

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)

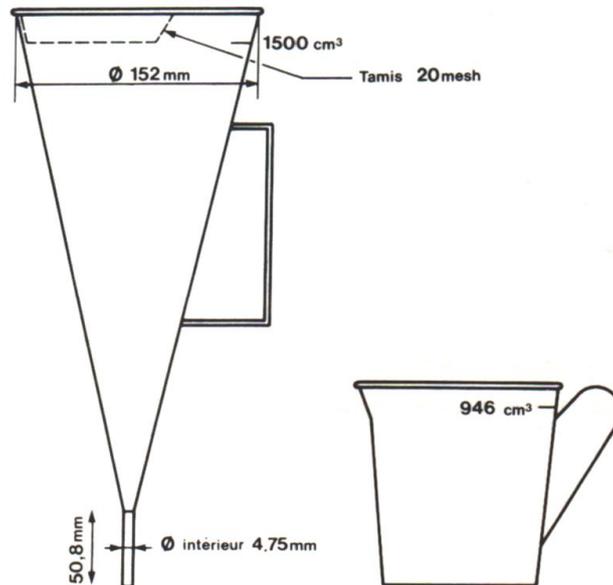


Figure 3.1 : Viscosimètre Marsh

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.

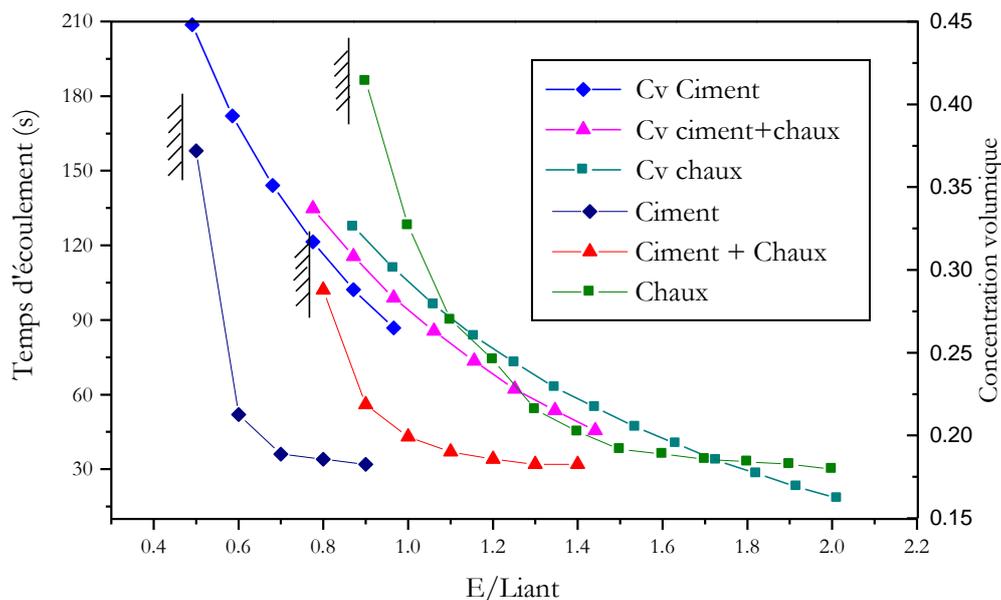


Figure 3.2 : Evolution du temps d'écoulement et de la concentration volumique en fonction du rapport E/liant

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)

