seuil de cisaillement ou une viscosité constante, la teneur en superplastifiant doit croître de manière sensiblement linéaire avec la teneur en fumée de silice.

I.3.2 Influence de la granularité de la phase solide du coulis

Pour qu'une suspension granulaire plus ou moins concentrée, comme l'est un coulis à base de ciment, puisse pénétrer sans essorage dans les fines fissures, anfractuosités ou pores d'un matériau tel que la maçonnerie, la granularité de la phase solide du coulis doit naturellement être compatible avec les dimensions minimales de ces fissures.

Qu'il s'agisse d'injection de sols ou de réparation de structures, la plupart des auteurs [Léonard Z.F., 1961], [Cambefort H., 1977], [Gouvenot D., 1978], [Littlejohn G.S., 1983], expriment les conditions d'injectabilité d'un coulis hydraulique en comparant les dimensions des plus gros grains de la phase solide du coulis avec celles des fissures ou orifices à injecter. Ces conditions prennent ainsi le plus souvent la forme suivante :

$$d_g < d_0/C \quad (1.11)$$

avec d_g : diamètre des plus gros grains de la phase solide,
 d_0 : dimension caractéristique de l'ouverture de fissure ou orifice à injecter
 C : coefficient supérieur à 1.

Ce coefficient C exprime le fait que le diamètre des grains doit dans la pratique être « largement » inférieur à la dimension caractéristique de l'orifice à injecter. Ceci est la conséquence de phénomènes multiples parmi lesquels nous pouvons citer :

- les frottements dus à la forme irrégulière des grains,
- les liaisons électrostatiques entre particules,
- la constitution d'agglomérats par hydratation immédiate des éléments les plus fins.

Ce coefficient peut dépendre également des conditions et des domaines d'application de l'injection. Dans les publications relatives à ce sujet, le coefficient C prend ainsi des valeurs variant généralement entre 1,5 et 5.

Les premiers travaux étudiant de manière plus précise les relations pouvant exister entre la granularité de la phase solide et les caractéristiques d'injectabilité des coulis hydrauliques ont été menés au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

Paillère et Guinez [Paillère A.M. et col., 1984] montrent ainsi qu'il est possible d'obtenir des coulis de ciment parfaitement injectables à condition que les pores aient une taille de 1,5 à 2,3 fois la taille des plus gros grains de ciment. Ils montrent également, qu'à un milieu de granularité et porosité donnée, correspond un fuseau granulométrique optimal du ciment. Par ailleurs, ces auteurs mettent en évidence que l'essai à la colonne de sable sert de référence pour évaluer l'injectabilité des coulis.

Essai d'injectabilité à la colonne de sable

L'étude de la pénétrabilité d'un coulis par rapport à un milieu donné se heurte à certaines difficultés expérimentales. Il est en effet particulièrement délicat, voire impossible, de reconstituer en laboratoire un état de dégradation ou de fissuration caractéristique.

Cet essai, défini dans la norme française NF P 18-891 et dans les recommandations RILEM du TC-52 RAC, (Resin Adherence to concrete), a été mis au point par les laboratoires des Ponts et Chaussées [Paillère A.-M. et col., 1978].

L'expérience acquise sur les polymères a montré que cet essai était représentatif des difficultés qu'offre la structure des fines à la pénétration d'un produit d'injection. Il est utilisé en France dans la certification (marque NF) des produits destinés aux injections dans les fissures.

L'essai consiste à injecter le coulis sous une pression constante et égale à 0,075 MPa dans une colonne verticale en plastique transparent remplie de sable calibré (fig. 1.9). L'injection se fait à partir de l'extrémité inférieure de la colonne et l'on mesure le temps mis par le coulis pour atteindre les différents repères placés le long de celle-ci.

La pénétrabilité peut ainsi être caractérisée par une courbe $h = f(t)$ exprimant la hauteur atteinte par le coulis dans la colonne en fonction du temps.

Afin de simuler des dimensions diverses d'ouverture de fissure, on peut utiliser différentes classes granulaires de sable.

Outre le fait qu'il soit parfaitement reproductible, cet essai est par ailleurs particulièrement intéressant car il est possible d'établir des relations entre la granularité du sable utilisé dans la colonne et les dimensions d'ouverture de fissures de cavités à injecter.

Il est ainsi intéressant de préciser ici certaines considérations purement géométriques. De nombreux travaux [Dantu P., 1961] montrent que l'assemblage de grains le plus compact est l'assemblage dit « hexagonal ». En admettant que le sable utilisé pour tester l'injection soit dans cet état de compacité et que, de plus, tous les grains aient le même diamètre D.

On peut montrer par un calcul géométrique simple que le plus petit cercle inscrit entre 3 grains a un diamètre d tel que : $d = 0,15 D$.

Quand on raisonne dans l'espace en ajoutant un quatrième grain de diamètre D , on vérifie que la plus petite sphère inscriptible a un diamètre d_1 supérieur à d . si l'on considère que le milieu à injecter n'est pas déformable sous l'effet de l'injection, le plus petit passage circulaire entre grains est donc égal à $0,15 D$.

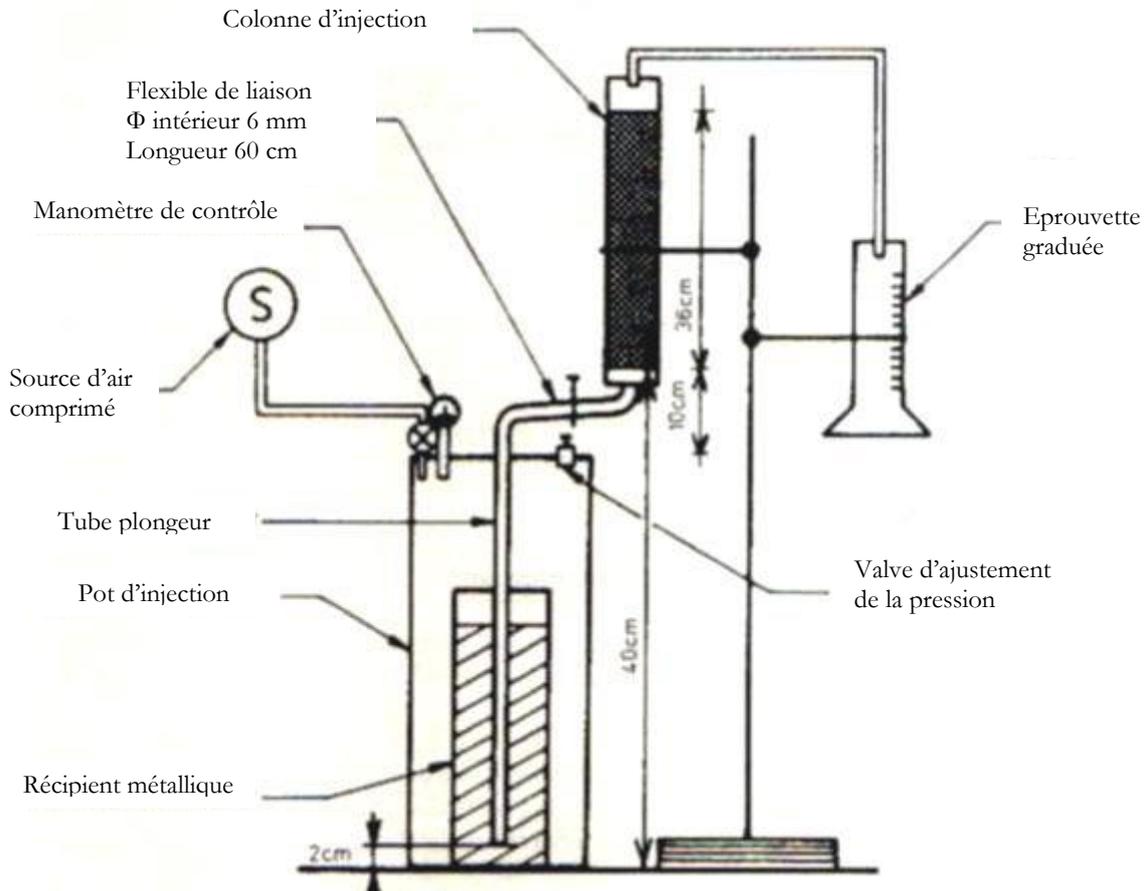


Figure 1.9: Dispositif de l'essai " d'injectabilité à la colonne de sable" (NF P 18-891)

En utilisant cette relation, nous avons exprimé la valeur de ce diamètre d pour les deux classes granulaires de sable utilisées dans cette étude (tableau 1.9)

Tableau 1.9 : Valeurs du diamètre d (μm) pour différentes classes granulaires du sable de la colonne.

Type de répartition des grains de sable	Classes granulaires du sable de la colonne	
	0,63/1,25mm	1,60/2,50mm
Tous les grains sont égaux à la borne inférieure	94	240
Tous les grains sont égaux à la borne supérieure	187	375

Ce tableau nous montre ainsi que pour un sable de classe granulaire 0,63/1,25 mm la dimension des orifices est approximativement comprise entre 0,1 mm (0,094) et 0,2 mm (0,187) tandis que

pour un sable de classe granulaire 1,6/2,5 mm cette dimension varie entre 0,25 mm (0,240) et 0,4 mm (0,375).

Pour les coulis d'injection à base de polymères (résines époxydes, polyesters, polyuréthanes, polyméthacrylate de méthyle, etc.), la norme NF P18-880 définit trois degrés de pénétrabilité différents : élevée, moyenne et lente. La figure 1.10 donne les temps de pénétration totale dans une colonne remplie d'un sable de classe granulaire 0,63/1,25mm, délimitant ces trois catégories.

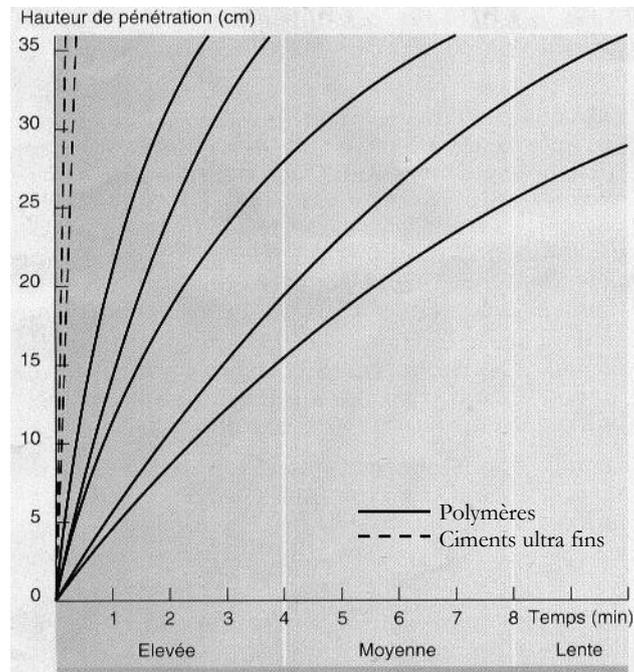


Figure 1.10 : Courbes d'injectabilité des coulis hydrauliques et des polymères.

I.4 PROPRIETES MECANIQUES DES COULIS

I.4.1 Caractéristiques mécaniques intrinsèques des coulis

Les caractéristiques mécaniques intrinsèques des coulis sont essentiellement conditionnées par les paramètres suivants :

- composition de la phase solide,
- teneur en eau,
- condition de conservation.

Outre l'influence évidente de la nature du ciment, les caractéristiques mécaniques d'un coulis sont conditionnées par la teneur des additions et par la nature de ces dernières.

Comme cela est maintenant bien connu, le remplacement d'une part de ciment par de la chaux conduit à un affaiblissement des caractéristiques mécaniques. Dans certaines applications, ces résistances moins élevées peuvent constituer un avantage dans la mesure où il n'est pas toujours opportun d'utiliser pour des travaux de restauration les matériaux les plus résistants. Par ailleurs, il faut noter que la présence de chaux permet l'obtention de matériaux moins fragiles et moins fissurables.

Les caractéristiques mécaniques des matériaux à base de liants hydrauliques dépendent de manière essentielle de la teneur en eau. La formule de Feret, dont l'efficacité est bien connue, permet d'exprimer la résistance en compression d'un mortier en fonction du rapport E/C. dans le cas où le volume des vides peut être négligé, elle s'écrit :

$$R_c = k / (1 + \rho_c E/C)^2 \quad (1.12)$$

Avec k : constante dépendant de la nature du liant et des granulats

ρ_c : densité du ciment

E/C : rapport masse d'eau sur masse de ciment.

I.4.2 Propriétés d'adhérence

L'adhérence d'un joint est une fonction de nombreux paramètres et l'influence des principaux d'entre eux a été examinée par différents auteurs.

I.4.2.1 Le support

a) *La rugosité*

Il est intuitif que ce paramètre, dont l'influence est grande sur les discontinuités rocheuses

“sèches” qu'étudient les mécaniciens des roches ou sur le frottement béton-béton [Tassios et Vintzeleou, 1987], joue aussi un rôle dans l'adhérence d'un mortier sur son support. Hsu et Slate [1963] trouvent que la résistance en traction peut varier d'environ 25% suivant l'état de surface, avec en général le classement suivant (par ordre de résistance croissante): surface polie, surface sciée, surface de cassure naturelle. Bertacchi [1970] compare cette même résistance pour une surface lisse et pour une surface artificiellement piquée, et trouve un rapport variant de 0,4 à 0,7 entre les deux.

b) *La nature minéralogique*

Les roches calcaires possèdent en général une adhérence supérieure aux roches siliceuses. Une différence pouvant varier entre 25 et 100% a été notée par de nombreux auteurs, [Hsu et col., 1963], [Taylor et col., 1964], [Alexander, 1965], [Bertacchi, 1970]. Bien entendu, ces comparaisons n'ont une signification que si l'on compare des roches de même “qualité”: porosité, homogénéité,...

c) *L'absorption d'eau*

L'absorption d'eau par la pierre (vitesse, quantité totale) possède une influence, reconnue depuis longtemps, sur l'adhérence d'un coulis [Palmer et col., 1934], [Anderegg, 1942]. Benjamin et col., [1958] considèrent que dans leurs expériences (adhérence mortier-brique), il existe un taux de succion optimum de la part de la brique, mais que la brique saturée adhère mieux avec le mortier. Ce résultat est surprenant car alors la succion est quasi nulle. Hsu et Slate [1963] ne trouvent pas de différences significatives entre brique sèche et brique saturée; il n'ont cependant étudié que des matériaux très peu poreux. Lawrence et Cao [1988] considèrent qu'une interface mortier-brique atteint un maximum d'adhérence pour une teneur en eau de 6 à 8 % dans la brique, rejoignant ainsi Sinha [1983] qui observe également un optimum de teneur en eau.

I.4.2.2 Le coulis

a) Le rapport eau/ciment

Ayant un rôle bien connu sur les caractéristiques intrinsèques des coulis, le rapport E/C influence également les résistances en traction ou au cisaillement d'un joint. De nombreux auteurs [Hsu et col., 1963], [Alexander, 1965] met ainsi en évidence une diminution des résistances lorsque E/C augmente. Taylor et Broms [1964] montrent cependant que la teneur en eau influence beaucoup moins les propriétés d'adhérence que les caractéristiques intrinsèques du mortier. Ils notent en particulier que le coefficient de frottement Φ est quasi indépendant de E/C, lequel varie pourtant de 0,36 à 0,75 dans leurs expériences.

b) Le pouvoir de rétention d'eau

Ce facteur, souvent cité, n'a guère été étudié isolément. Il est relié à la surface spécifique des particules dans le mélange solide [Détriché et col., 1981], mais il n'existe guère d'essai très sûr pour l'évaluer [Groot, 1988].

c) La qualité mécanique

S'il est établi que les propriétés de résistance du mortier ont une influence nette sur l'adhérence

(cf. les corrélations mentionnées ci-dessus), le rôle des paramètres élastiques de déformabilité

axiale ou transversale n'a guère été analysé. Par ailleurs, il conviendrait là encore de distinguer le

mortier testé sur des éprouvettes de plusieurs cm^3 pour ses propriétés intrinsèques de résistance,

et le mortier qui évolue dans un joint.

I.4.2.3 Les dimensions de la surface de contact

Du fait de l'importance des défauts ou des effets de bord, cet effet d'échelle existe très certainement [Alexander, 1965]. Il n'a cependant guère fait l'objet d'études systématiques.

I.5 TRAVAUX DE CONSOLIDATION AUX COULIS DANS LE BASSIN MEDITERANEEN [J. Mayer., 1999]

C'est dans les années 1840, alors que se mettent en place des corps d'architectes spécialisés partout dans le monde, que débutent les grands chantiers de restauration sous le contrôle du service des Monuments historiques. La doctrine de restauration est alors basée sur la dépose des maçonneries et leur reconstruction. Au cours de ces travaux, les architectes n'hésitent pas à modifier les dispositions d'origine ou à supprimer les parties d'un monument qui ne sont pas en harmonie avec leur style originel ou des parties qui leur semblaient de construction vicieuse.

