

Fiche Aide Mémoire

Injection de maçonneries en milieu marin



Sommaire

1. Contexte et champs d'application de la fiche «Aide-mémoire»

- . Référentiel technique
- . Généralités sur les maçonneries des ouvrages
- . Domaine d'application de la technique
- . Description sommaire de la technique

2. Éléments nécessaires à l'établissement du CCTP

- . Recherche documentaire
- . Evaluation visuelle
- . Investigations complémentaires

3. Prescriptions à apporter aux CCTP

- . Chapitre 1 du CCTP : Consistance et description des travaux
- . Chapitre 2 du CCTP : Préparation et organisation du chantier
- . Chapitre 3 du CCTP : Provenance, qualité et préparation des matériaux
- . Chapitre 4 du CCTP : Mode d'exécution des travaux

4. Contrôles des travaux

- . Généralités
- . Epreuves de convenance
- . Contrôle d'exécution
- . Réception

La conduite d'opérations de réhabilitation des structures de génie civil d'une manière générale, et des structures en environnement portuaire en particulier, nécessite de mobiliser des équipes de maîtrise d'ouvrages et/ou de maîtrise d'œuvre à chaque étape du projet : notamment en amont pour l'établissement des CCTP et en phase de chantier pour la réalisation des contrôles.

L'établissement des CCTP nécessite une maîtrise des référentiels normatifs/réglementaires et une bonne connaissance des produits/matériaux/techniques et des conditions d'exécution pour pouvoir spécifier des exigences adaptées au projet et au contexte.

De même, en phase travaux, cette maîtrise est nécessaire afin d'effectuer les vérifications et contrôles sur la base de critères spécifiques en lien avec les clauses du CCTP.

La présente fiche constitue un document méthodologique simple et synthétique traitant des opérations d'entretien spécialisé d'ouvrages en milieu maritime, notamment lors des phases d'établissement du projet de travaux et de préciser les étapes importantes et le rôle de chacun des acteurs.

Il s'agit d'un document à destination des équipes en charge de l'élaboration ou de la vérification du projet (CCTP notamment) et des équipes en charge du suivi des chantiers.

Cette fiche concerne les travaux d'injection de maçonnerie d'ouvrages maritimes : quais, môles, digues, bajoyers d'écluses ou de formes de radoub, musoirs ou culées de ponts mobiles.

Elle vient en complément de la fiche rejointoiement des ouvrages maçonnés en milieu marin. En effet, il est courant de devoir rejointoyer au préalable la maçonnerie de l'ouvrage avant de l'injecter.

Référentiel technique

Ces travaux d'injections de maçonneries font l'objet d'un référentiel technique constitué de règlements, de normes et de guides. La liste suivante, sans être exhaustive, recense les principaux documents encadrant ces opérations* :

RÉFÉRENTIEL TECHNIQUE

- [1] Fiche aide-mémoire «Le rejointoiement des ouvrages maçonnés en milieu marin»
<https://www.cerema.fr/fr/actualites/conduite-operations-maintenance-infrastructures-portuaires>
- [2] Guide CETMEF - Auscultation, surveillance et entretien des ouvrages maritimes – Fascicule 1 : Les ouvrages en maçonnerie, Février 2012
<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/alteration-du-beton-site-maritime>
- [3] Guide CETMEF – Pathologies des ouvrages portuaires : méthodes d'investigation, Septembre 2008.
<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/repairation-betons-alteres>
- [4] Guide Cerema – Pathologie de gonflement des maçonneries, Septembre 2008
<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/pathologie-gonflement-maconneries-site-maritim>
- [5] Guide du STRRES FABEM 6 - Réparation et renforcement des maçonneries, STRRES, Février 2016.
http://www.strres.org/beton_et_maconnerie_fabem-225fr.php
- [6] Norme NF P 95-107 Ouvrages d'art - Réparation et renforcement des maçonneries
Spécifications relatives aux techniques et aux matériaux utilisés.2002.
<https://www.afnor.org/acheter-une-norme/>
- [7] PETRA – Réparation
http://www.setra.fr/html/logicielsOA/PETRA/Bible_OA/bible_old.html
- [8] Fascicules n°2, 10, 30 et 51 de l'Instruction Technique sur la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art :
«Généralités sur la surveillance», «Fondations en site aquatique», «Ponts et viaducs en maçonnerie», «Ouvrages de soutènement»
<http://www.piles.setra.developpement-durable.gouv.fr/itseoa-r447.html>