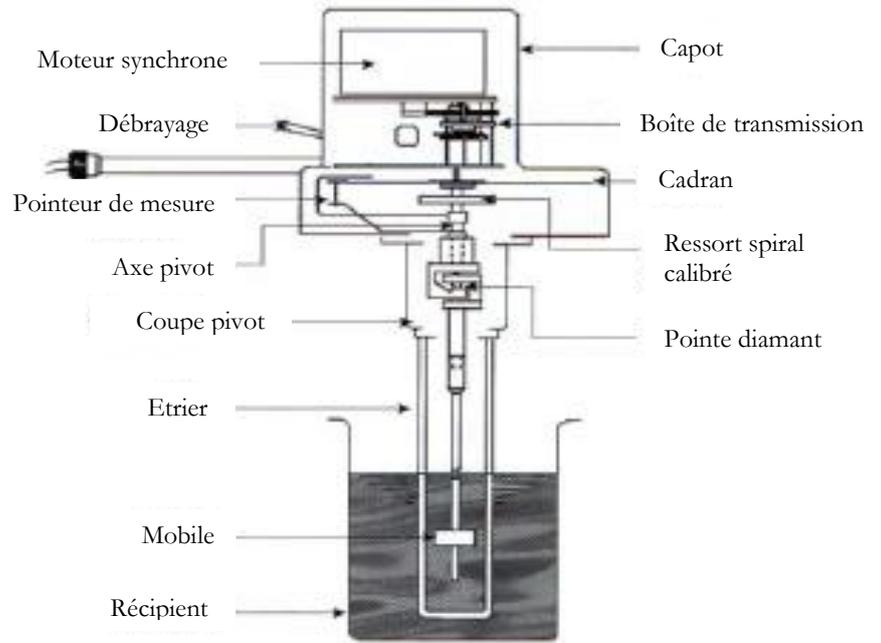


Figure 3.3 : Viscosimètre Brookfield type LVF.

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 |

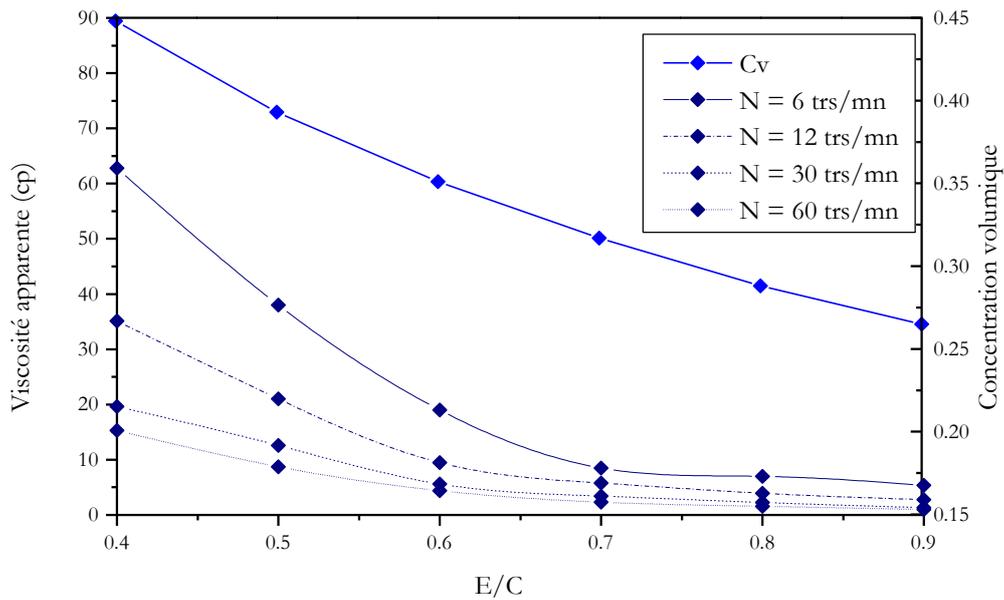


Figure 3.4 : Evolution de la viscosité apparente et de la concentration volumique en fonction du rapport E/C