A partir des années 1880, trois facteurs principaux : administratif, archéologique et technique font évoluer les principes de la restauration,

- les grands édifices sont restaurés, le nombre des édifices protégés a augmenté et les crédits ne peuvent plus être concentrés sur quelques grands bâtiments mais doivent être répartis sur un plus grand nombre,

- le développement de l'enseignement de l'archéologie fait évoluer la connaissance des monuments et sensibilisent les architectes et le public à l'authenticité d'un édifice.

Cette idée d'authenticité est défendue par Ruskin qui considère que : « la restauration signifie la destruction la plus complète que puisse souffrir un édifice ». Les travaux de restauration doivent donc assurer simplement la conservation des édifices tel que le temps nous les a transmis, sans

transformation ni reconstitution hypothétique. Ruskin, dans « Les sept lampes de l'architecture » exprime bien cette idée : « mettez y des gardes [au monument], liez le par le fer quand il se désagrège, soutenez le à l'aide de poutres quand il s'affaisse, ne vous préoccupez pas de la laideur du secours que vous lui apportez, mieux vaut une béquille que la perte d'un membre »

- Enfin l'adoption progressive du ciment armé à la fin du XIXe siècle, puis des injections de ciment liquide au début du XXe siècle, vont permettre de consolider directement les édifices en conservant l'aspect originel de leurs structures.

C'est dans ces dernières années que la ville de Tlemcen s'offre une cure de jouvence. Plusieurs édifices publics, situés à l'intérieur de la Médina (nous pouvons citer : El Mechouar, Mosquée Sidi Brahim, Djamâa El Kebir...) et en dehors (ruine de Mansourah, Bab El Karmadin...) font actuellement l'objet d'une restauration supervisée par le ministère de la culture et de la communication. Ce projet dont le coût est considérable, vise à préserver le patrimoine de la région et sauvegarder l'édifice, à faire connaître le produit culturel de la cité et à contribuer par la même à la promotion du tourisme.

Plusieurs techniques ont été élaborées dans ce projet : reconstruction (partielle ou totale), injection de consolidation, renforcement d'éléments porteurs...etc

La technique d'injection en maçonnerie commence à se répandre et faire l'objet de plusieurs travaux de rénovation, nous avons ci-après quelques photos témoignant de ce fait. C'est l'entreprise E.N.R.O.S qui entrepris les travaux.

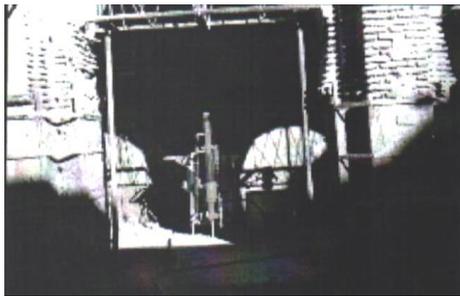


Photo 1.1 : Pompe d'injection

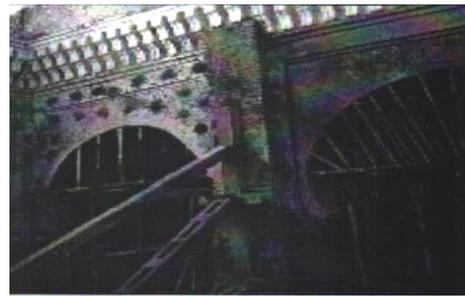


Photo 1.2 : Application de l'injection dans l'arc



Photo 1.3 : Application de l'injection dans le poteau

C'est en 1975 que la compagnie des architectes en chef des Monuments Historiques de France, à travers sa section scientifique et technique, présidé par le regretté G. Duval, a organisé des journées de travail sur la question des mortiers, coulis et injections.

C'est Mr Waldschmidt, Architecte en chef des Monuments Historiques (ex. président de la section scientifique et technique), qui en était le rapporteur. Il expliquait que la « méthode Monument Historique » consistait à « laver » les maçonneries afin d'éliminer les corps étrangers tels que brindilles, graines, etc.... et également une plus ou moins grande partie des fines (argile,

limon...). On injectait ensuite la maçonnerie à l'aide de coulis à base de chaux aérienne voir de coulis bâtard (chaux aérienne + ciment) ou, dans certains cas si nécessaire, à l'aide de ciment pur. Les techniques de malaxage et d'injection étaient très artisanales (agitation manuelle et injection par gravité à l'aide de godet)

Le 31 mai 1976, le Docteur Ingénieur Fernando Lizzi, Directeur Technique de Fondedile S.p.A donnait une conférence à la compagnie des Architectes en chef des Monuments Historiques sur la restauration statique des monuments historiques. Un des exemples fût la consolidation des maçonneries de la cathédrale d'Amalfi (Italie) dont l'extrait ci-après résume ce qu'étaient pour cette société les travaux d'injection [A. Bouineau., 1999].

« La restauration avait donc pour but de renforcer les maçonneries pour permettre la suppression des ouvrages surajoutés. Nous avons mis en œuvre un traitement « systématique ». Il convient de remarquer les bandes de maçonneries renforcées pour créer des poutres entre les bifores pour mieux répartir les contraintes et compenser ainsi l'affaiblissement dû aux nombreuses ouvertures ; aussi les arches ont été renforcées par des éléments radiaux en forme d'étriers pouvant encaisser les efforts de cisaillement.

Tous ces travaux ont comporté la mise en œuvre « d'injections armées » traversant les maçonneries dans des directions différentes et créant ainsi un réseau dense « reticolo cementato », c'est à dire réseau cimenté.

Il est évident que ce réseau incorporé aux maçonneries n'est pas visible, les trous d'injection de faible diamètre (2cm) étant obturés en surface avec un mortier gâché en utilisant les sédiments mêmes du forage. Ces perforations permettent la mise en place des barres d'armatures et injection de régénération du mortier avec remplissage des vides éventuels.

Ces injections en général sont exécutées avec un coulis de ciment additionné, le cas échéant, d'additifs ou avec des résines. Les pressions d'injection sont très faibles et soigneusement contrôlées ».

En 1979 Monsieur Jean Rocard, Architecte en chef des Monuments Historiques (France), avec la participation d'Alain Bouineau, Directeur Maçonnerie et Monuments Historiques du LEM (Laboratoire Environnement Matériaux, Saverne, France) ont étudié le renforcement des maçonneries de l'Eglise du XIIIème siècle du Château à Sainte Ménéhould, Marne (France).

Cette étude a fait l'objet d'une publication au symposium de Bologne en 1981 « The conservation of Stone II ». Mr Bouineau écrivait d'ailleurs à l'époque au sujet de la qualité des injections du passé :

« Devant un mur lézardé dont les joints sont creux, les parements gonflés et dont certains éléments tombent ou se laissent enlever à la main, quel sera le parti vers lequel se tournera le restaurateur ?

- la reconstruction
- le remaillage avec reconstruction partielle
- le remaillage limité avec consolidation
- le remplacement des pierres brisées et la mise en place de coulis au cours du travail.

Le remplacement des seules pierres disparues, le recollage de celles fissurées et la consolidation *in situ* du mur à condition qu'il ne soit pas trop déversé et devenu instable.

Les trois premières solutions qui étaient fréquemment utilisées jusqu'à la guerre de 1914 sont abandonnées aujourd'hui, sauf exception sur les chantiers normalement conduits.

Aujourd'hui en général, les entreprises qualifiées font remailler les maçonneries en montant ; le mur est garni de bas en haut par des coulis au seau avant pose des blocs de parement par fichage et coulis.

En cas de démontage, on constate après le travail une pénétration satisfaisante, les vides sont garnis, mais dans une faible zone périphérique seulement.

Le plus souvent, on utilise la chaux au lieu du ciment pour favoriser la perméabilité du mur et éviter en théorie, les dégâts dus à un mauvais cheminement de l'humidité à travers le mur et permettre son évaporation. Par ailleurs, il est souhaitable, par mesure d'économie, de limiter les reprises de pierre. Les blocs de parement écrasés sont seuls refaits, ceux fissurés sont recollés *in situ*, mais les coulis restent toujours difficiles à bien réaliser avec pour conséquence :

- liaison précaire des blocages aux parements ou de l'appareil au blocage.
- impossibilité de couler avec une garantie de pénétration suffisante une barbotine de ciment ou de chaux dosées à 1/1 en poids dans un mur fissuré. Des bouchons se forment et le débouillage est un palliatif insuffisant, le bouchon axial étant franchi, il se forme d'autres bouchons latéraux dans des diverticules invisibles et indébouchables.

Autre cause d'échec dans les maçonneries de craie très fissurées, l'eau mélangée à la poussière qui recouvre les matériaux semble former un film étanche en surface et le coulis desséché n'adhère plus ».

Les coulis d'injection qu'il a mis au point pour l'Eglise consistaient tout d'abord à injecter un coulis de bentonite-ciment qui pouvait imprégner la maçonnerie jusqu'à des vides de l'ordre du demi-millimètre.

Ensuite, un coulis à base de silicate de soude était injecté, ce dernier, beaucoup plus fluide que le précédent était capable de consolider et d'imprégner le mortier délavé de chaux aérienne ou de mortier de terre.

Cependant à cette époque, il renforçait les maçonneries anciennes, sans savoir quelle amélioration mécanique il apportait à la maçonnerie en injectant ces coulis (quelle augmentation de résistance en compression ou du module d'élasticité, de la maçonnerie ?)

Il a fallu attendre le début des années 1980 pour qu'une recherche réalisée sur des murets expérimentaux construits selon la méthode ancienne et maçonnés à l'aide d'un mélange de terre, de sable et de chaux aérienne pour avoir un début de réponse à ces questions. Cette recherche fût financée par le Ministère de la Culture et par la Fédération Française du Bâtiment. Enfin Mr. Jean Rocard, Architecte en chef des monuments historiques, coordonna l'étude. Les principaux résultats de cette étude sont les suivants :

L'injection du seul coulis de bentonite-ciment a permis d'améliorer la résistance à la compression de la maçonnerie de 20% environ. Par contre, la combinaison des deux coulis bentonite-ciment et silicate de soude a amélioré considérablement la résistance des murets de l'ordre de 350%.

Enfin, ce fût en 1988, lors de l'étude de la consolidation des fondations de l'Arc de Triomphe de Paris que sont apparus les liants ultrafins fabriqués par les Ciments d'Origny.

Cet original coulis d'injection, à base de liant ultrafins permettait de réaliser la consolidation des maçonneries et en particulier d'imprégner les mortiers délavés en une seule injection compte tenu de la grande finesse des liants.

Depuis cette date, il utilisait en général ce type de coulis pour renforcer les maçonneries anciennes.

I.6 CONCLUSION

La réparation des fissures ou des cavités dans les structures dégradées, en béton ou en maçonnerie, fait appel aux techniques et produits d'injection.

Leur utilisation dans les anciens ouvrages en maçonnerie doit cependant tenir compte d'un certain nombre de particularités liées à la spécificité de ces constructions, à la diversité des désordres constatés (fissures, dégradation des joints ou des interfaces, présence de vides) et à l'importance des volumes à injecter. Par ailleurs, la réparation des monuments historiques impose

aussi l'emploi de matériaux d'injection préservant leur qualité esthétique et dont le comportement à long terme soit connu.

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.

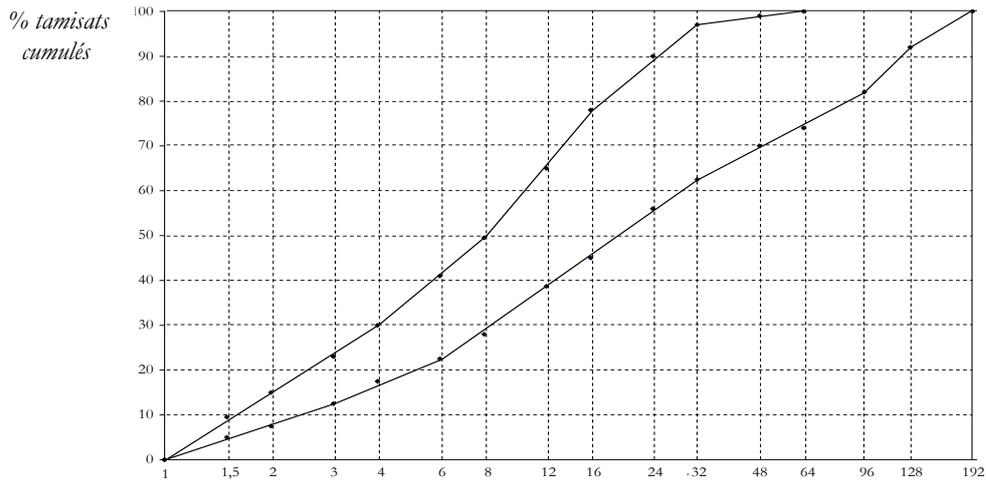


Figure 2.1 : Fuseau granulaire déterminé au granulomètre à laser.

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.

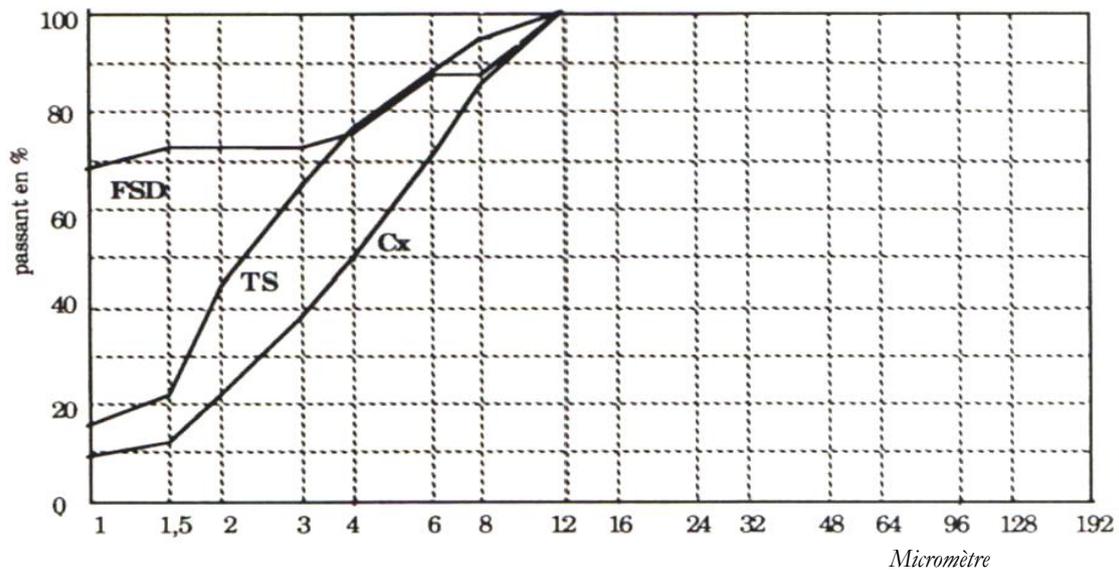


Figure 2.2 : Courbes granulométriques des éléments fins : fumée de silice densifiée (FSD), chaux (Cx) et terre de Santorin (TS)

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.

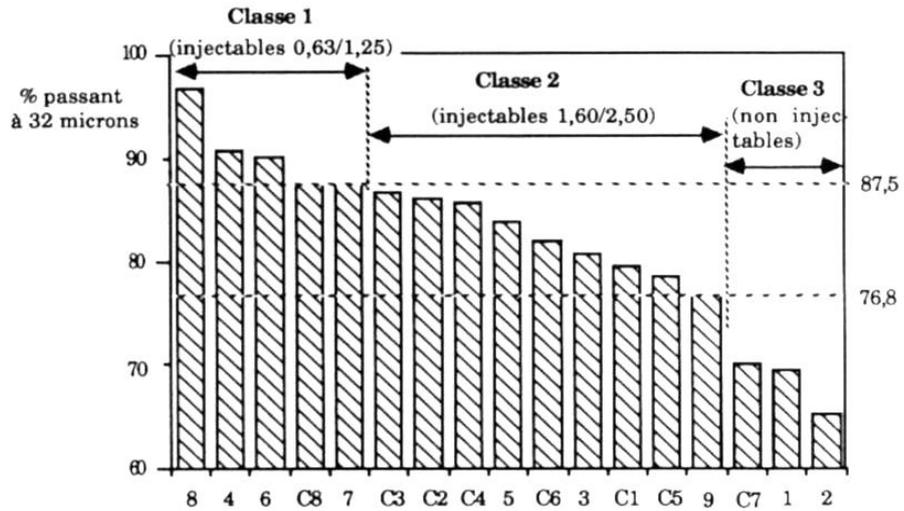


Figure 2.3 : Influence du pourcentage de passant à 32 μm sur l'injectabilité des coulis de ciment.