* En complément, des normes de référence (essais, produits ou exécution) sont également citées dans le texte.

Généralités sur les maçonneries des ouvrages

Les structures en maçonnerie sont généralement massives : la stabilité est assurée par le poids du matériau. A ce titre, elles sont principalement utilisées pour soutenir des remblais (murs de quai, bajoyers), maintenir ou réguler des niveaux d'eau (retenues de bassin, barrages déversoirs) ou assurer une protection contre la mer (digues verticales). Elles sont également utilisées en protection de talus (perrés, carapaces de digues à talus par exemple). Dans ce cas, la structure en maçonnerie n'est pas massive mais constitue une couche de protection du matériau sous-jacent.

Une maçonnerie est constituée par un assemblage de blocs (pierres de taille, moellons bruts ou briques). L'assemblage de ces blocs est assuré par un mortier à l'exception des maçonneries de pierres sèches où la tenue des éléments se fait par contact direct et par frottement entre les éléments.

Dans une structure en maçonnerie courante, on distingue généralement deux principales composantes (voir schéma ci-après) :

La maçonnerie de parement généralement constitué d'un appareillage de maçonnerie de bonne qualité. L'épaisseur de cet appareillage est variable (de 0,3 à 1 m) ; il est constitué des éléments suivants :

- Les moellons (généralement équarris ou taillés) organisés selon des assises plus ou moins régulières ; il peut s'agir de moellons de pierre, de brique et dans certains cas de béton.
- Le mortier de hourdage qui sert à assurer la liaison entre les moellons constituant la maçonnerie de parement. Ce mortier doit remplir entièrement cet espace et avoir une résistance mécanique suffisante tant en compression qu'en cisaillement pour transmettre les efforts appliqués dans la structure.
- Le joint se rencontre en parement. Il remplit l'espace entre les pierres de parement et masque le mortier de hourdage dont il constitue la protection vis-à-vis des agressions extérieures. Son rôle principal est d'assurer l'étanchéité de la maçonnerie ainsi que la continuité du parement. Il a également un rôle esthétique.

Une maçonnerie dite de remplissage située à l'arrière de la maçonnerie de parement. Elle est le plus souvent de moins bonne qualité ; l'objectif étant d'apporter le poids nécessaire à la stabilité de la structure. Elle est constituée de blocs bruts de tailles variables de dimensions généralement plus petites que les moellons de parement. La quantité de mortier est plus importante. Le mortier assure la cohésion entre les moellons et assure la transmission des efforts.

