

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)

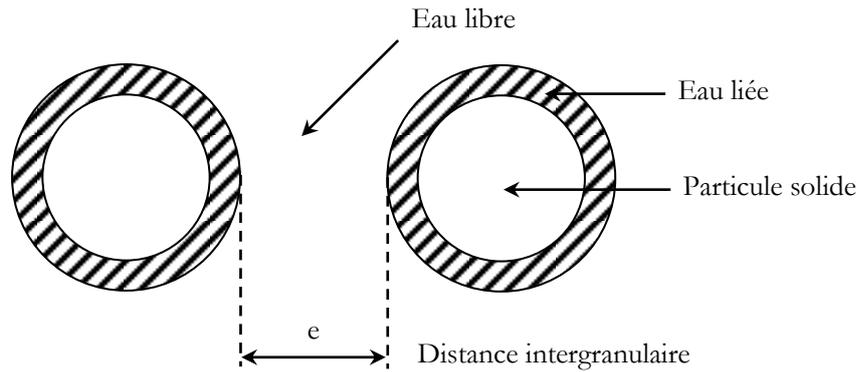


Figure 1.8 : Distance intergranulaire dans une suspension de ciment.

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 $0,15 D$.

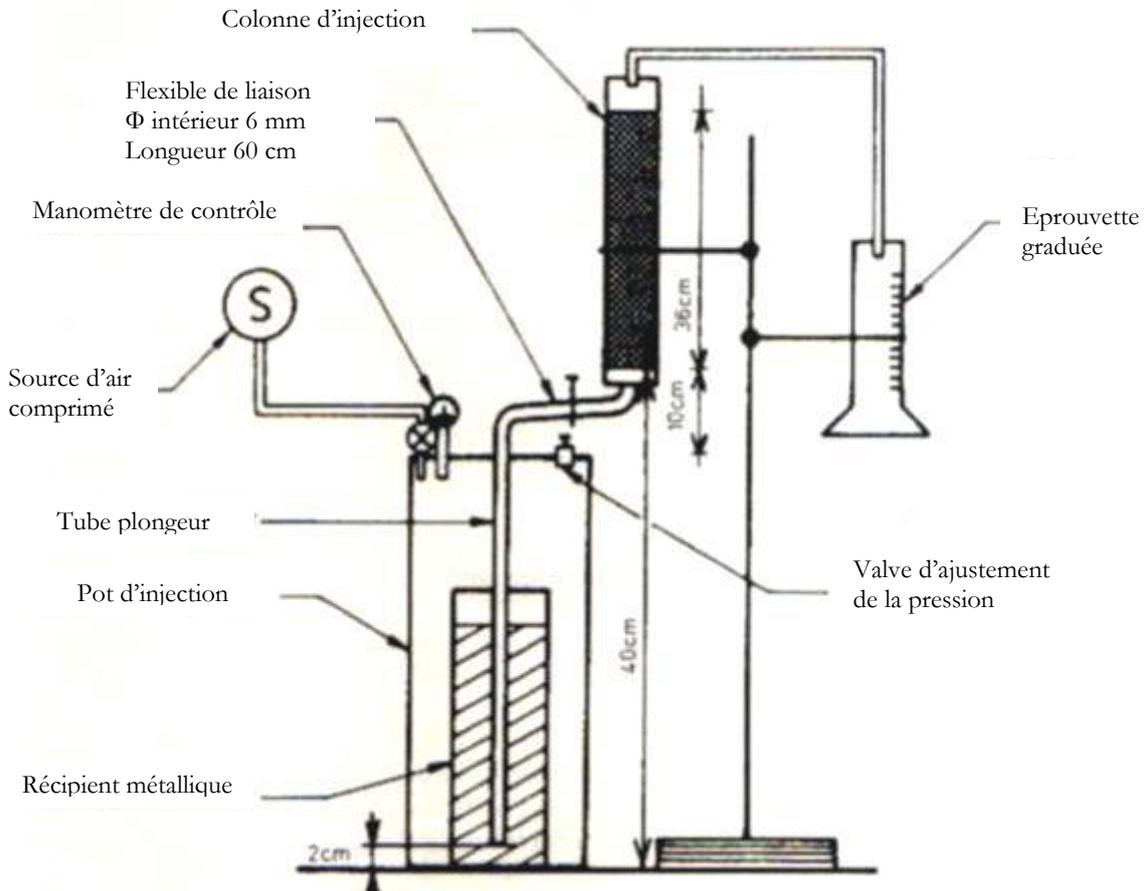


Figure 1.9: Dispositif de l'essai " d'injectabilité à la colonne de sable" (NF P 18-891)

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.

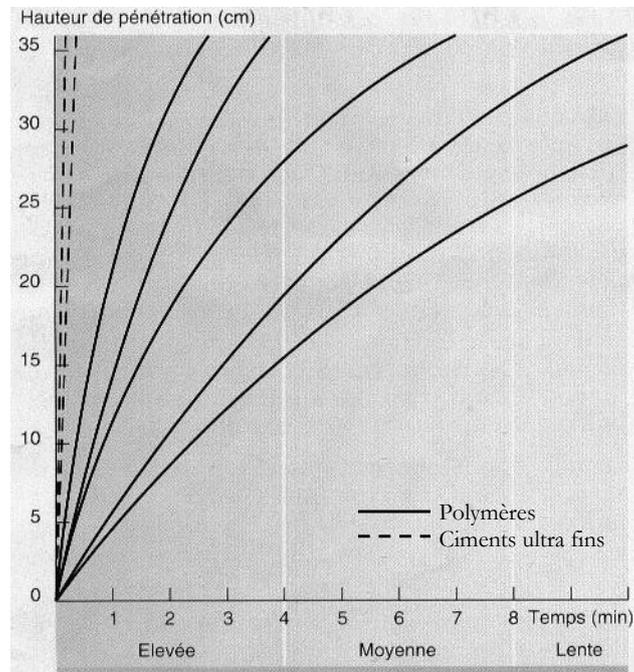


Figure 1.10 : Courbes d'injectabilité des coulis hydrauliques et des polymères.

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.

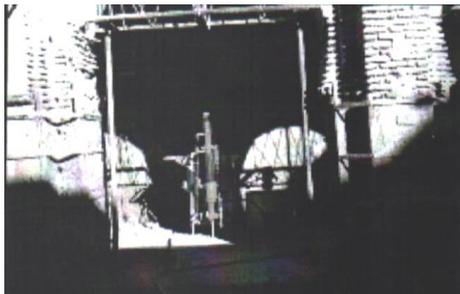


Photo 1.1 : Pompe d'injection

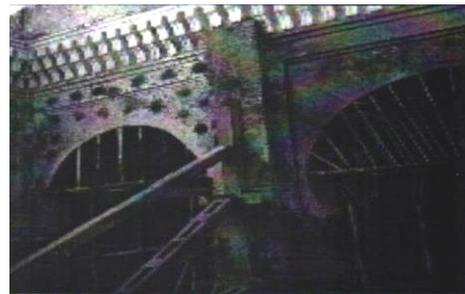


Photo 1.2 : Application de l'injection dans l'arc



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.