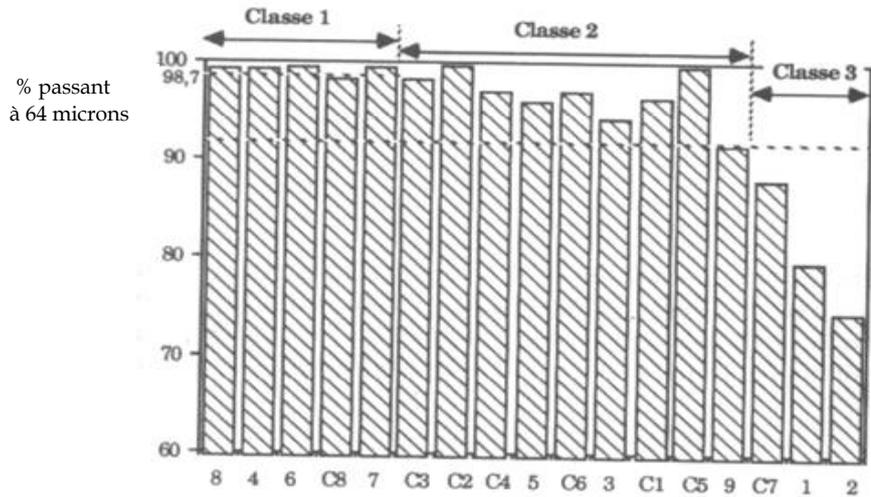


Figure 2.4 : Influence du pourcentage de passant à 64 μm sur l'injectabilité des coulis de ciment.

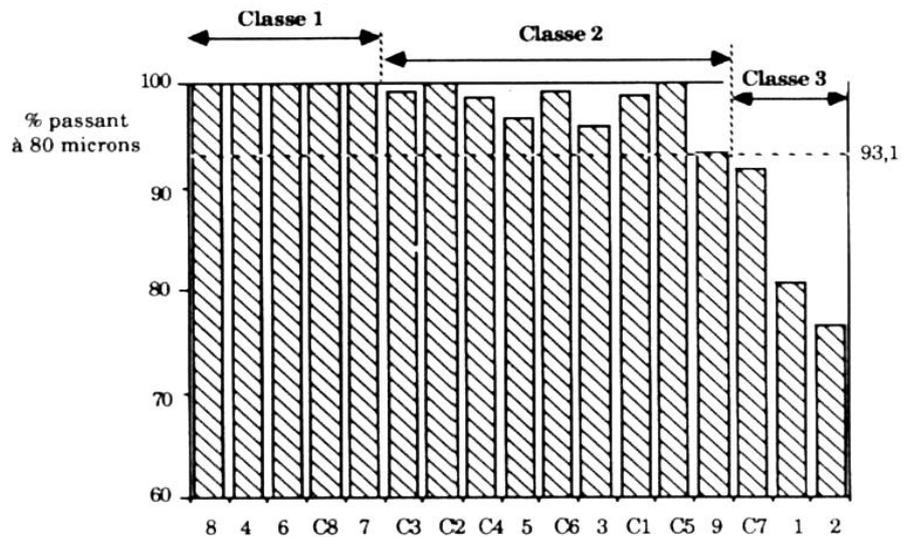


Figure 2.5 : Influence du pourcentage de passant à 80 μm sur l'injectabilité des coulis de ciment

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'ultra-fines 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'ultra-fines a également des conséquences très favorables sur la stabilité des coulis (fig. 2.6, 2.7, et 2.8)

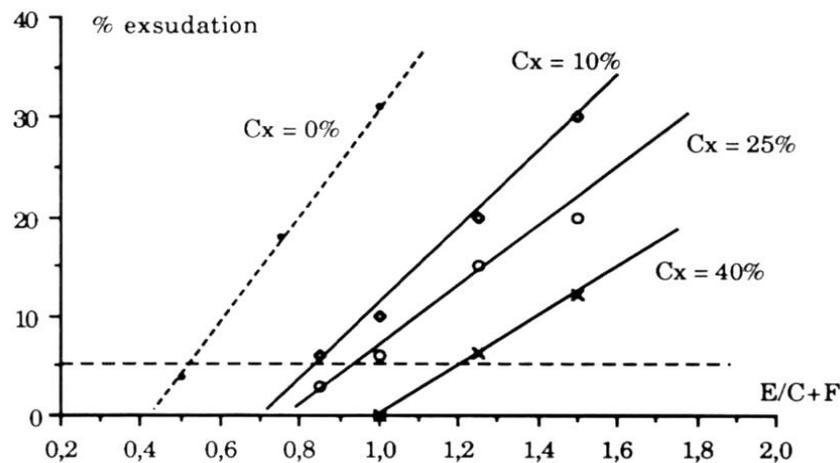


Figure 2.6 : Evolution du taux d'exsudation en fonction du paramètre $E/(C+F)$ pour des coulis constitués de ciment et de chaux.

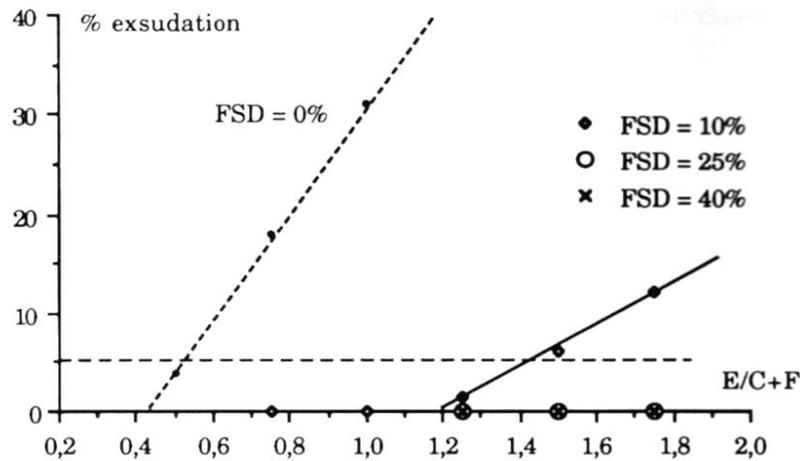


Figure 2.7 : Evolution du taux d'exsudation en fonction du paramètre $E/(C+F)$ pour des coulis constitués de ciment et de fumée de silice densifiée.

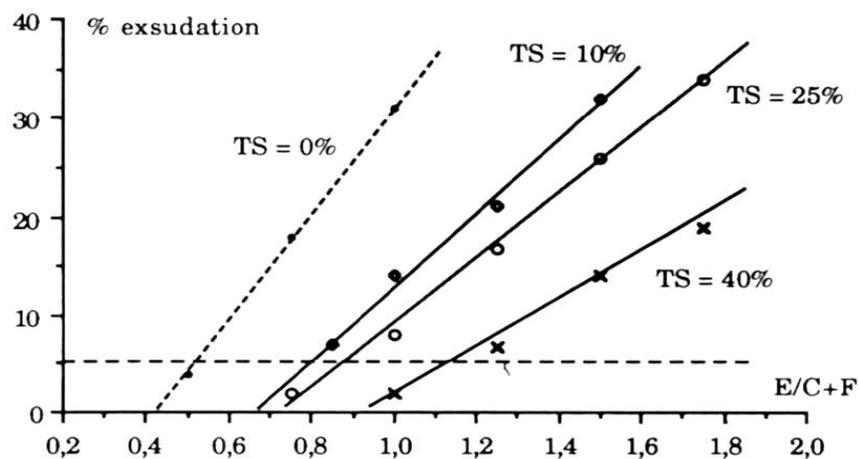


Figure 2.8 : Evolution du taux d'exsudation en fonction du paramètre $E/(C+F)$ pour des coulis constitués de ciment et de terre de Santorin.

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)

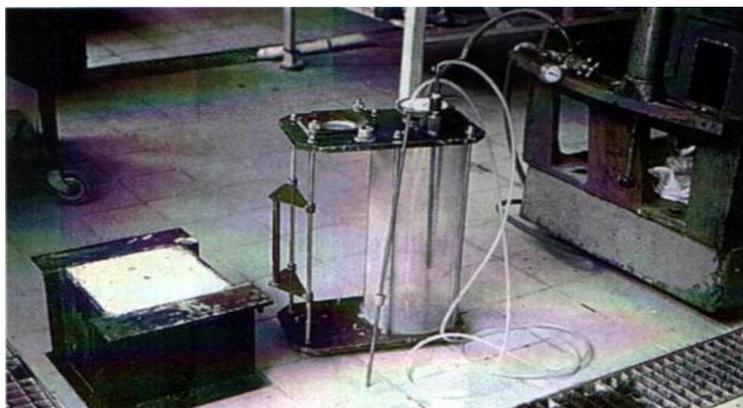


Figure 2.9 : Dispositif d'injection des éprouvettes de remplissage

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.

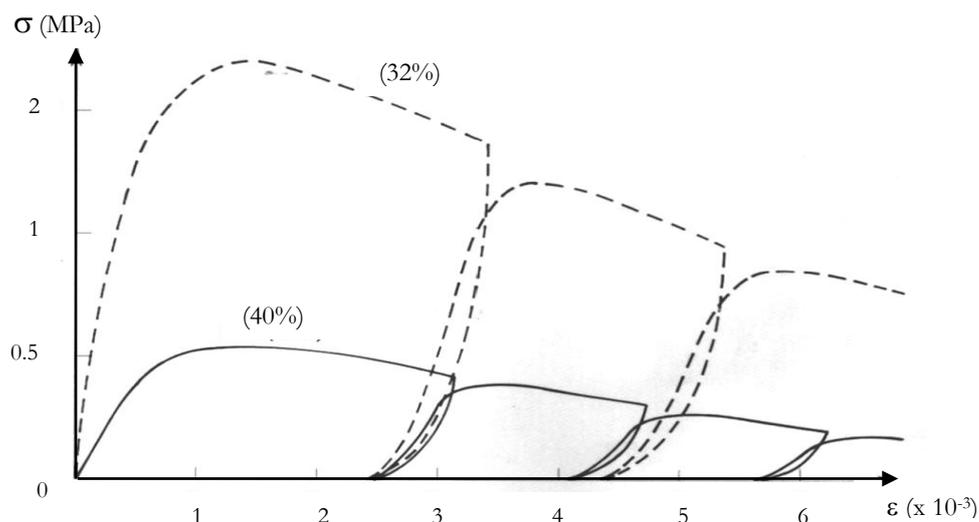


Figure 2.10 : Courbes effort-déformation obtenues en compression simple sur deux éprouvettes de référence, de porosité respectives 32 et 40 %.

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).



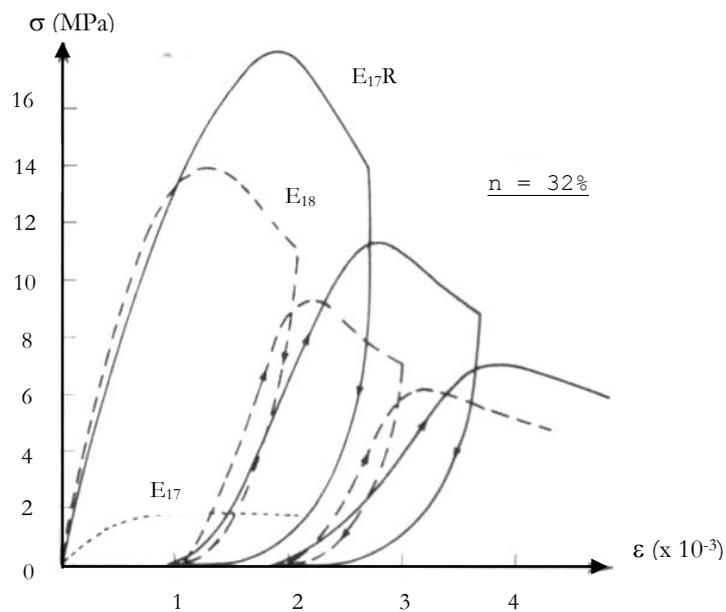
Eprouvettes injectées

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

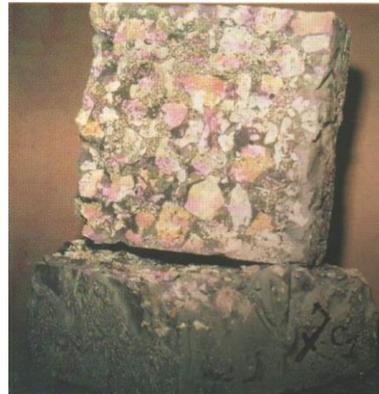


Figure 2.14 : Epreuve de remplissage injectée

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).

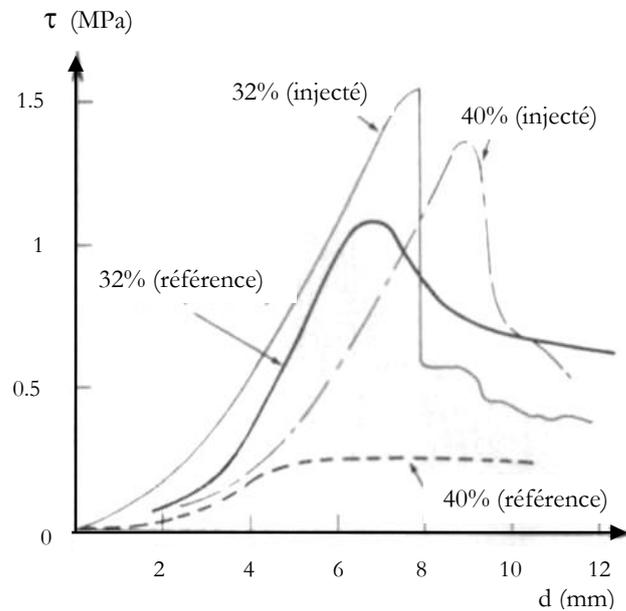
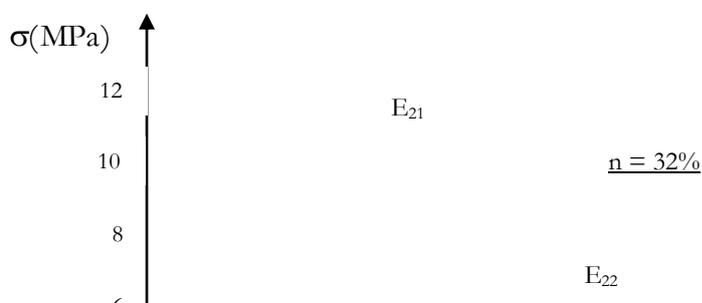
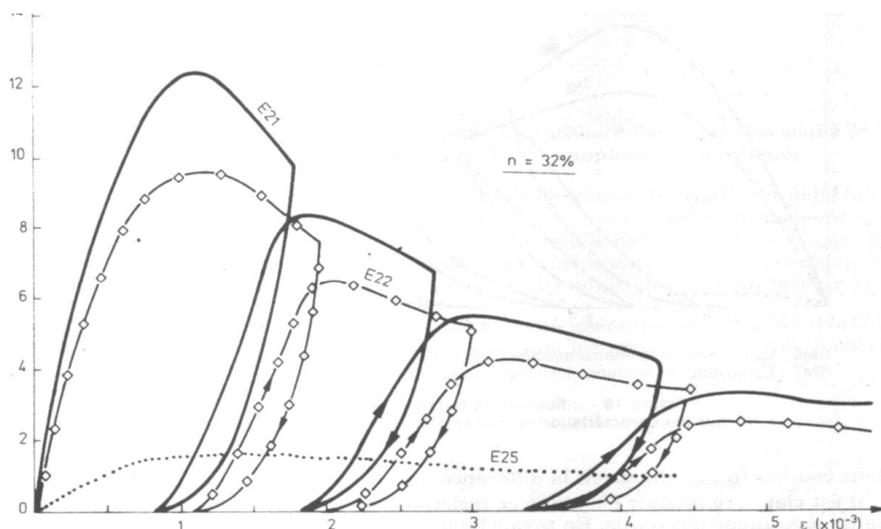


Figure 2.15 : Influence d'une injection de coulis sur les courbes effort-déplacement obtenues en cisaillement direct.