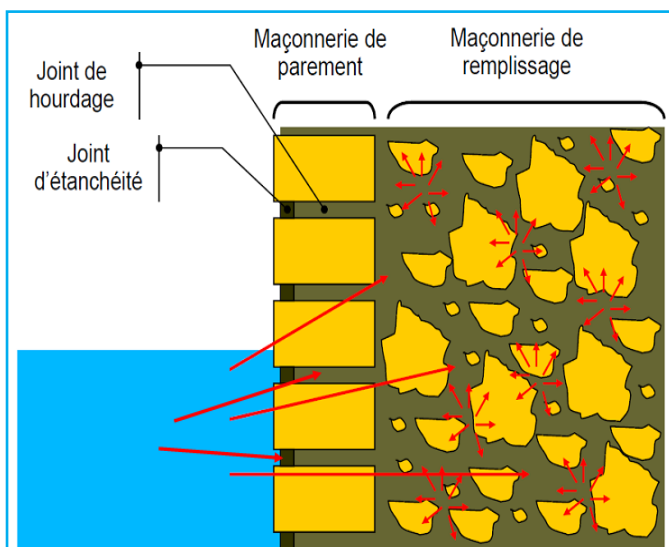


Figure 1 : Coupe schématique d'une structure maçonnée



Figure 2 : Vue de la maçonnerie de remplissage derrière un parement endommagé

Domaine d'application de la technique

La technique d'injection s'applique principalement aux structures en maçonnerie massive présentant une altération de la maçonnerie de remplissage.

Les injections permettent de traiter la maçonnerie par apport de matériau dans des zones non accessibles directement pour rétablir la compacité, le monolithisme et la cohésion de la maçonnerie (rétablissement des liaisons mécaniques entre les éléments de la maçonnerie, comblement des vides).

Selon l'objectif visé, on distingue quatre catégories d'injection :

- Les injections de remplissage : elles sont destinées au comblement des vides ou de toutes cavités situées au coeur même de la maçonnerie.
- Les injections de consolidation ou de régénération : elles sont prévues pour augmenter la résistance mécanique de la maçonnerie (régénération d'un mortier altérés par exemple).
- Les injections de scellement : elles sont dédiées au scellement ou au clavage d'éléments (barres, pieux, moellons).
- Les injections d'étanchement : elles visent à réduire la perméabilité de la maçonnerie.

Une injection peut répondre simultanément à plusieurs de ces objectifs.



Les injections de fondations ou de sol, qui relèvent de techniques particulières et mobilisent des compétences spécifiques, ne sont pas traitées dans la présente fiche.

Désordres et situations pouvant relever du domaine d'application de la technique :

- présence de vides internes avérés
- circulation /résurgence d'eau, défaut d'étanchéité
- déformations de la structure (affaissement, gonflement de parement)

Par ailleurs, l'opportunité de procéder à des injections peut être questionnée dans différentes situations telles que :

- modification des conditions d'exploitation d'un ouvrage (augmentation des charges d'exploitation par exemple)
- augmentation des charges permanentes (ré-haussement d'un ouvrage par exemple)
- implantation d'une nouvelle structure (appui par exemple)
- modification de l'environnement de l'ouvrage (augmentation du niveau d'eau d'un bassin par exemple)

Le retour d'expérience montre que les injections de maçonneries peuvent avoir une efficacité en deçà de l'objectif escompté. La réussite d'une opération d'injection dépend principalement des trois considérations suivantes :

- La qualité du diagnostic préalable (fiabilité et complétude),
- Une description précise des objectifs de l'opération (établissement d'un projet de réparation),
- L'expérience de l'entreprise de travaux et de son équipe (procédures de réalisation et de contrôles).

Ces considérations sont d'autant plus importantes qu'il est difficile de s'assurer (en cours de travaux et à posteriori) de la bonne exécution des injections et de leurs efficacités.



Dans le cas particulier d'une attaque marine de type « gonflement de maçonnerie » [4], l'injection peut-être :

- **Solution provisoire en attente d'une réparation, d'un confortement ou d'un remplacement de la structure**
- **Solution définitive dans le cas où le suivi montrerait que les dégradations n'évoluent plus.**



Structures en pierres sèches : ces dernières n'ayant pas été conçues pour cela, elles ne doivent pas faire l'objet d'injections sans étude préalable, au risque de modifier leur comportement (modification des circulations d'eau, augmentation de la poussée hydrostatique) et d'amorcer une instabilité.



Les injections entraînent une modification de la circulation des eaux et des gaz dans la maçonnerie. Dans le cas des structures en maçonnerie ayant une fonction de soutènement, il faut donc procéder de façon à éviter l'accumulation d'eau à l'arrière de l'ouvrage.