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 |

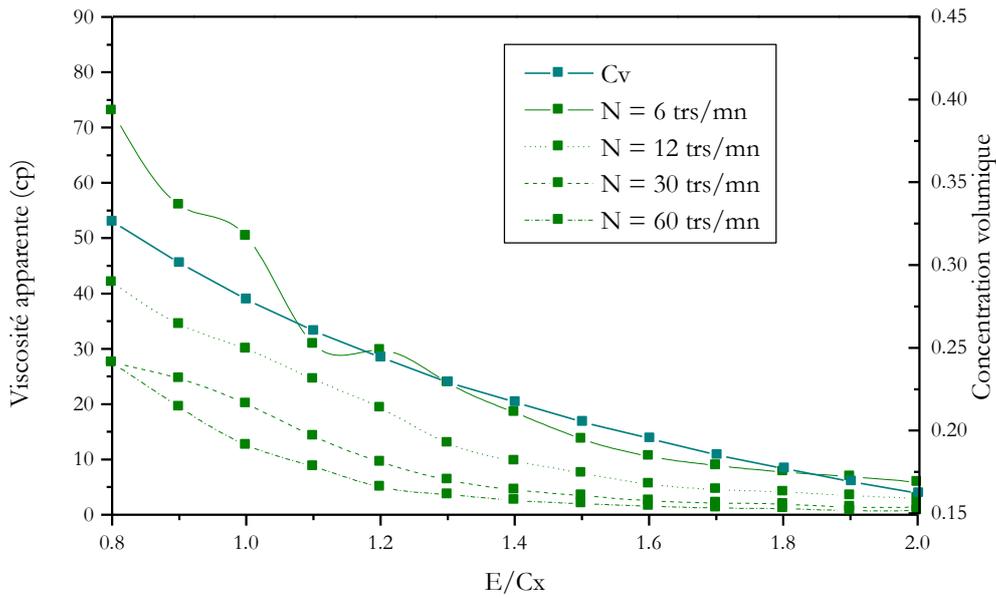


Figure 3.5 : Evolution de la viscosité apparente et de la concentration volumique en fonction du rapport E/Cx

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 |

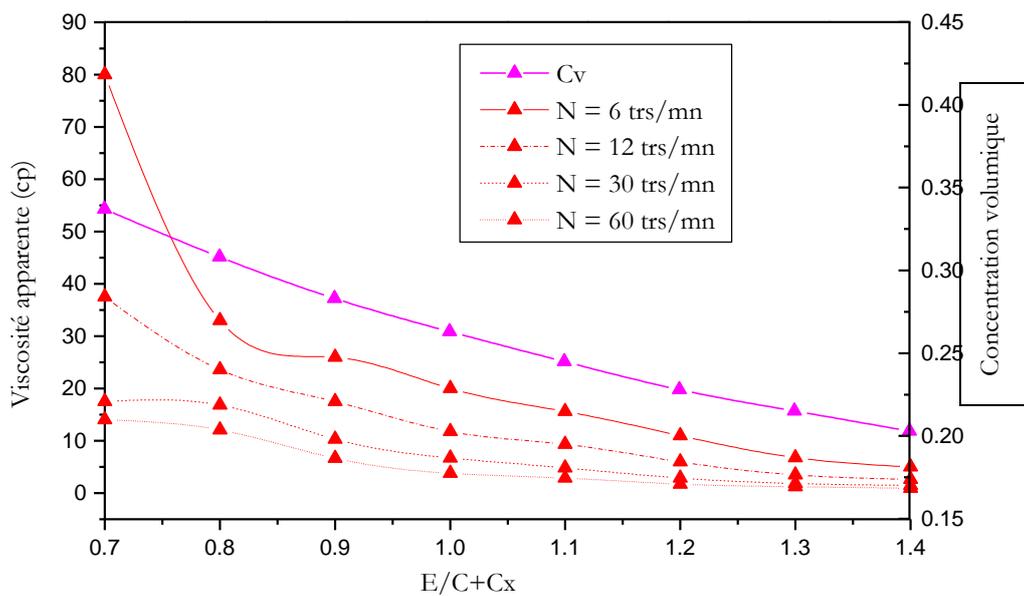


Figure 3.6 : Evolution de la viscosité apparente et de la concentration volumique en fonction du rapport E/C+Cx

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)