- 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'Ecuelles, 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

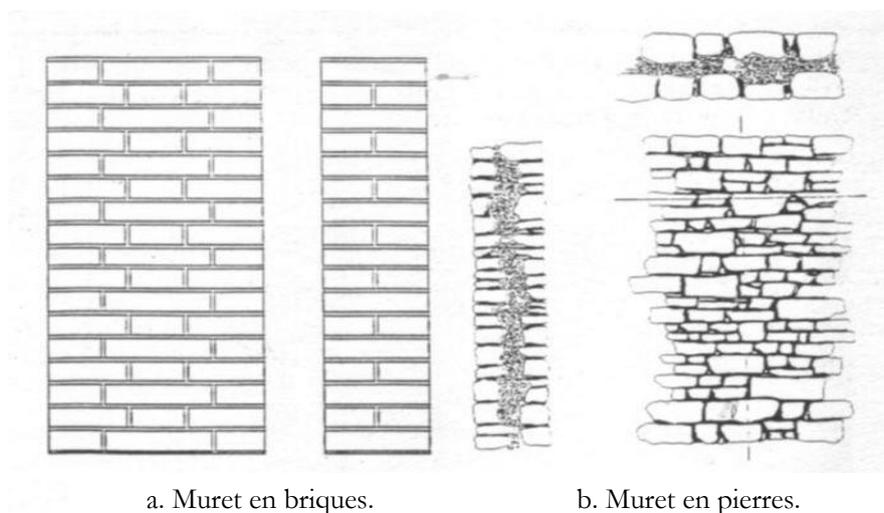


Figure 2.17 : Schémas des modes de construction des murets



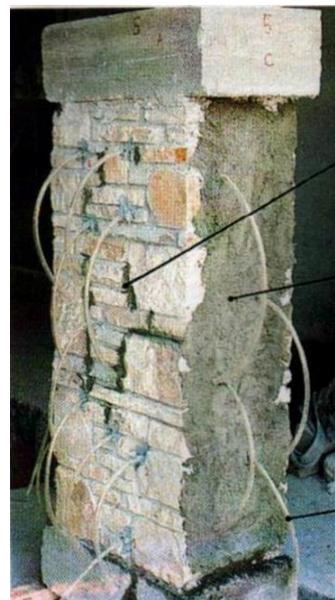
Figure 2.18 : Vue de dessus d'un muret en pierres :
vue parements et du remplissage

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).

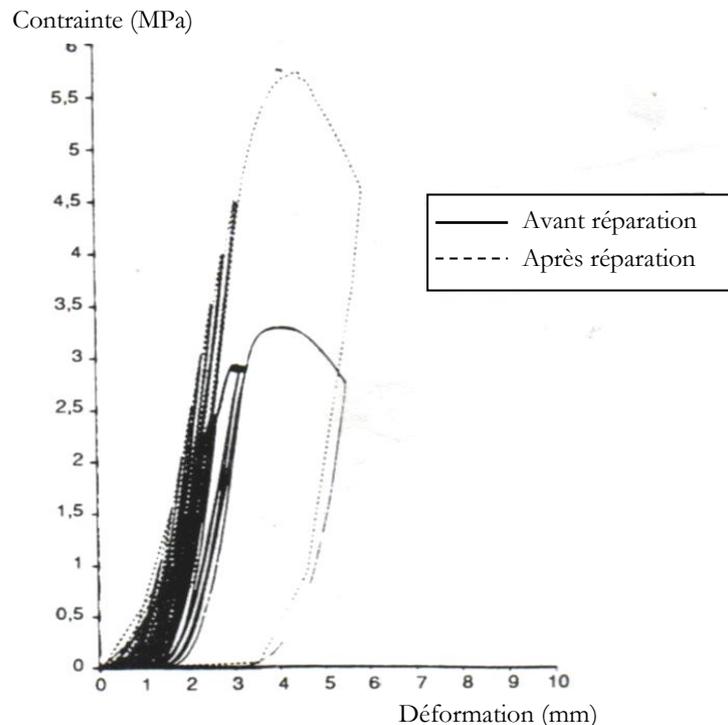


Figure 2.20 : Courbes effort-déformation.



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.

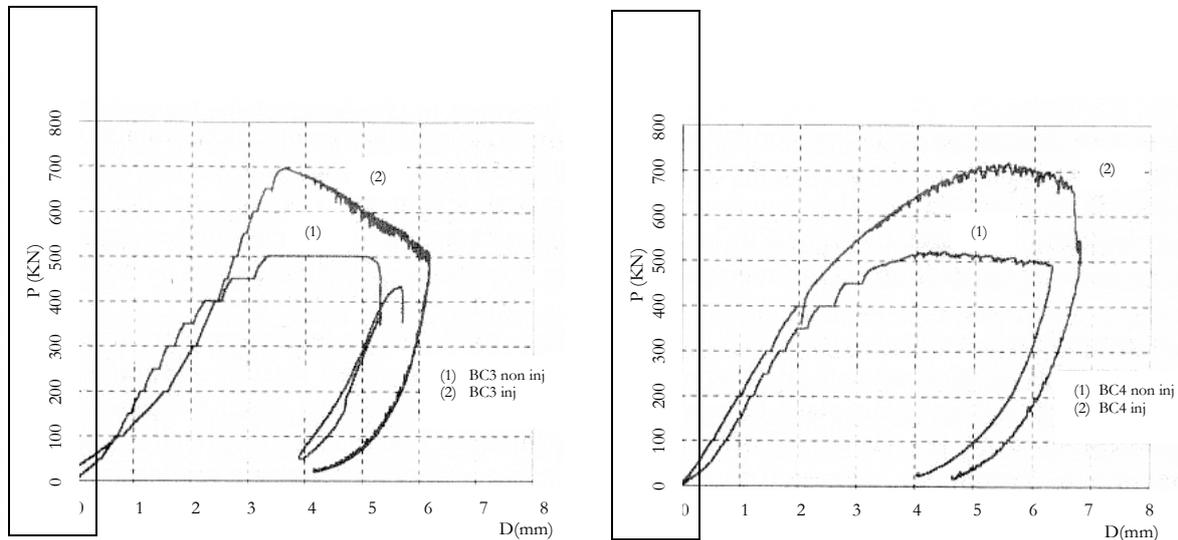


Figure 2.22 : Courbes force-déplacement des murs en brique avant et après injection
 A gauche : mur BC3 injecté au Cb-0. A droite : mur BC4 injecté au 13b-0.

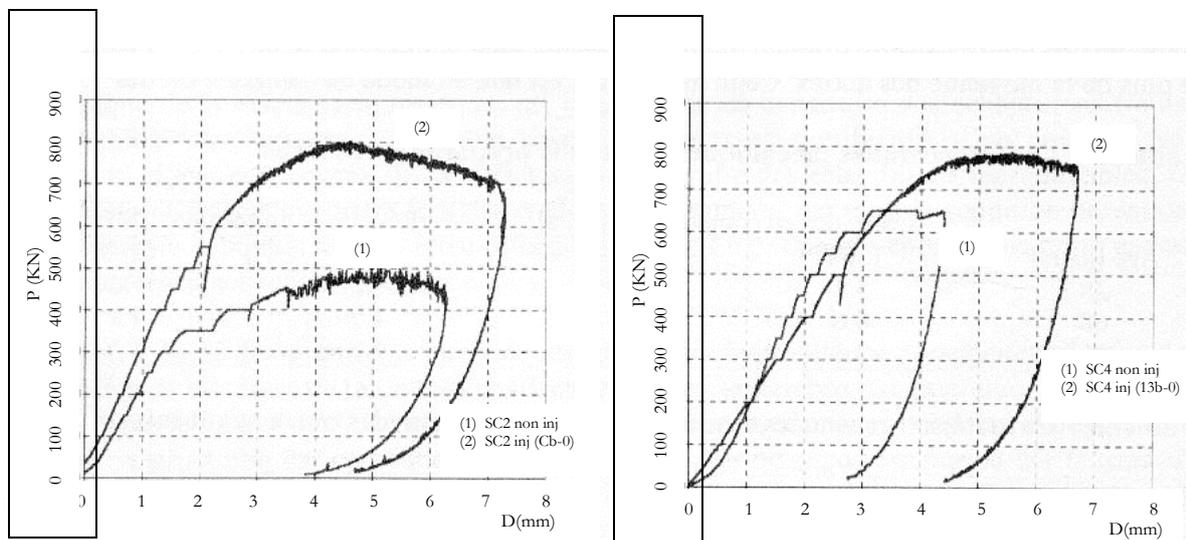


Figure 2.23 : Courbes force-déplacement des murs en pierre calcaire avant et après injection. A gauche : mur SC2 injecté au Cb-0. A droite : mur SC4 injecté au 13b-0.

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.

Chapitre III ————— CONSOLIDATION DES MAÇONNERIES : ACTION DES LIANTS MINERAUX

III.1 INTRODUCTION

Une parfaite injectabilité, une bonne durabilité, et un renforcement important de la structure, tels étaient les principaux critères de formulation de coulis pour le renforcement de la maçonnerie ancienne.

C'est dans ce contexte que nous nous proposons de réaliser une étude expérimentale permettant d'évaluer l'aptitude de pénétration de coulis dans de fines fissures.

Le comportement mécanique d'un mélange constitué de pierre et de mortier, avant et après injection de tels coulis, est ensuite analysé, dans une perspective de réparation des anciennes maçonneries.

Les coulis utilisés sont souvent à base de ciment et/ou de chaux aérienne, qui présentent l'intérêt d'être constitués d'un matériau compatible au support à réparer. Le besoin d'amélioration des caractéristiques mécaniques des maçonneries rend l'usage des liants hydrauliques incontournable. En effet, l'utilisation de liants aériens à l'intérieur de la masse de la structure ne permettrait pas le développement de résistances suffisantes à court terme d'un point de vue structurel. Néanmoins, l'utilisation de mélanges présentant un pourcentage de ciment élevé peut être inutile, eu égard aux niveaux de résistances auxquels « travaillent » les maçonneries anciennes.

A la suite de ces considérations, le choix des matériaux de base reste orienté vers la chaux hydratée, et le ciment Portland. Le but de la recherche est l'exploration du potentiel de trois combinaisons (ciment, chaux, mélange de ciment plus chaux).

III.2 ETUDE DE L'INJECTABILITE DES COULIS HYDRAULIQUES

III.2.1 Présentation des conditions expérimentales

III.2.1.1 Coulis expérimentés

La composition chimique des liants utilisés (ciment et chaux) est donnée par le tableau 3.1.

Les résultats consignés dans le tableau 3.1 nous ont été transmis par les sociétés productrices. Nous citons la cimenterie de BéniSaf pour le *CPJ-45* et la société de chaux de Hassasna (Saïda) pour la chaux éteinte.

Seule, la masse volumique absolue a été déterminée au laboratoire des MDC de la faculté des Sciences de l'Ingénieur de l'Université de Tlemcen.

Tableau 3.1 : Composition chimique et masse volumique des liants utilisés

Composition chimique	Ciment CPJ-45	Chaux éteinte
SiO ₂	24.38	0.50
Al ₂ O ₃	7.04	0.54
Fe ₂ O ₃	4.14	0.14
CaO	56.85	73.50
MgO	1.51	0.21
SO ₃	1.74	0.25
K ₂ O	0.56	-
Na ₂ O	0.51	0.09
CaO libre	1.43	-
Cl	0.006	-
Perte au feu	2.54	25
Résidu insoluble	9.68	-
H ₂ O déshydratée	-	19
ρ (g/cm ³)(*)	3.08	2.58
Surface spécifique Blaine (cm ² /g) (-)	3996	11089

(*) moyenne de trois mesures

(-) moyenne annuelle

III.2.1.2 Condition de réalisation des coulis étudiés

Nous avons dans un premier temps cherché à évaluer le procédé traditionnel de malaxage en utilisant le malaxeur *Hobart* ; type : essai de consistance de la pâte de ciment décrit par la norme EN 196-1. La quantité d'eau choisie est pesée de préférence directement dans la cuve du malaxeur. Puis on pèse la quantité de matière solide qui sera ajoutée à l'eau en un temps compris entre 5 et 10s.

Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Opérations de malaxage des coulis étudiés.

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment	Malaxage
Durée des opérations	-	5 à 10 s	180 s
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente (140 trs/min)

La pénétrabilité des coulis dépend essentiellement de deux paramètres prépondérants :

- les caractéristiques rhéologiques (ou fluidité),
- et la granularité de la phase solide du liant,

La concentration volumique est assurément l'un des paramètres, voir le paramètre, ayant une influence majeure sur le comportement rhéologique des coulis.

Rappelons que la concentration volumique en solide, notée C_v , est défini par la relation :

$$C_v = \frac{1}{\frac{\gamma_s}{\gamma_e} \frac{E}{L} + 1} \quad (3.1)$$

avec E/L : rapport de la masse d'eau sur la masse du liant

γ_s : masse volumique de la phase solide

γ_e : masse volumique de l'eau.

Nous verrons dans ce qui va suivre que la viscosité des coulis en est fortement liée. L'augmentation de la concentration volumique va entraîner une augmentation des paramètres rhéologiques.

III.2.2 Mesure de la viscosité

III.2.2.1 Viscosimètre Marsh (fig. 3.2)

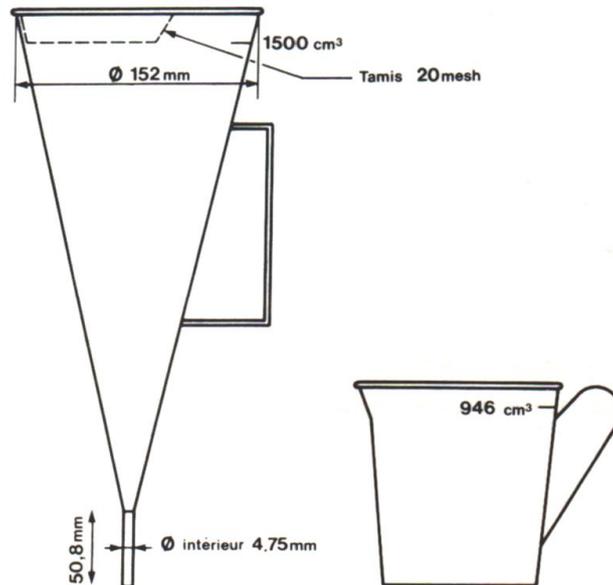


Figure 3.1 : Viscosimètre Marsh

C'est un appareil du type statique qui permet de mesurer le temps en seconde que met une certaine quantité de coulis pour s'écouler à travers l'ajutage de l'appareil qui n'est autre qu'un entonnoir normalisé. Le coulis s'écoule dans un godet gradué.

Tous les coulis considérés dans ce chapitre sont caractérisés par des teneurs en eau différentes. Ces valeurs ont été retenues à la suite d'essais préliminaires ayant porté sur la fluidité du coulis en question (du plus dense au plus fluide).

L'étalonnage du cône Marsh s'effectue avec de l'eau pure, de telle sorte que le temps d'écoulement correspondant soit égal à 30 seconde.

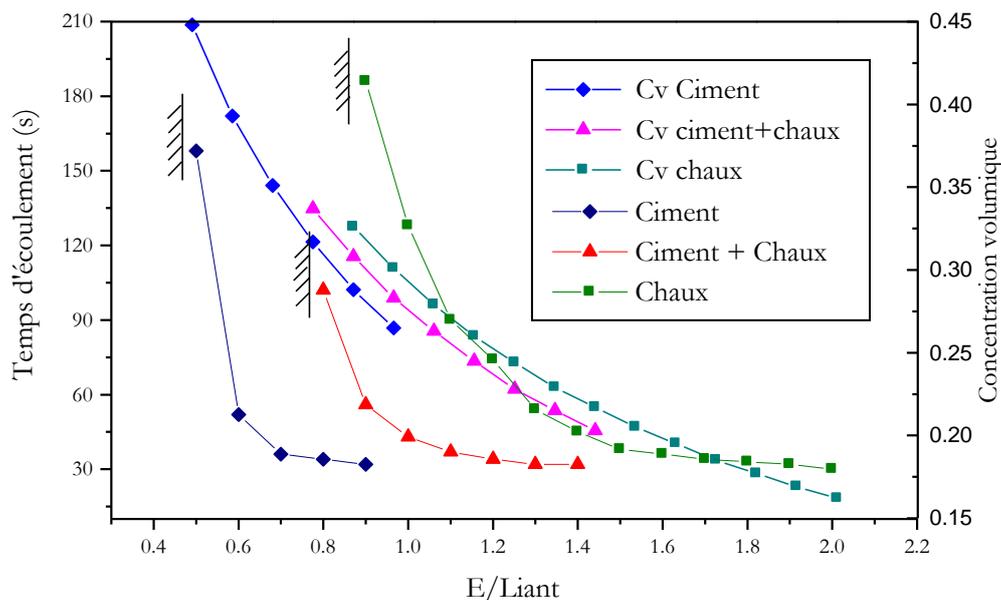


Figure 3.2 : Evolution du temps d'écoulement et de la concentration volumique en fonction du rapport E/liant

Les courbes de la figure 3.2 montrent clairement que les temps d'écoulement mesurés pour les suspensions étudiées évoluent rapidement avec la concentration volumique. Au delà d'une certaine teneur en eau le coulis ne s'écoule plus, il ne se déforme plus sous l'effet de son poids propre, et la viscosité Marsh obtenue tend vers l'infini pour un rapport E/L égal à 0.4 pour le ciment, 0.7 pour le mélange (ciment-chaux) et 0.8 pour la chaux.