Description sommaire de la technique

L'injection consiste à faire pénétrer, à partir de forages, un fluide (généralement appelé coulis) capable, après remplissage des vides (cavités, fissures, fractures) du milieu traité d'en réduire la perméabilité, d'en augmenter la résistance mécanique et/ou d'en améliorer la cohésion en rétablissant le monolithisme de la structure.

Voir Réf [5]

L'injection peut se faire par le parement latéral ou depuis la surface.

Cette méthode confortative permet d'intervenir en profondeur, en limitant les impacts et les contraintes au droit de l'ouvrage.

Le traitement par injection comprend les étapes suivantes :

1. Circonscription de la structure à injecter afin de contenir le produit d'injection dans la zone à traiter,

Lorsque la maçonnerie de parement est altérée (disjointoiement, lacunes en moellons), l'injection doit être précédée d'un confinement pour éviter les fuites de coulis. Généralement, le confinement consiste en un rejointoiement du parement. Dans certains cas particuliers, le confinement peut nécessiter des opérations lourdes ; notamment dans les zones immergées :

- application d'un voile ou d'une bâche en parement (mise en œuvre par des plongeurs),
- mise en place d'une coque ou d'un rideau rigide suivi d'un coulage de béton ou de mortier dans l'espace situé entre le dispositif et le parement de maçonnerie,
- réalisation d'un batardeau permettant de procéder « à sec » au rejointoiement du parement.

2. Réalisation des forages d'injection (et de sortie dans certain cas),

3. Mise en place des dispositifs d'injection (injecteurs, évents ou tubes spécifiques selon les modalités d'injection),

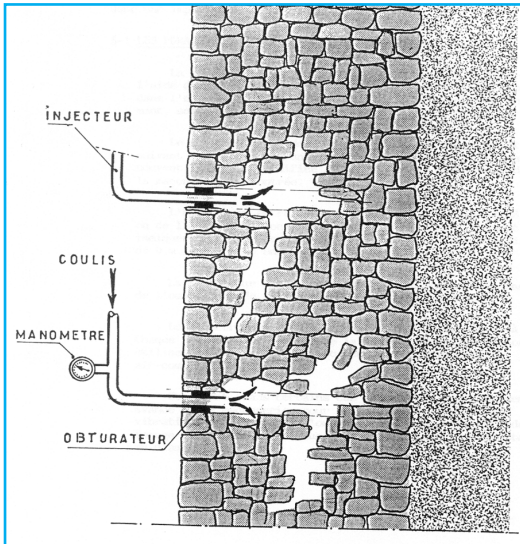
4. Injection :

- Forages horizontaux : depuis le parement par pianotage et par passes ascendantes,
- Forages verticaux : depuis le dessus, de bas en haut, par pianotage et depuis la périphérie vers le centre de la structure.



En fonction de la nature de l'altération de la maçonnerie révélée par les études préliminaires et des contraintes d'accès à l'ouvrage, il existe plusieurs modalités d'injection.

Injection directe depuis le parement vertical



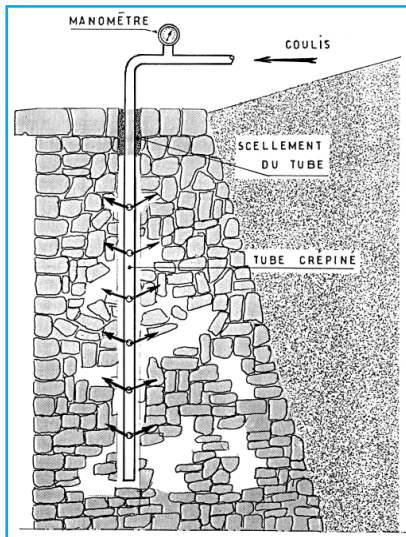
Tubes à injection directe :