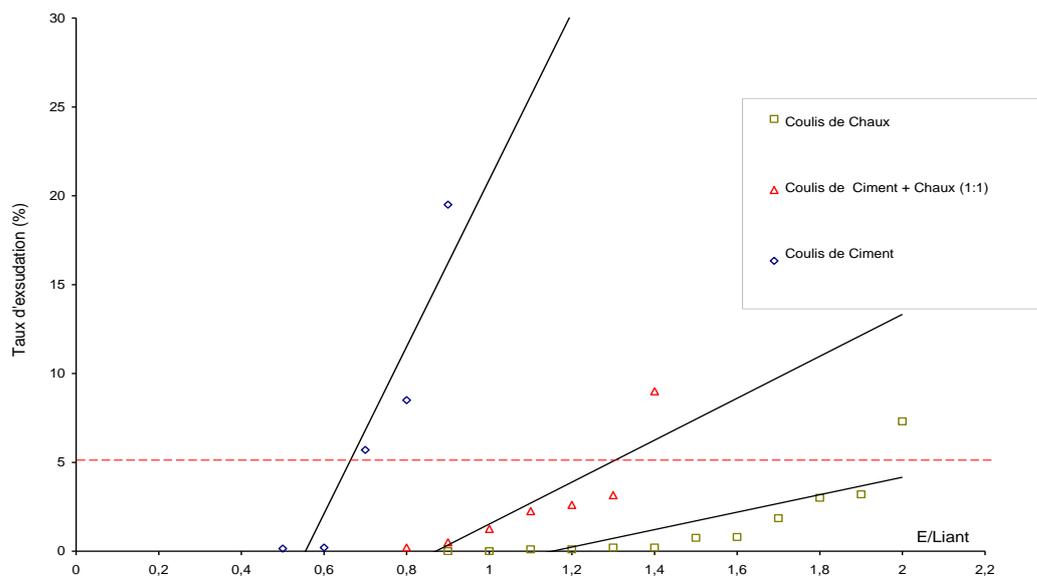


Figure 3.7 : Mesure du taux d'exsudation

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.