A partir d'une certaine teneur en eau (correspondant à une faible concentration en solide), la viscosité diminue jusqu'à stabilisation autour des 30 secondes. C'est la viscosité de l'eau, la suspension ainsi obtenue présente le même comportement rhéologique que l'eau.

Notons tout particulièrement que le passage du coulis de ciment d'un état non déformable à un état extrêmement fluide est très rapide, ce n'est pas le cas pour les deux autres.

III.2.2.2 Viscosimètre à cylindres coaxiaux Brookfield (fig. 3.3) :

C'est un appareil à cylindres coaxiaux. La pâte cimentaire à étudier est placée entre 2 cylindres de révolution, coaxiaux, de rayons : intérieur (R_i) et extérieur (R_e) et de hauteur h . La rotation uniforme de R_i (R_e étant immobile) provoque un mouvement laminaire de cisaillement de la pâte. Cette dernière se décompose ainsi en couches cylindriques coaxiales animées de vitesses angulaires différentes, (voir fig. 3.3)

Dans le principe de mesure de la viscosité Brookfield à l'aide des mobiles classiques, la distance séparant le mobile des parois du récipient est importante. Il est donc impossible de déterminer le taux de cisaillement que subit le fluide en tout point. On parlera ici, alors de mesure de viscosité apparente, sans maîtrise du taux de cisaillement.

La viscosité étant définie comme le rapport de la contrainte de cisaillement sur le taux de cisaillement. Le taux de cisaillement n'étant pas connu, la contrainte de cisaillement ne peut être déterminée.

La lecture effectuée sur le cadran du viscosimètre correspond au % de torsion du ressort interne du viscosimètre. Cette lecture est une valeur comprise entre 0 et 100% ; elle correspond à la résistance du fluide au mouvement de rotation.

A l'aide de l'abaque fournie, cette valeur est convertie en valeur de viscosité (centipoise) en fonction de la vitesse et du mobile utilisé :

$$\text{Viscosité} = \text{TK} \cdot \text{SMC} \cdot (\text{lecture sur le cadran}) \cdot 100 / \text{RPM} \quad (3.2)$$
 avec TK : pouvoir de torsion du ressort (TK = 0,09373 dans le cas d'un viscosimètre modèle LV)
 SMC : constante caractéristique du mobile utilisé (LV1 = 6.4, LV2 = 32, LV3 = 128, LV4 = 640)
 RPM : vitesse de rotation utilisée (en tour / min)

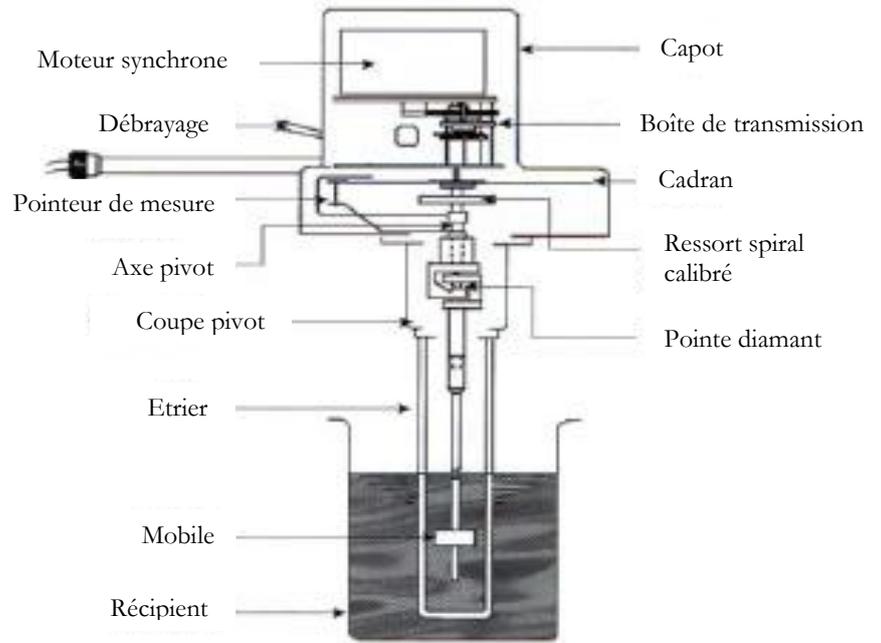


Figure 3.3 : Viscosimètre Brookfield type LVF.

Les équations fournies par Brookfield pour passer de la vitesse au taux de cisaillement à l'aide des mobiles LV ne sont données qu'à titre informatif. Ce ne sont que des extrapolations d'équation applicables à la géométrie de mesure cylindres coaxiaux (tableau 3.3)

Tableau 3.3 : Taux de cisaillement relatifs aux mobiles utilisés.

Mobile	Taux de cisaillement (rpm)
LV1	0.220
LV2	0.212
LV3	0.210
LV4	0.209

Nous présentons sur les tableaux 3.4, 3.5 et 3.6 et figures 3.5, 3.6 et 3.7 les résultats de la viscosité apparente des coulis étudiés en fonction du rapport E/Liant.

Tableau 3.4 : Viscosités relatives au coulis de ciment.

E/C	Cv	η app (centipoise)			
		6 trs/mn	12 trs/mn	30 trs/mn	60 trs/mn
0.4	0.448	62.8	35.1	19.64	15.3
0.5	0.393	38	21	12.6	8.7
0.6	0.351	19	9.5	5.6	4.4
0.7	0.317	8.5	5.75	3.41	2.3
0.8	0.288	7	3.94	2.24	1.55
0.9	0.265	5.4	2.75	1.35	0.97

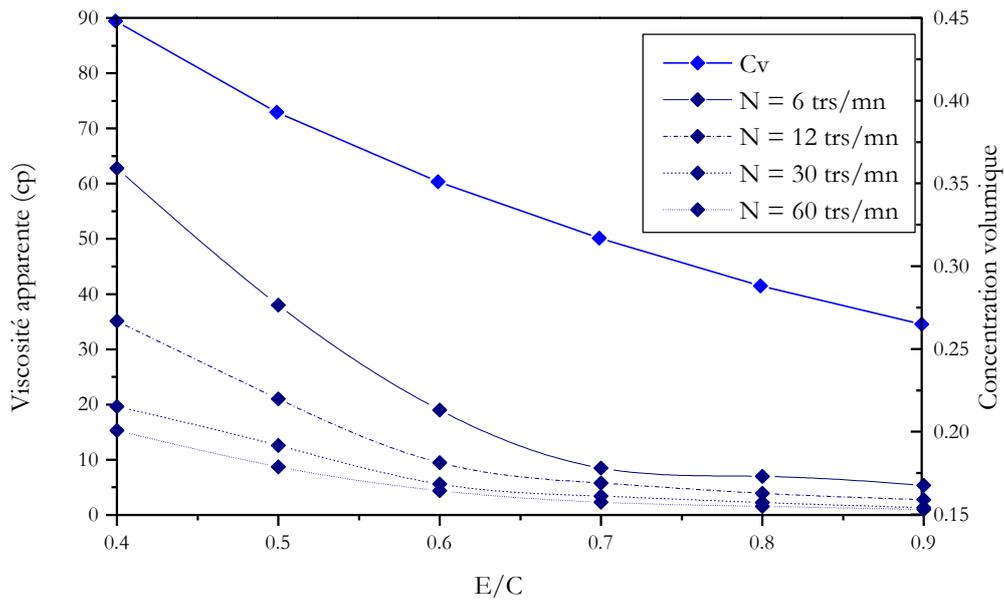


Figure 3.4 : Evolution de la viscosité apparente et de la concentration volumique en fonction du rapport E/C

Tableau 3.5 : Viscosités relatives au coulis de chaux.

E / Cx	Cv	η app (centipoise)			
		6 trs/mn	12 trs/mn	30 trs/mn	60 trs/mn
0.8	0.326	73	42	27.5	27.5
0.9	0.301	56	34.45	24.58	19.45
1.0	0.279	50.4	30	20.04	12.6
1.1	0.260	30.87	24.5	14.2	8.75
1.2	0.244	29.75	19.27	9.56	5
1.3	0.229	23.87	12.94	6.27	3.64
1.4	0.217	18.5	9.72	4.5	2.58
1.5	0.205	13.7	7.5	3.45	2
1.6	0.195	10.6	5.55	2.55	1.54
1.7	0.185	8.92	4.55	2.15	1.23
1.8	0.177	7.75	4.12	1.92	1.08
1.9	0.169	6.87	3.45	1.4	0.75
2.0	0.162	5.87	3.00	1.4	0.75

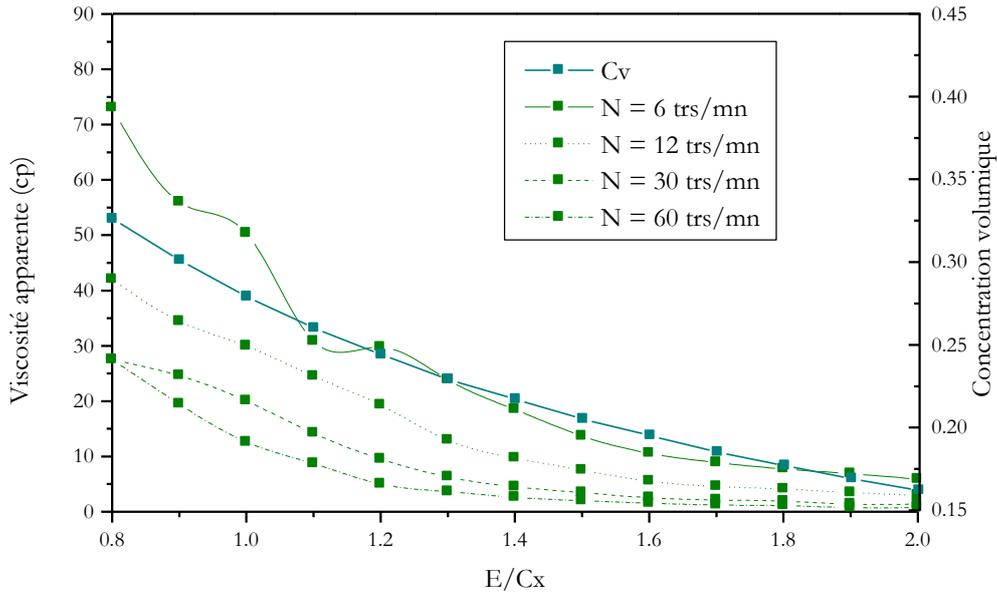


Figure 3.5 : Evolution de la viscosité apparente et de la concentration volumique en fonction du rapport E/Cx

Tableau 3.6 : Viscosités relatives au coulis de ciment + chaux (1 : 1).

E/C+Cx	Cv	η app (centipoise)			
		6 trs/mn	12 trs/mn	30 trs/mn	60 trs/mn
0.7	0.337	80.0	37.5	17.5	14
0.8	0.308	33	23.6	16.8	12.1
0.9	0.283	26	17.5	10.3	6.64
1.0	0.263	20	11.75	6.7	3.8
1.1	0.245	15.6	9.35	4.8	2.84
1.2	0.228	11	6	2.85	1.72
1.3	0.215	6.75	3.5	1.85	1.22
1.4	0.203	5	2.65	1.45	0.9

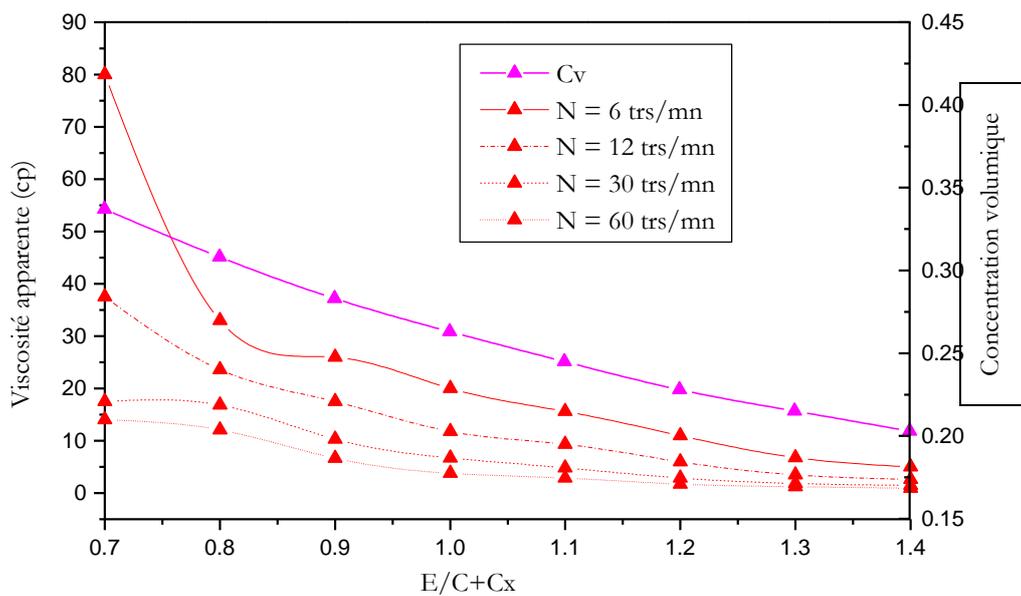


Figure 3.6 : Evolution de la viscosité apparente et de la concentration volumique en fonction du rapport E/C+Cx

Les courbes ainsi obtenues (fig. 3.4, 3.5, 3.6) ne diffèrent que peu de celles des temps d'écoulement au viscosimètre Marsh. Elles montrent que la viscosité mesurée pour les suspensions des liants étudiés croît avec la concentration volumique pour une vitesse de cisaillement donnée. Pour des concentrations volumiques faibles de l'ordre de 0,15 à 0,25 couramment utilisées pour un coulis d'injection, la viscosité devient pratiquement nulle et ce pour de grandes vitesses de cisaillement ; ceci est confirmé pour les travaux de Vom Berg [1979] et Miltiadou [1990].

Là aussi la viscosité apparente se stabilise pour les trois formulations autour des mêmes valeurs de rapport E/L que pour la viscosité Marsh (fig. 3.2) (0.7 pour le ciment, 1.2 pour le mélange et 1.5 pour la chaux).

III.2.3 Mesure du taux d'exsudation

Pour apprécier la stabilité des coulis étudiés, nous avons utilisé l'essai de mesure de l'exsudation défini par la norme NF P-18 359. L'essai consiste à mesurer la quantité d'eau qui se forme à la surface du coulis laissé au repos et à l'abri de toute évaporation. La mesure de la quantité d'eau exsudée a été réalisée au bout de trois heures.

Rem : rappelons que le seuil acceptable d'exsudation est limité à 5% pour des coulis parfaitement stables (chap. I)

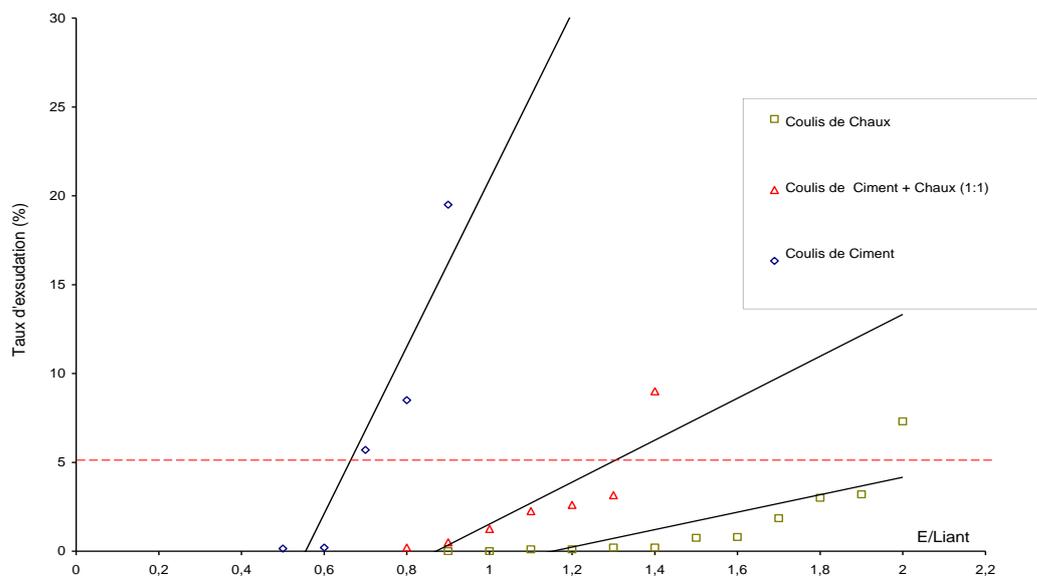


Figure 3.7 : Mesure du taux d'exsudation

Le coulis de chaux est de loin le plus stable dans les fourchettes de valeurs préconisées pour le rapport E/liant. Pour la chaux, contrairement au ciment, les particules de chaux restent en suspension dans l'eau car la solubilité est faible et le mode de durcissement est différent.