- Remplissage de cavités importantes facilement accessibles
- Scellement provisoire ou obturateur

Tubes évents :

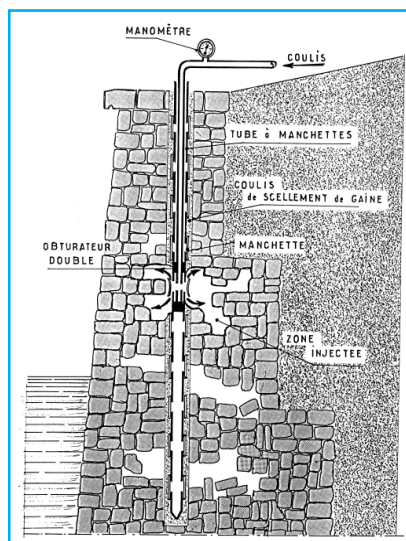
- Suivi de l'évolution du coulis et du degré de remplissage de la zone traitée
- Si présence d'eau dans la structure, évacuation de l'eau lors de l'injection

Injection verticale



Injection à l'aide de tubes crépinés :

- Injection du coulis sur l'ensemble de la profondeur du forage
- Réservé aux maçonneries très altérées ou constituées de matériaux très poreux



Injection à l'aide de tubes à manchettes :

- En plastique ou métallique
- Plus élaboré et complexe dans son utilisation
- Bien adapté aux maçonneries hétérogènes
- Obturateur double
 - Injection à différents niveaux
 - Possibilité d'utiliser des coulis de natures différentes selon les niveaux.

2 ÉLÉMENTS NÉCESSAIRES A L'ÉTABLISSEMENT DU CCTP

2

L'efficacité de l'injection dépend en grande partie de la qualité du diagnostic préalable. Il doit être conduit de façon méthodique en suivant un programme précis.

Le diagnostic doit permettre de s'assurer que la structure relève d'un traitement de type injection.



En particulier, Il convient de s'assurer, que l'origine des désordres n'est pas liée à un problème de fondation. Cette situation nécessiterait alors des actions spécifiques autres que l'injection telle que décrite dans la présente fiche.

Recherche documentaire

A réaliser par le gestionnaire

Un examen du dossier d'ouvrage (archives et documents de référence) est à réaliser afin de recueillir des informations suivantes :

- les éléments relatifs à la construction de l'ouvrage (date de construction, nature du liant, caractéristiques de l'appareillage de la maçonnerie, coupe de l'ouvrage, etc.).
- les actions de surveillance effectuées sur l'ouvrage (visites d'évaluation, inspections détaillées, diagnostics, suivis dimensionnels, etc.),
- la date et la nature des travaux d'entretien et de réparation antérieurs (type de réparation et de produits, parties concernées, etc.).



La connaissance de la date de construction est essentielle puisqu'elle permet notamment d'avoir une idée du type de liant ayant été utilisé pour confectionner le mortier de maçonnerie et donc de connaître sa sensibilité chimique à l'eau de mer.