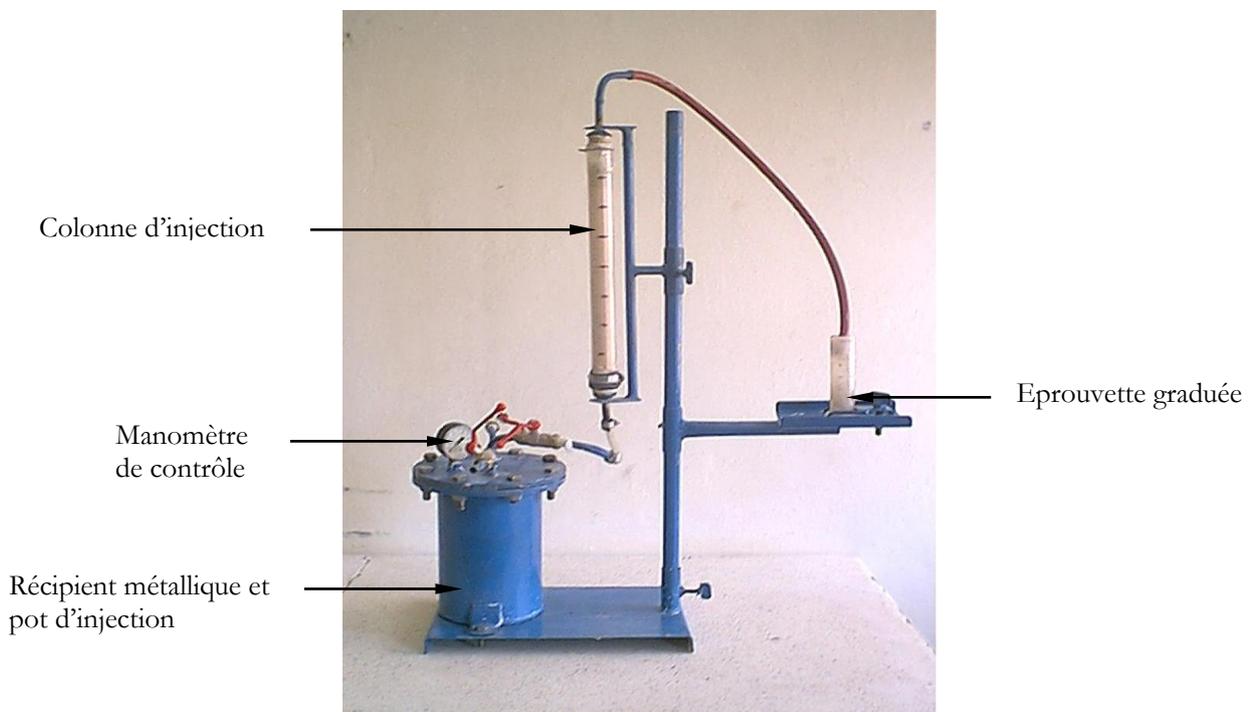


Photo 3.1 : dispositif d'injectabilité.

Le schéma décrit par la norme figure ci-dessous :

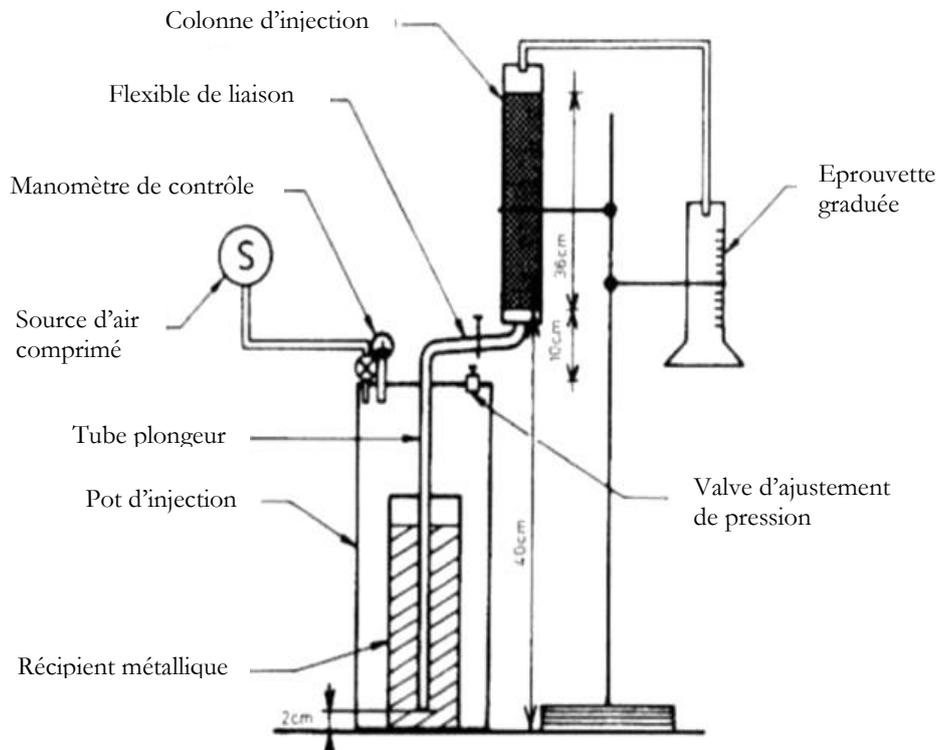


Figure 3.8 : Schéma du dispositif d'injectabilité selon la norme NFP 18-891.