Le coulis de ciment est supposé stable pour les rapports E/liant < 0,7 ($C_v = 0,317$). En revanche, le mélange de la chaux au ciment présente une meilleure stabilité ($T_{\text{exs}} < 5\%$ pour $E/\text{liant} = 1,0$).

III.2.4 Essais d'injectabilité à la colonne de sable

Le dispositif d'injectabilité à la colonne de sable (photo 3.1) a été réalisé localement selon la norme NF P18-891. Outre l'appareil décrit dans la norme, l'essai a été adapté selon le matériel disponible à savoir :

- des colonnes d'injection (identiques à celles de l'essai équivalent de sable) de diamètre intérieur 3.2 cm et de 40 cm de longueur ;

- un régleur métallique ou en plastique de 40 cm de longueur, gradué en millimètre ;
- un entonnoir à large ouverture ;
- une balance, précise au décigramme près ;
- un chronomètre à la seconde ;
- une sonde de température, et humidité relative ;
- du sable reconstitué ;
- des tamis de mailles 0,63 mm – 0,8 mm – 1 mm – 1,25 mm – 1,6 mm – 2 mm et 2,5 mm (modules 29 à 35) ;
- une source d'air comprimé dont la pression est au moins égale à 0,5 MPa ;
- bouchons, de la toile de tamis de maille 0,500 mm ;
- un pot d'injection.

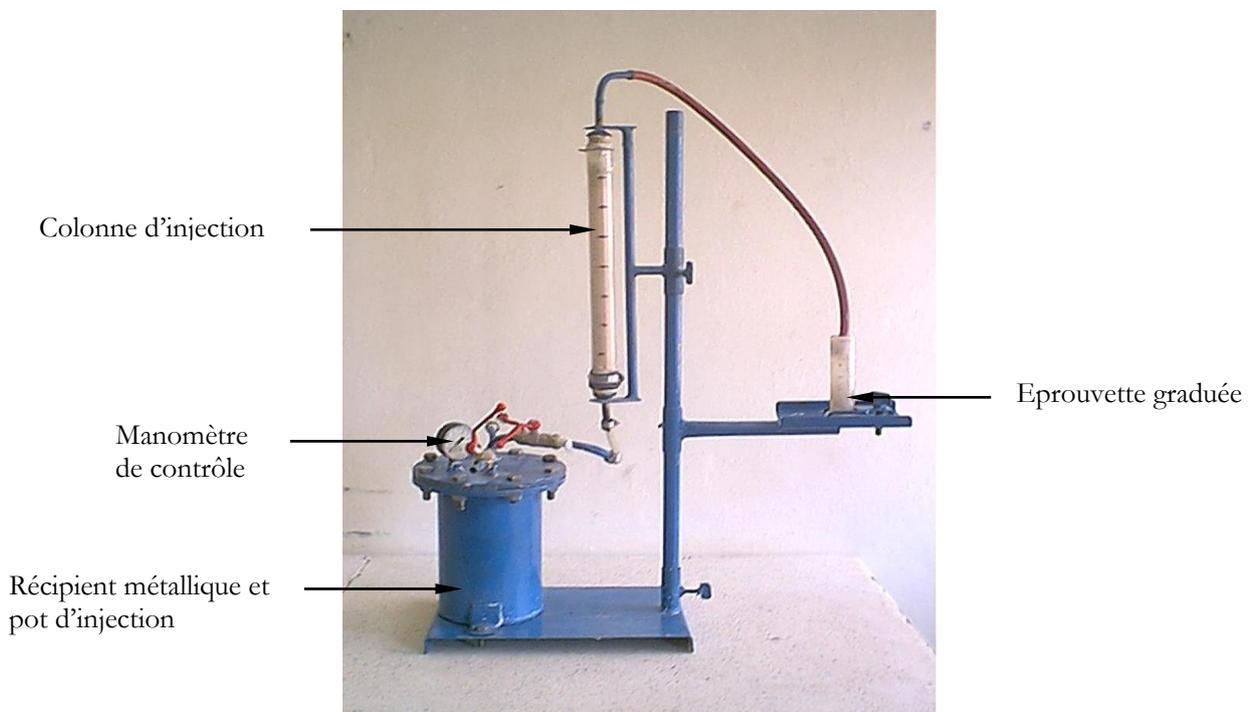


Photo 3.1 : dispositif d'injectabilité.

Le schéma décrit par la norme figure ci-dessous :

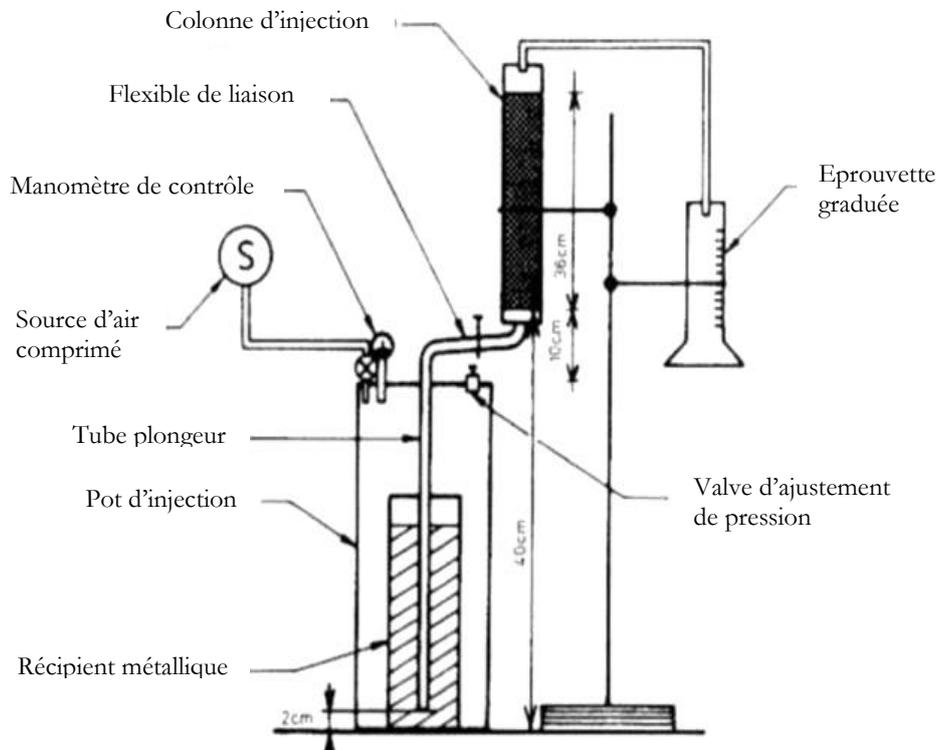


Figure 3.8 : Schéma du dispositif d'injectabilité selon la norme NFP 18-891.

III.2.3.1 Préparation de l'essai

a) Préparation des matériaux

Deux sables ont été reconstitués 0,63/1,25 et 1,6/2,5 mm selon la norme à partir du sable de carrière ENG.

- Reconstitution par tamisage aux tamis de 0,63 mm, 0,8 mm, 1 mm, 1,25 mm de granulométrie de la fraction 0,63 mm à 1,25 mm du sable normal (tableau 3.7) donné par la norme

Tableau 3.7 : granulométrie du sable normal 0.63/1.25 mm

Maille des tamis	0,63	0,800	1,00	1,25
Module afnor	29	30	31	32
% de passants cumulés	0	33	63	100

- Reconstitution par tamisage aux tamis de 1,6 mm, 2 mm, 2,5 mm de granulométrie de la fraction 1,6 mm à 2,5 mm (tableau 3.8)

Tableau 3.8 : granulométrie du sable normal 1.6/2.5 mm

Maille des tamis	1,60	2,00	2,50
Module afnor	33	34	35
% de passants cumulés	0	50	100

b) Préparation de la colonne

On place un disque en toile de tamis en maille 0,500 mm en contact avec le bouchon inférieur de la colonne, on remplit chaque colonne en trois fois, par couches de hauteurs sensiblement égales, de manière à obtenir une hauteur totale de sable compacté de 36 cm. Le processus de remplissage est donné par la norme NFP18 891.

On complète la hauteur supérieure de la colonne par du gravier 3/8 afin d'économiser le sable reconstitué, on humidifie ensuite complètement le sable, remet le bouchon supérieur de la colonne et on laisse égoutter quelques minutes, l'injection adoptée est celle en milieu humide.

Juste avant de placer la colonne prête à être injectée, on enlève le disque en toile pour éviter le problème d'essorage du coulis dès son injection.

III.2.3.2 Injection

Après préparation du coulis à tester, nous introduisons 500 à 800 g de mélange dans le récipient métallique, on monte le couvercle avec le joint, et on serre bien le tout,

On monte l'ensemble de l'appareillage et on règle la pression à 1 Bar dans le pot d'injection. Pendant cette opération, le robinet de sortie vers la colonne de sable doit être maintenu fermé.

On ouvre le robinet d'alimentation en air comprimé et vérifie que la valeur de la pression est bien égale à 1 bar. On procède si nécessaire à des corrections en agissant sur le robinet d'ajustement de la pression et s'assure qu'il n'y a pas de fuites externes.

On ouvre enfin, le robinet d'alimentation de la colonne et déclenche le chronomètre au moment où le coulis atteint le niveau « zéro » du sable défini.

On note les temps mis par le coulis pour atteindre les niveaux 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm et 35 cm.

Après remplissage complet de la colonne, on poursuit l'injection en recueillant le coulis sortant de la colonne dans une éprouvette graduée.

III.2.3.3 Expression des résultats

Nous avons dans un premier temps testé l'injectabilité des trois coulis apparemment les plus stables pour les deux classes granulaires de sable utilisées.

Les résultats d'injectabilité sont reportés dans le tableau 3.9.

Tableau 3.9 : Injectabilité des coulis les plus stables pour les 3 liants préconisés.

Ciment (%)	Chaux (%)	E/liant	T ₃₆ (s)		Taux d'exsudation < 5 (%)
			Sable (mm) 0,63/1,25	Sable (mm) 1,6/2,5 mm	
100		0,6	Impossible	Bloqué à 18 cm	0,23
	100	1,9	Impossible	Bloqué à 2 cm	2,85
50	50	1,0	Impossible	Bloqué à 2 cm	3,50

T₃₆ : temps mis par le coulis pour atteindre le sommet de la colonne (36 cm)

Aucun des trois coulis n'a été injecté. La phase solide des différents coulis ne correspond pas aux ouvertures considérées. Nous parvenons ainsi au constat d'échec déjà cité par les différents travaux. En effet la granularité d'un ciment commercialisé ne peut répondre aux critères d'injectabilité dans de fines fissures.

A partir de ces résultats, nous nous sommes proposés d'arriver à but en faisant varier deux des principaux paramètres influençant la pénétrabilité : l'écrêtage des liants au tamis 160 µm avec un meilleur mode de malaxage.

Le malaxage doit aussi permettre l'obtention d'une répartition homogène des grains solides contenus dans le coulis. Pour obtenir un coulis possédant de bonnes propriétés d'injectabilité, il est cependant important que les particules de la phase solide soient réparties de manière régulière.

Cette insuffisance du malaxage au *Hobart* nous a conduit à expérimenter le procédé de malaxage par l'agitateur mécanique type : essai sédimentométrie, La vitesse de rotation s'élève à 10000 trs/min. La durée de malaxage que nous avons préconisé est de 6 minutes (comparable à celle des travaux de Miltiadou [1990]). Nous avons consigné dans le tableau 3.10 les résultats obtenus à l'essai d'injectabilité. Au vu de ces résultats, nous pouvons tirer les enseignements suivants :
Si nous reportons le critère granulométrique d'injectabilité d'Androniki Miltiadou :

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

- l'écrêtage des liants au 160 μ m n'est pas une condition suffisante pour l'obtention de coulis injectables dans la classe granulaire 0,63/1,25 mm.
- Par contre ils seront parfaitement injectables dans la deuxième classe granulaire correspondant à une porosité plus grande.

Tableau 3.10 : Injectabilité des coulis de ciment, de chaux et de ciment + chaux (1 :1) étudiés.

Ciment (%)	Chaux (%)	E/liant	T36 (s)		Taux d'exsudation (%)	
			Sable (mm) 0,63/1,25	Sable (mm) 1,6/2,5		
100	-	0,9	Bloqué à 5 cm	2	29	
		0,8	Bloqué à 3 cm	"	24	
		0,7	Bloqué à 2 cm	"	18	
		0,6	Bloqué à 1 cm	3	9	
		0,55	Impossible	4	3,5	
		0,5	"	5	2	
	100	100	2,0	"	2	7,3
			1,9	"	2 à 3	3,2
			1,8	"	"	3
			1,7	"	"	1,85
			1,6	"	"	0,8
			1,5	"	"	0,75
			1,4	"	"	0,2
			1,3	"	"	0,2
			1,2	"	"	0,1
			1,1	"	"	0,1
50	50	1,0	"	3	-	
		0,9	"	7	-	
		1,4	Bloqué à 1 cm	2 à 3	9	
		1,35	Impossible	"	3,5	
		1,3	"	"	3,15	
		1,2	"	"	2,6	
		1,1	"	"	2,25	
		1,0	"	3	1,25	
		0,9	"	3	0,5	

		0,8	"	3	0,2
--	--	-----	---	---	-----



Photo 3.2 : Injectabilité du coulis E/C=0.9



Photo 3.3 : Essorage du coulis de chaux

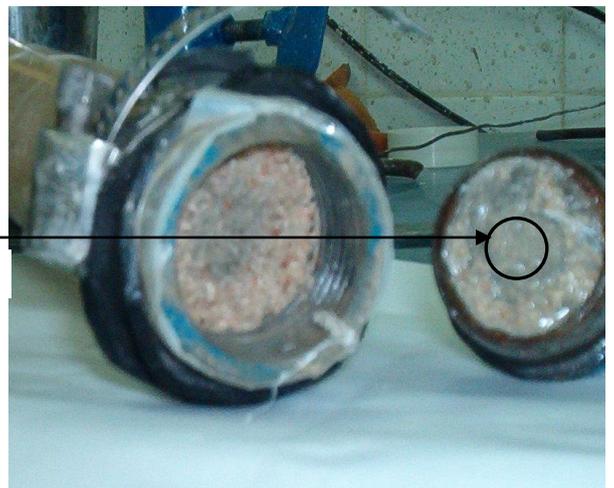


Photo 3.4 : Essorage du coulis de ciment



Photo 3.5 : Essorage du coulis de (ciment + chaux)



Photo 3.6 : Coulis injectable
Coulis de chaux ($E/C_x = 1.9$)

Nous montrerons en annexe l'influence de l'écrêtage des liants au $80\ \mu\text{m}$ sur l'injectabilité de quelques coulis seulement. Ceci nous amène à des coulis d'injectabilité élevée dans la colonne $0,63/1,25\ \text{mm}$.

N'ayant pas les courbes granulométriques des liants testés, ni les moyens d'écrêtage aux diamètres $< 80\ \mu\text{m}$; nous n'avons pas pu confirmer les recommandations préconisées par Miltiadou [1990].

III.2.4 Caractéristiques mécaniques intrinsèques des coulis étudiés

Pour évaluer les caractéristiques mécaniques intrinsèques des coulis étudiés, nous avons effectué des essais de compression et de flexion sur des éprouvettes prismatiques 40x40x160 mm de coulis durci. Cinq formulations ont été considérées, les teneurs en eau choisies présentent des coulis d'injectabilité comparable à la limite de la stabilité. Les liants considérés (ciment et chaux éteinte) ont été passés au tamis 0,16 mm.



Photo 3.7 : Eprouvettes de coulis de ciment



Photo 3.8 : Eprouvettes de coulis de chaux

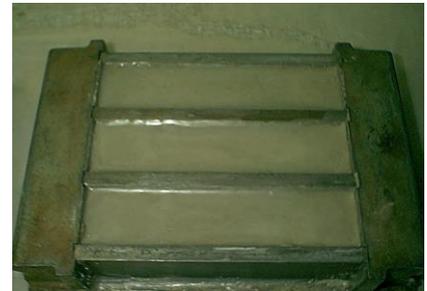


Photo 3.9 : Eprouvettes de coulis de ciment + chaux

Les résistances mécaniques ainsi définies ont été déterminées à 7 et 28 jours. Les éprouvettes ont été conservées à température ambiante ; à l'exception des éprouvettes de coulis de ciment pur qui étaient conservées dans l'eau.