Liant	Époque	Sensibilité à l'eau de mer	Processus de dégradation du mortier
Chaux aérienne	Depuis l'époque romaine	Faible (Compte tenu du contexte d'utilisation)	La chaux aérienne ne durcit qu'à l'air. Les mortiers à base de chaux aérienne ne sont normalement pas en contact avec l'eau mais peuvent néanmoins être exposés aux embruns. Les sulfates apportés par les embruns peuvent conduire à une réaction formant du gypse. Si l'apport de sulfates est important la formation de gypse peut exercer des contraintes dans la maçonnerie. Cependant, le risque est limité car l'absence d'eau limite la pénétration des sulfates dans la maçonnerie
		Élevée (Si le mortier est exposé à l'eau de mer)*	
Chaux hydraulique	A partir de 1818	Élevée	La chaux hydraulique s'emploie aussi bien dans l'eau que dans l'air. Elle fait prise sous l'eau. Le processus de durcissement est lent et peut ne pas être achevé. Au contact de l'eau de mer : le liant ayant fait prise peut être attaqué par une solubilisation lente (perte de cohésion du mortier) ; le liant n'ayant pas fait prise est susceptible de former des produits délétères expansifs.
Ciment portland	A partir de 1850	Fort (Ciment portland naturel)	Le ciment portland (naturel dans les 1 ^{er} temps puis artificiel avec l'amélioration des dispositifs de fabrication) fait prise en s'hydratant et ce même sous l'eau. L'eau de mer peut réagir avec ce liant et former des sels expansifs susceptibles d'endommager le mortier. Les premiers ciments (naturels) sont particulièrement sensible à l'attaque des sulfates.
		Modérée (Ciment portland artificiel)	
Ciment aux laitiers	A partir de 1880	Faible	Les ciments aux laitiers sont fabriqués avec des laitiers de hauts fourneaux. L'ajout de laitier confère au liant une meilleure durabilité vis-à-vis des attaques chimiques de l'eau de mer.

* Modification de l'environnement de l'ouvrage conduisant à une exposition à l'eau de mer (réhaussement du niveau d'eau dans un bassin par exemple)



En présence de sulfates, la formation de certaines formes d'ettringite ayant des propriétés expansives peut générer des contraintes importantes dans le matériau.

Les sulfates peuvent également conduire à la formation de thaumasite entraînant la dissolution du liant et donc la perte de cohésion du mortier.

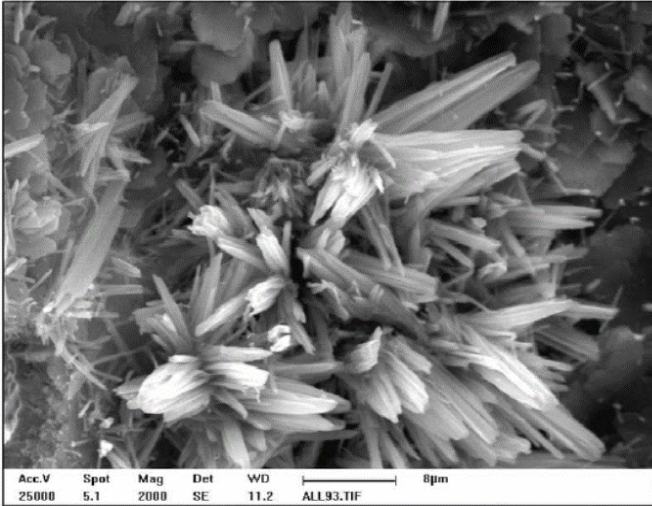


Figure 3: Cliché obtenu au microscope électronique à balayage (grossissement x 2000) sur un mortier présentant des aiguilles d'ettringite.



La présence de magnésium peut conduire à la formation de brucite. Cette dernière n'a pas de propriétés liantes et sa formation peut donner un liant friable sans cohésion.

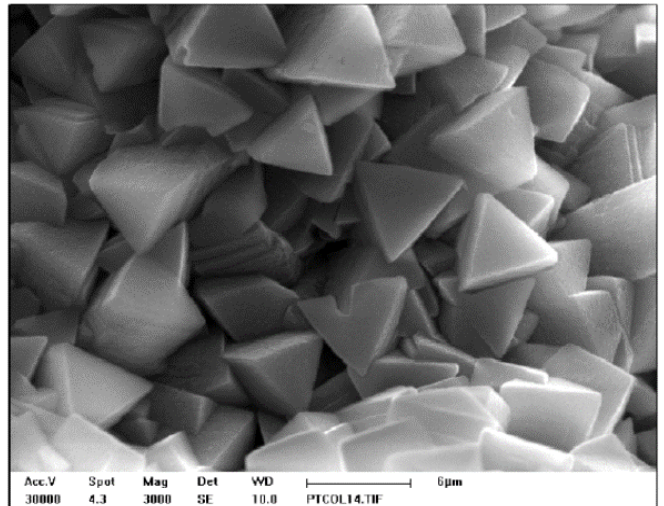


Figure 4: Cliché obtenu au microscope électronique à balayage (grossissement x 3000) sur un mortier présentant des cristaux de brucite.