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 | 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 |
| 1,0 | " | 3 | - | | |
| 0,9 | " | 7 | - | | |
| 50 | 50 | 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

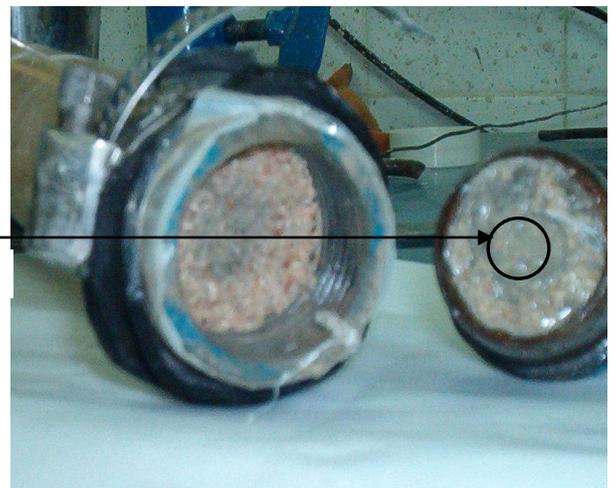


Photo 3.4 : Essorage du coulis de ciment



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.

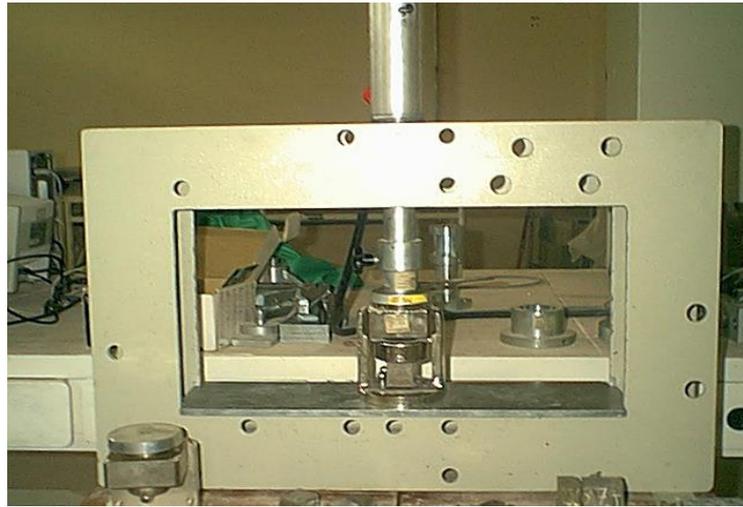


Photo 3.10 : Banc didactique.



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

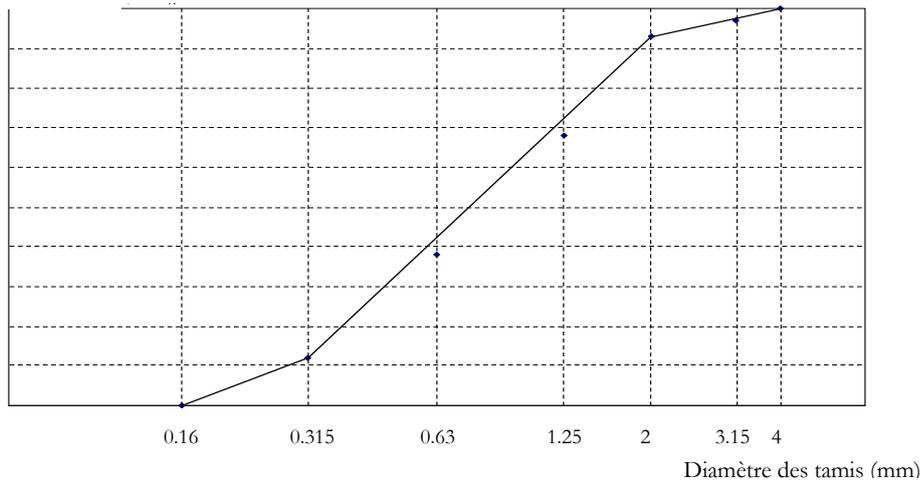


Figure 3.9 : Courbe granulométrique du sable utilisé.

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.