Les caractéristiques mécaniques de traction par flexion présentées sur le tableau 3.11, ont été déterminées en effectuant la moyenne des résultats obtenus sur une série de 3 éprouvettes. Pour la compression, la résistance représente une moyenne de 6 demi – éprouvette obtenues par flexion.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3.11

Tableau 3.11 : Caractéristiques mécaniques intrinsèques des coulis étudiés

Composition de coulis			Résistance à la traction (MPa)		Résistance à la compression (MPa)	
Ciment	Chaux	E/liant	7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
100	-	0,55	4,48	7,55	12,8	21,7
50	50	0,8	0,8	1,6	1,58	5,00
50	50	1,35	0,56	0,83	0,65	1,38
-	100	1	-	-	-	-
-	100	1,9	-	-	-	-

Nous notons que les coulis à base de chaux n'ont pas le temps de durcir même après un mois de cure puisque la carbonatation est un phénomène très lent. C'est la raison pour laquelle il n'y a pas eu d'écrasement.



Photo 3.10 : Banc didactique.



Photo 3.11 : Essai de traction par flexion



Photo 3.12 : Essai de compression simple

Les valeurs figurant dans le tableau 3.11 montrent que l'on obtient une gamme très variée de résistance.

Du point de vue des résistances à la traction à 28 jours, les valeurs les plus élevées étant obtenues avec le coulis à base de ciment (7.55 MPa). Le coulis à base de chaux+ciment ou uniquement de chaux conduit à de très faibles résistances (du simple durcissement à 0.8 – 1.6 MPa).

En ce qui concerne la résistance à la compression, le coulis de ciment est de loin le plus résistant (21.7 MPa à 28j) ;

L'association d'une proportion de chaux au coulis de ciment conduit à l'obtention de résistances moins importantes que celles du coulis de ciment. En effet, la résistance à la compression à 28 jours du coulis de ciment est 5 fois plus grande que celle du mélange à parts égales ciment plus chaux et ce pour le coulis le plus dense. Elle est davantage plus importante (20 fois) quand ce dernier est plus fluide.

III.2.5 Influence d'une injection de coulis sur le comportement mécanique de la maçonnerie.

III.2.5.1 Matériaux utilisés

La composition du mortier utilisé dans les remplissages est prise des travaux de A.E. Miltiadou.

Le tableau 3.12 définit le mortier retenu, ces caractéristiques sont données par le tableau 3.13.

Les remplissages ont été constitués à l'aide du mortier défini dans le tableau 3.12 et de cailloux de diamètre compris entre 20 et 40 mm obtenus par concassage de pierres. La pierre utilisée est une pierre calcaire (photo. 3.14) de la région de Chetouane (cité de la faculté des sciences de l'ingénieur) dont la porosité est de 0.2 %.

Deux types de remplissages ont été considérés, se différenciant par leur porosité (32 ou 40 %). Notons que la porosité dont il est question ici ne tient pas compte de la porosité propre des pierres. La différence de porosité des remplissages a été obtenue en gardant constant le volume de cailloux et en faisant varier la masse du mortier.

La composition des remplissages fabriqués en respectant cette procédure est présentée par le tableau 3.14.

Au total, on obtient ainsi un matériau tel que :

- le pourcentage de ciment (en masse) est de 1,2 à 2,2 % suivant la valeur de porosité : valeurs que l'on peut comparer à celles d'une grave - ciment employée dans les chaussées ($\approx 4\%$ du ciment), ou d'un béton maigre ($\approx 10\%$ de ciment) ;
- la masse volumique de l'ensemble varie entre 1300 et 1900 kg/m³ selon les cas.

Les coulis d'injection utilisés sont ceux expérimentés pour la détermination des caractéristiques mécaniques intrinsèques (tableau 3.15).

Tableau 3.12 : Composition et porosité du mortier utilisé

	Ciment CPJ : 6 %
	Chaux éteinte : 9 %
Composition	Sable calcaire 0,16-4 mm de carrière (ENG) : 85 %
	Teneur en eau E / C+Cx : 0,6
Porosité	33%
	C = Ciment ; Cx = Chaux éteinte

Pourcentage des tamisats cumulés

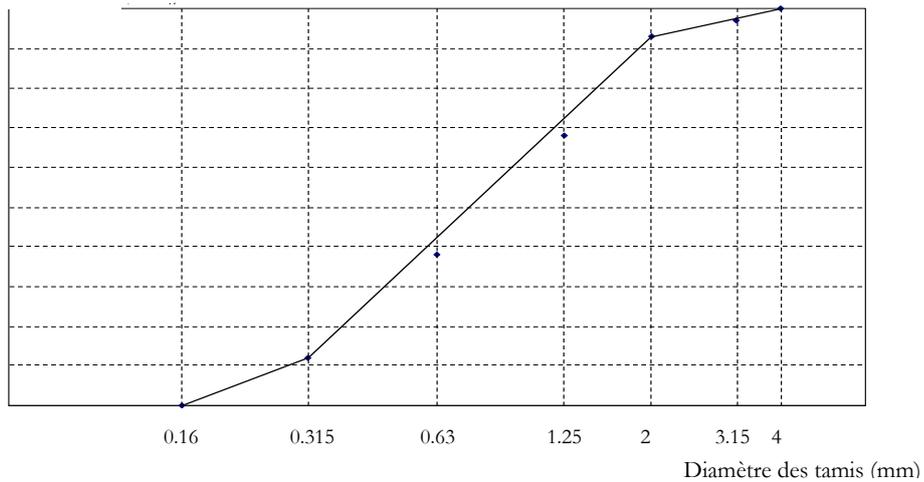


Figure 3.9 : Courbe granulométrique du sable utilisé.

Tableau 3.13 : Caractéristiques mécaniques du mortier utilisé.

Résistance à la traction (MPa)		Résistance à la compression (MPa)	
7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
-	0.012	0.2	0.25

Les éprouvettes (4x4x16 cm) de mortier utilisées pour la détermination de ses caractéristiques mécaniques sont présentées ci-dessous (photo. 3.13)



Photo 3.13. Eprouvettes de mortier utilisé.

Tableau 3.14 : Composition des remplissages (pour 1 m³ de matériau fini)

Porosité du remplissage (%)	Pierre calcaire		Mortier	
	Volume (dm ³)	Masse (Kg)	Masse phase solide (Kg)	Masse d'eau (Kg)
32	480	1306	420	38
40	480	1306	253	23

Tableau 3.15 : Composition des coulis utilisés

Formulation de coulis	Ciment %	Cx %	E/liant
C1	100	-	0,55
C2	-	100	1,0
C3	-	100	1,9
C4	50	50	0,8
C5	50	50	1,35

III.2.5.2 Description des essais réalisés

Des essais de compression simple ont été réalisés sur des éprouvettes de remplissage injectées et non injectées. 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 ». ces éprouvettes simulent les maçonneries présentant une certaine pathologie dont l'injection apportait la réparation souhaitée.

III.2.5.3 Confection des corps d'épreuve

Les éprouvettes confectionnées pour la compression sont cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm (photo 3.19).

III.2.5.4 Fabrication

La fabrication de ces éprouvettes comportait les étapes suivantes :

- pesage de la quantité de cailloux nécessaire, et malaxage du mortier humide (photo 3.14, 3.15)
- répandage des cailloux sur le sol, humidification,
- ajout et mélange du mortier à la pelle, jusqu'à obtention d'un mélange homogène (photo 3.18),
- mise en place dans les moules avec précaution, afin d'éviter l'accumulation du mortier au bas de l'éprouvette (photo 3.19).



Photo 3.14 : Pierres calcaires utilisées



Photo 3.15 : Composants du mortier sec



Photo 3.16 : Malaxage du mortier humide



Photo 3.17 : Mortier prêt à l'emploi



Photo 3.18 : Mélange du mortier aux cailloux



Photo 3.19 : Eprouvettes de remplissage

Les faces supérieure et inférieure des cylindres sont enduites de mortier et lissées à la truelle ; elles seront rectifiées par la suite, de façon à permettre la mise en charge sur des surfaces planes et parallèles.

III.2.5.5 Injection

La fabrication des coulis a été réalisée à l'aide du malaxeur type sédimentométrie. L'injection des éprouvettes a été effectuée par un trou percé (photo 3.20) depuis la face supérieure des éprouvettes et descendant jusqu'à quelques centimètres du fond. Le coulis est injecté de bas en haut par gravitation, par un tube que l'on remonte progressivement lorsque le coulis déborde de la face supérieure.

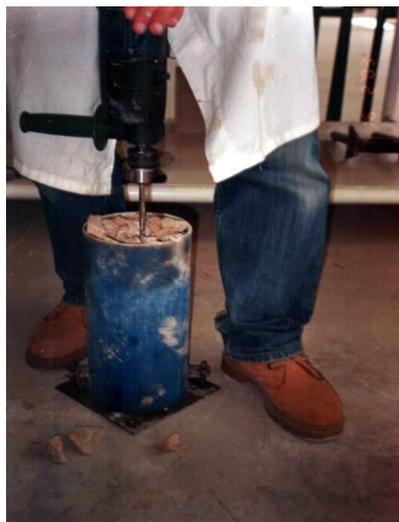


Photo 3.20 : Préparation du trou d'injection

III.2.5.6 Conservation

Les éprouvettes sont conservées à l'air libre (photo 3.21), à une température moyenne de 16°C et une humidité relative de 56 %. Les résistances ont été mesurées à vingt-huit jours pour les éprouvettes de remplissage non injectées et à trente cinq et cinquante-six jours pour les éprouvettes injectées à vingt-huit jours.



Photo 3.21 : Conservation des éprouvettes

III.2.5.7 Description des essais de compression simple

Les essais de compression sont réalisés en utilisant une presse de 2000 KN dans laquelle la force axiale est pilotée automatiquement, la vitesse de montée en charge est maintenue autour de 2 KN/s.

a) Description du programme expérimental

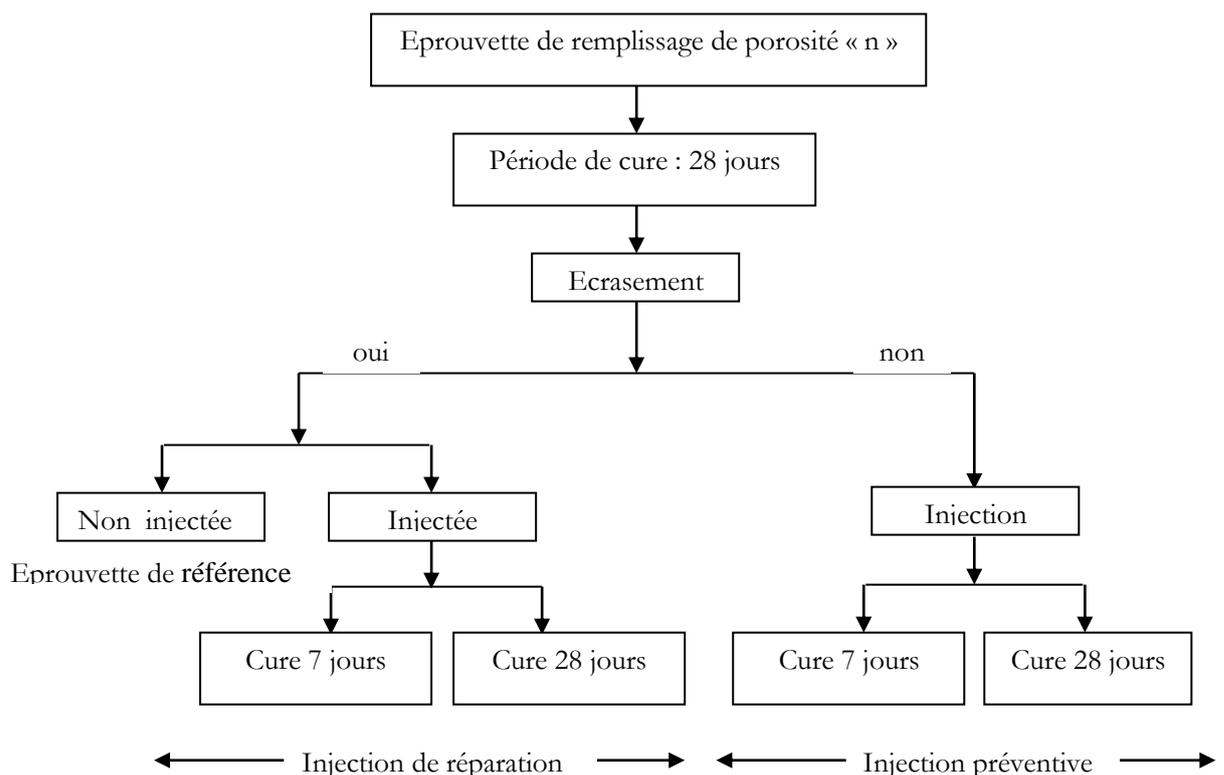


Figure 3.10 : Programme d'essai.

Soixante-trois essais de compression ont été réalisés ; trente éprouvettes injectées préventivement (quinze pour 7 jours, et quinze pour 28), trente éprouvettes réparées par injection, et trois de référence.

Tableau 3.16 : Programme expérimental. Essais de compression.

Porosité (%)	Nombre d'échantillons		
	Eprouvettes de référence	Injection préventive	Injection de réparation
40	(3)		
"			
"			
32	(3)		
"			
"			
"		C1/55 (6)	
"		C2/100 (6)	
"		C3/190 (6)	
"		C4/80 (6)	
"		C5/135 (6)	
"			C1/55 (6)
"			C2/100 (6)
"			C3/190 (6)
"			C4/80 (6)
"			C5/135 (6)

b) Principaux résultats obtenus

Seuls les remplissages à 32 % de porosité ont été réussis, ceux à 40 % n'ont pas pu être expérimentés car la quantité de mortier est insuffisante pour permettre à l'ensemble du remplissage de tenir (photo 3.22).



Photo 3.22: Remplissage de porosité 40%



Photo 3.23: Remplissage de porosité 32%



Photo 3.24 : Essai de compression simple (épreuve de référence)



« **Figure 2.11** » : Epreuve de remplissage de référence après rupture [Miltiadou., 1990]

En effet, l'observation des éprouvettes après rupture (photo 3.24) montre que celle-ci se fait presque uniquement dans le mortier, et aux interfaces mortier-cailloux comme l'a montré Miltiadou [1990] en (fig.2.11).



Photo 3.25 : Epreuve injectée coulis de ciment



Photo 3.26 : Epreuve injectée coulis de ciment+chaux



Photo 3.27 : Epreuve injectée de ciment (prise de vue de haut)



Photo 3.28 : Epreuve injectée (coulis de chaux)



Photo 3.29 : Epreuve injectée de chaux avant surfacage

Tableau 3.17 : Expression des résultats d'essais de compression simple sur éprouvettes de remplissage.

Composition de coulis			Résistance à la compression (MPa)				
			Référence	Injection préventive		Injection de réparation	
ciment	chaux	E/liant	28 jours	7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
100	-	0.55	0.12	0.18	1.55	0.12	1.43
-	100	1.0		*	0.02	*	*
-	100	1.9		0.05	0.18	0.1	0.10
50	50	0.8		*	0.07	*	*
50	50	1.35		0.34	0.56	0.53	0.53

Les valeurs sont obtenues à partir d'une moyenne de trois éprouvettes par formulation, les trois valeurs obtenues pour une formulation sont pratiquement identiques.

* : signifie qu'il n'a pas été possible d'obtenir de résultat, l'éprouvette a été fragilisée par le perçage et donc l'injection n'a pas été réussie. Les éprouvettes ont été perdues lors de leur démoulage.

De plus, les coulis les plus denses, ayant passé le test de l'injectabilité au laboratoire, ont eu la difficulté de s'écouler à travers la porosité de la matrice. Nous avons constaté la formation d'un cône de coulis à la surface de la partie percée.

En revanche, pour les autres coulis choisis, l'injectabilité était bien meilleure et les éprouvettes sont par conséquent bien imprégnées.

Le coulis de ciment correspond, là encore, aux résistances les plus élevées. La résistance à la compression à 28 jours est respectivement 12 à 13 fois plus grande pour une injection de réparation ou préventive, passant exactement de 0.12 Mpa à 1.43 et 1.55 Mpa.

La différence entre les deux modes d'injection n'a pas été dans notre cas très significative. Nous pensons que ceci est dû essentiellement à la disposition des cailloux dans l'éprouvette.

Le coulis de chaux n'est pas encore représentatif à 28 jours, la résistance est améliorée d'une fois et demie (de 0.12 à 0.18 MPa). Le coulis a bien enrobé le mortier et rempli les vides, mais n'a pas atteint à court terme le seuil de résistance souhaité.

Pour les coulis à base de ciment + chaux, les mêmes remarques peuvent être faites sauf que cette fois-ci la résistance a été améliorée de 5 fois plus passant de 0.12 à 0.53 et 0.56 MPa.

Si A.E. Miltiadou a pu obtenir une amélioration des caractéristiques mécaniques d'un élément de structure variant de 7 à 10 fois plus, nous pouvons sans doute, sans pouvoir réellement comparer nos résultats aux siens, dire que nous avons pu valider une étude se basant sur la même approche.

Les coulis choisis nous ont permis de consolider des éprouvettes en ruine. En effet, nous avons pu obtenir relativement les mêmes caractéristiques mécaniques pour les éprouvettes ayant fait l'objet d'une injection curative et celles présentant une injection préventive.

CONCLUSION GENERALE

Le but essentiel de ce travail était la présentation de quelques résultats expérimentaux d'une recherche qui porte sur le développement de coulis d'injection pour la réparation et le renforcement de monuments et maçonneries anciennes. Ces coulis devaient simultanément être compatibles avec les matériaux existants et capables de restaurer, voire améliorer, les caractéristiques mécaniques des maçonneries injectées.

Afin de satisfaire ces deux exigences, une série de critères, que les coulis doivent satisfaire, ont d'abord été énoncés à partir d'une analyse collective bibliographique. Cette dernière nous permis de tirer les enseignements suivants :

- i., Le choix des liants doit porter sur une étude préalable de la structure à réparer, de telle sorte à adopter des matériaux compatibles aux matériaux supports.
- ii., L'amélioration des caractéristiques mécaniques de la structure dégradée dépend essentiellement de la formulation de coulis adaptée : de part sa pénétrabilité, sa stabilité et sa durabilité.
- iii., L'étude de la pénétrabilité d'un coulis par rapport à un milieu donné a été reconstitué au laboratoire par l'essai d'injectabilité à la colonne de sable défini par la norme NF P 18-891, et mis au point par les Laboratoires des Ponts et Chaussées.
 - Pour qu'une suspension granulaire puisse être injectée dans de fines fissures, il est indispensable que la granularité de sa phase solide soit $< 80 \mu\text{m}$ et admettre jusqu'à 12 % de grains de diamètre supérieur à $32 \mu\text{m}$.
 - La stabilité se traduit par l'aptitude d'un coulis à garder son homogénéité pendant la durée de l'injection et jusqu'à la fin de la prise. Dans le domaine des monuments en maçonnerie ceci peut être représenté par un taux d'exsudation égal à 5 %.
 - La durabilité représente dans ce cas une amélioration satisfaisante des caractéristiques mécaniques d'un élément de structure, le coulis doit adhérer au support et présenter de bonnes caractéristiques intrinsèques.

Notre étude a ensuite porté sur le développement de coulis à base de liant minéraux : ciment et chaux éteinte. Sur la base de l'approche méthodologique adoptée par le LCPC de Paris, les paramètres d'injectabilité de nos coulis ont d'abord été définis. Les caractéristiques intrinsèques des coulis choisis ont été ensuite déterminées avec le but d'explorer leur potentiel mécanique. Enfin des échantillons de remplissage ont été injectés et leur comportement mécanique avant et après injection a été comparé. Au vu des résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être considérées :

Si la satisfaction des critères granulométriques constitue une condition sine qua non pour l'obtention de coulis injectables, ces derniers doivent également posséder une fluidité suffisante et être stables. Cinq formulations ont été retenues à partir d'une part ; de l'essai d'injectabilité à la colonne de sable et d'autre part de l'essai d'exsudation :

- un coulis de ciment de rapport $E/C = 0.55$
- deux coulis de chaux avec $E/C_x = 1$ et 1.9
- deux coulis de ciment plus chaux (1 :1) avec $E/C+C_x = 0.8$ et 1.35 .

L'analyse des caractéristiques mécaniques intrinsèques des coulis fait apparaître le rôle important tenu par la nature et le dosage des liants utilisés. En faisant varier ces paramètres, il est ainsi

possible d'obtenir une gamme variée de résistances. Les coulis à base de liants aériens ne sont pas encore représentatifs des résistances souhaitées à court terme.

Aussi, grâce à leur pouvoir de pénétration, les coulis proposés dans cette étude entraînent une amélioration significative des résistances des matériaux injectés.

Les résistances à la compression des remplissages injectés sont 5 fois plus grandes pour un coulis de ciment plus chaux et 12 fois pour un coulis de ciment pur relativement aux échantillons témoins. Les coulis de chaux n'ont pas pu à court terme être représentatifs. En revanche les coulis choisis nous ont permis de consolider voire améliorer des éprouvettes même en ruine.

Si ce travail apporte une contribution à l'étude des coulis d'injection, elle ne constitue qu'un début. De nombreux développements nous semblent encore nécessaires. Parmi les principaux, citons en particulier :

- Influence d'une addition d'éléments fins (fumée de silice et pouzzolane) sur l'injectabilité des coulis dans de fines fissures.

Cette addition se répercute sur la stabilité des coulis ainsi que leurs caractéristiques mécaniques.

- Optimisation du mode de malaxage des coulis.
- Influence d'une injection sous pression de coulis sur le comportement mécanique d'une structure en maçonnerie.
- Réalisation d'une étude expérimentale permettant d'apprécier le comportement des coulis proposés sur des structures plus proches de la réalité (échelle1).

Références Bibliographiques

Alexander K. M., (1965)

A study of concrete strength and mode of fracture in terms of matrix, bond and aggregate strengths. Fracture, Proc. of the 1st Tewksbury Symposium, Melbourne, 1963, Ed. University of Melbourne, Faculty of Civil Engineering, pp. 141-168.

Ali S., Page A. W., (1986)

A failure criterion for mortar joints in brickwork subjected to combined shear and tension – Masonry international, n° 9, pp. 43-54.

Baronio G., Binda L., Fontana A., (1987)

Durability of decayed brick-maçonneries strengthened by grouting: 4th Conf. On durability and Buildings Materials and Components, Singapore, Vol. 1, pp. 19-26.

Baronio G., Berra M., Binda L., Fontana A., (1989)

Repair of masonries by injection techniques: effectiveness, bond, and durability problems. International Technical Conference on Structural Conservation of Stone Masonry, Athènes, Grèce, 31 octobre – 9 novembre.

G. Baronio., L. Binda., C. Tiraboschi., (1993)

Repair of brick-maçonneries by injection of grouts : Experimental research, Journal of Structural Engineering, Vol 20 N 1. pp. 29-44. Milan, Italy.

R. Belgaid., K. Zerg., (2002)

Influence de l'injection de coulis sur mélange cailloux-mortier, PFE faculté des sciences de l'ingénieur, Tlemcen, Algérie.

Bombed J.P., (1974)

Rhéologie des mortiers et des bétons frais, étude de la pâte interstitielle de ciment. Revue des matériaux de construction, n°688, mai-juin pp. 137-155.

Alain Bouineau., (1999)

Le renforcement des maçonneries anciennes à l'aide de coulis d'injection, ICOMOS (conseil international des monuments et des sites) dossier technique n° 5.

Brinkman H.C., (1952)

The viscosity of concentrated suspensions and solutions. The Journal of Chemical Physics, vol. 20, n°4, pp. 571.

Cambefort H., (1977)

Principes et applications de l'injection. Annales de l'ITBTP, Paris, Supp. n° 353, série : sol et fondations, n° 144, 23 pages.

Carter C., Shaughnessy R., (1971)

Hypothesis for shear failure of brickwork. J. Of Struct. Div., proc. Am. Soc. Civ. Eng., vol.97, ST 4, pp. 1055-1062.

Costa V., Massazza F., (1986)

Structure and properties of cement suspensions. 8ème Congrès international de la chimie des ciments, Rio de Janeiro, Brésil, thème 3, volume IV, pp. 248-259.

Dantu P., (1961)

Etude mécanique d'un milieu pulvérulent formé de sphères égales de compacité maxima. 5^{ème} Congrès International de mécanique des sols. Paris. Dunod 10 pages.

J. L. Durville., F. Martineau., E. Massieu., A. E. Miltiadou., J. J. Serrano., (1993)

Etude mécanique de mélanges cailloux-mortier : influence de l'injection de coulis. Bull de liaison Labo. P. et Ch. -183, Réf. 3677.

Einstein A., (1906)

Investigation on the theory of Brownian movement. Annalen Der Physik (4), 19 pp. 289-306.

Ferragni D., Forti M., Malliet J., Di Martino S., (1981)

Essais de laboratoire sur des coulis à base de ciment. Proc. Symp. Int. Mortiers, ciments et coulis utilisés dans la conservation des bâtiments historiques, Ed. ICCROM, Rome, pp.185-203.

Greenberg S.A., Ish-Shalom M., (1962)

The rheology of fresh portland cement paste. Proc. IV Int. Symp. on the chemistry of cement, Washington 1960, Washington D.C., National Bureau of Standards, 1962, Monograph 43, vol. II, pp. 731-748.

Guinez R., Paillère A.M., (1984)

Recherche d'une formulation de coulis à base de liants hydrauliques pour l'injection dans les fines fissures et les cavités. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, n°130, pp. 51-57.

Helmuth R.A., (1980)

Structure and rheology of fresh cement paste. Proc. VII Int. Conf. on the Chemistry of Cement, Paris, Sub-theme VI-0, pp. 16-30.

Legrand C., (1982)

La structure des suspensions de ciments. Le béton hydraulique, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, pp. 99-113.

Malhotra V.M., (1979)

Performance of superplasticized concretes that have high water-to-cement ratios. Superplasticizers in Concrete, TRR 720, National Academy of Sciences, Washington D.C., pp. 28-34.

Jannie Mayer., (1999)

Démonter ou consolider ? L'émergence de la notion de conservation en place des maçonneries dégradées dans l'histoire des monuments historiques, Journée technique internationale, Paris, France.

Andronoki E. Miltiadou., (1990)

Etude des coulis hydrauliques pour la réparation et le renforcement des structures et des monuments historiques en maçonnerie, rapport des laboratoires des ponts et chaussées, Série ouvrages d'art. OA.8. Paris, France.

A. E. Miltiadou., A. M. Paillère, J. J. Serrano, (1993)

Formulation de coulis hydrauliques pour l'injection de fines fissures et cavités dans les structures dégradées en béton et maçonnerie. Bull. liaison Labo. P. et Ch. -186, Réf. 3676.

Papadakis M., (1955)

Rhéologie des suspensions de ciment. Publication technique de CERILH, n° 72, 48 pages

Papadakis M., (1959)

L'injectabilité des coulis et mortiers de ciments. Revue des matériaux de construction, 531, publication technique n°11 du CERILH, 48 pages.

Papadakis M., Venuat M., (1961)

Contrôle et Essais des Ciments, Mortiers, Bétons. Editions Eyrolles, Paris, 465 pages.

Mohamed Slitaine., (1985)

Comportement à long terme de poutres en béton armé fissurées puis réparées par injection de liants époxydiques, Thèse de docteur ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

E. E. Toumbakari., (1999)

Réparation et renforcement des monuments historiques, Coulis d'injection compatibles avec les maçonneries historiques et effets structuraux sur des murs à trois parements, Ph. D. Thesis, University of Athens, Greece.

Venuat M., (1961)

L'influence de la granulométrie des ciments sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers et bétons. CERILH Publication technique n°122.

Venuat M., (1976)

La pratique des ciments et des bétons. Ed. du Moniteur des travaux publics et du bâtiment, Paris, 632 pages.

Annexes

Tableau 2 : Composition chimique des additions ultrafines utilisées

Composition Chimique	Fumée de silice densifiée	Terre de Santorin	Chaux éteinte
SiO ₂	89.67	61.60	2.10
Al ₂ O ₃	0.32	15.53	0.15
Fe ₂ O ₃	0.69	5.73	0.05
CaO	0.24	4.40	68.30
MgO	1.34	1.98	0.42
SO ₃	0.40	0.02	0.04
K ₂ O	1.61	2.19	0.05
TiO ₂	traces	0.59	0.01
Na ₂ O	0.72	3.71	0.01
MnO		0.16	0.02
Cr ₂ O ₃		0.010	0.001
P ₂ O ₅		0.23	0.08
Cl	0.00	-	-
S ⁻	0.00	-	-
SiC	2.67		
Perte au feu		3.84	28.84
CaO libre			
Carbone	1.37		
Eau libre	0.89		
Origine (type d'alliage)	FeSi		
ρ (g/cm ³)	2.20	2.40	2.26
Surface spécifique BET (m ² /g)	21.64	6.38	-
Surface spécifique Blaine (m ² /g)	-	1.30	1.05

II- Stabilité des coulis de ciment C1 et C2

Tableau 3. Injectabilité des coulis de ciment C1 (CPA55) et C2 (CPA55-PM)

LS : Légère Sédimentation, FS : Forte Sédimentation

Ciment	E/C	SP %	Temps de passage à la colonne de sable 0.63/1.25 mm (s)	Exsudation %	Observation
C1	1.50	-	4	58	FS
	1.00	-	∞	30	
	0.75	-	∞	17	
	1.25	0.33	34	42	LS
	1.00	0.33	∞	31	
	1.00	0.66	5	35	FS
	0.75	0.66	15	20	FS
C2	1.50	-	4	60	FS
	1.00	-	45	31	25 cm
	0.75	-	∞	18	
	1.25	0.33	12	36	
	1.25	0.66	4	46	FS
	1.00	0.66	6	24	FS
	0.75	0.66	7	20	FS

Nous reprenons ci-après, les résultats obtenus avec de la chaux seulement

Tableau 4. Injectabilité des coulis obtenus avec du ciment associé à des éléments ultra-fins.

Type de ciment	Composition des coulis (%)				T36(s) Temps de passage à la colonne 0.63/1.25mm	Exsudation (%)
	C	Cx	SP	E/(C+F)		
C2	90	10	0.33	0.75	21	3
C5	75	25	0.60	1.00	∞	4
	70	30	0.60	1.00	16	3
	60	40	0.80	1.00	14	0
C7	50	50	1.50	1.50	∞	0
	40	60	1.50	1.50	40	0
	30	70	1.50	1.50	50	0

III- Influence de la granularité de la phase solide des liants sur leur injectabilité

Afin de noter l'influence de la granularité de la phase solide d'un liant sur ses propriétés d'injectabilité, nous présentons ci-dessous les résultats obtenus avec des coulis dont la phase solide a été passée au tamis 80 μm .

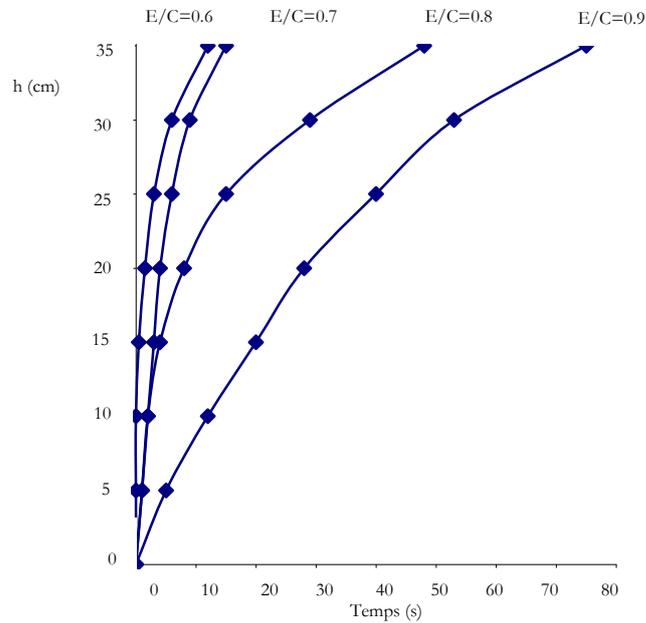


Figure2. Injectabilité des coulis de ciment.

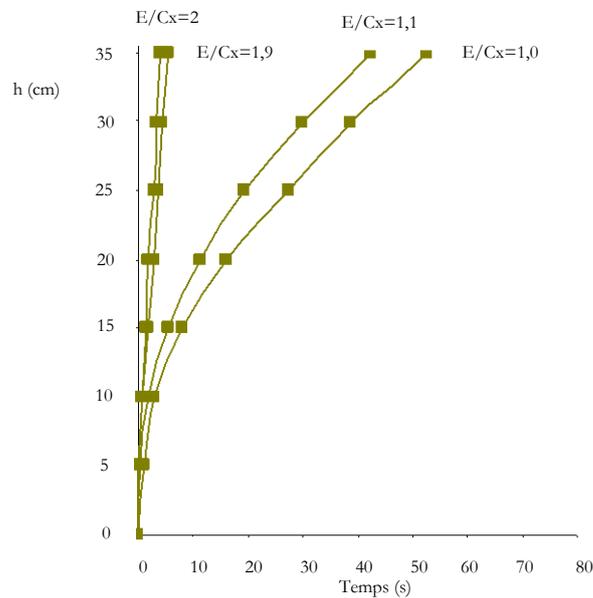


Figure3. Injectabilité des coulis de chaux.

Les coulis ont bien été injectés dans la classe 0.63/1.25 mm. Pouvons nous dire qu'ils obéissent au critère granulométrique.