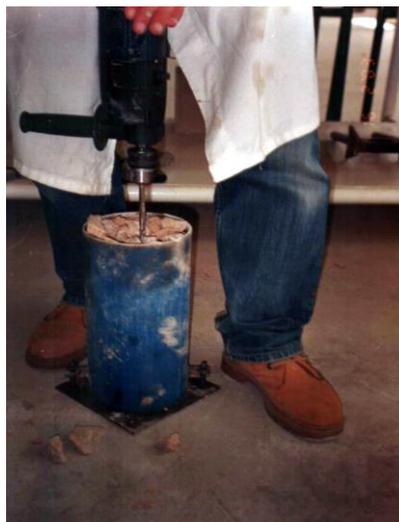


Photo 3.20 : Préparation du trou d'injection

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

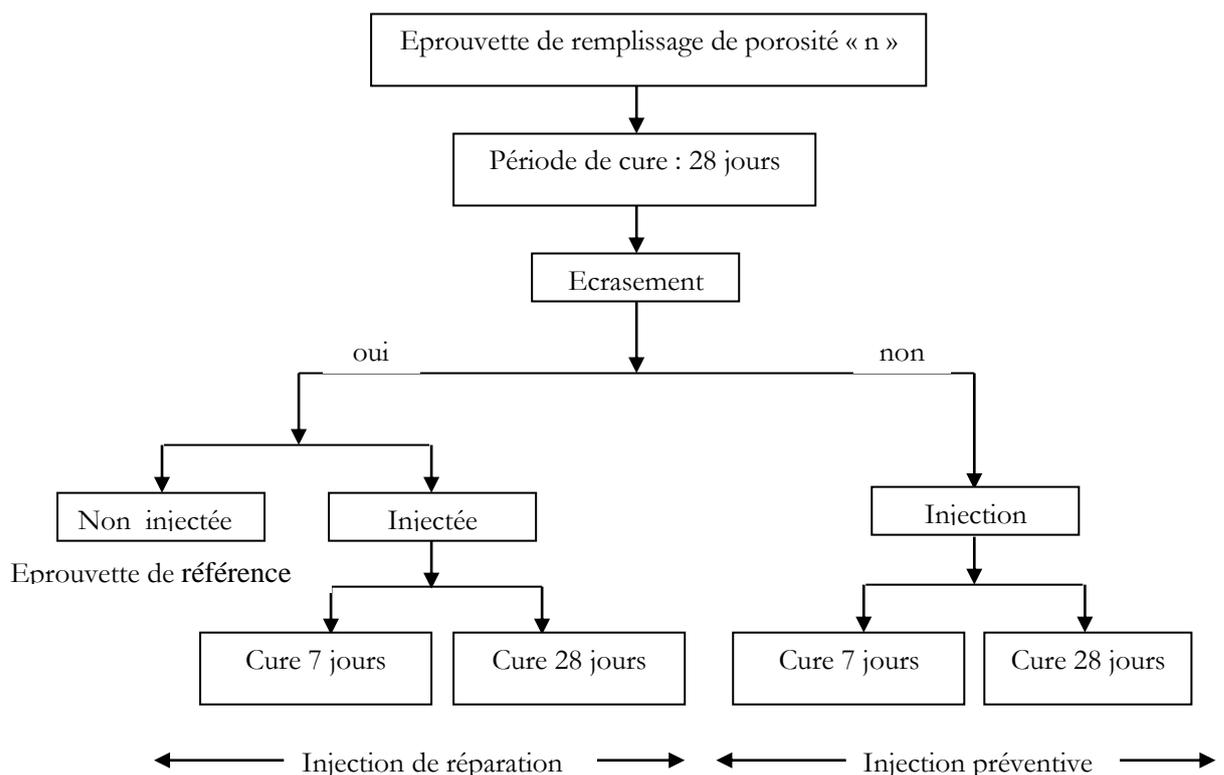


Figure 3.10 : Programme d'essai.

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.