Évaluation visuelle

Conduite à l'initiative et sous la direction du gestionnaire par un organisme spécialisé

L'établissement du marché de travaux doit être précédé d'un examen visuel approfondi (de type inspection détaillée selon la définition de [8]). Cet examen est programmé lors de périodes propices à l'observation des désordres (coefficient et horaires de marée permettant un examen rapproché de l'intégralité des parements). Lorsque la structure comprend des parties constamment immergées, l'examen doit comprendre une inspection subaquatique.

L'évaluation visuelle comprend a minima :

- un relevé exhaustif des désordres et un report sur plans,
- une synthèse des désordres observés comprenant notamment leur caractérisation qualitative (gonflements, affaissements du remblai à l'arrière de l'ouvrage, fissures, fractures, désorganisations de la maçonnerie, dégradations des joints, résurgences d'eau, etc.),
- une évaluation de la qualité de la maçonnerie de parement et plus particulièrement des joints de parement (voir [1])
- une analyse et une interprétation des désordres observés : défauts de construction, chocs, vieillissement du matériau, abrasions, modification des conditions d'exploitation, etc.
- des suggestions d'actions d'entretien et/ou de réparation et d'éventuelles investigations complémentaires ; en intégrant dans ces propositions les conditions d'accès aux structures.



Selon le contexte, l'évaluation visuelle pourra nécessiter un nettoyage général ou partiel de l'ouvrage afin d'éliminer tous ce qui pourrait masquer des défauts : végétations, algues et mollusques.

Les signes de circulation d'eau dans la structure en maçonnerie sont à rechercher en priorité (résurgence, efflorescence). Ils sont l'indication :

- d'un défaut d'étanchéité (pénalisant pour l'exploitation de certains ouvrages de maintien ou de régulation de niveau d'eau par exemple),
- d'un endommagement de la maçonnerie de remplissage (présence de vides, de fracturation).

Les circulations d'eau dans la maçonnerie peuvent conduire à terme à :

- des départs de fines d'un éventuel remblai arrière (cas des soutènements),
- une dégradation progressive du mortier de maçonnerie par contact avec l'eau de mer (altération chimique).

Investigations complémentaires



Le diagnostic complémentaire est conduit à l'initiative et sous la direction du gestionnaire par un organisme spécialisé.

Voir Article Réf [3]

Dans le cas où l'examen visuel conclu à une situation susceptible de nécessiter un traitement par injection, des investigations complémentaires sont indispensables. Elles permettront de confirmer ou non la nécessité de procéder à des injections et dans ce cas de définir les modalités d'injection.

Dans le cas où les désordres observés se manifestent par des déformations ou des déplacements (affaissement, gonflement, déversement), il est recommandé de mettre en place, dans un premier temps, une surveillance afin d'évaluer leur évolution :

- Suivi photographique (suivi de l'altération du parement)
- Suivi de déformation du parement (scan 3D, inclinomètres, lasers, fil à plomb par exemple)
- Suivi topographique par nivellement

La définition précise des travaux d'injection nécessite la réalisation de sondages de reconnaissance, d'essais in situ et en laboratoire.

Sondage et essais sur prélèvements :

Investigation	Intérêt, objectif
Sondages carottés verticaux, à minima en zone saine (zone témoin) et en zone altérée* (les sondages sont réalisés si possible jusque dans les fondations de la structure)	Caractérisation visuelle de la nature et l'intégrité de la maçonnerie (vides, cohésion, fracturation et état du mortier)
Evaluation du RQD (Rock Quality Designation)*	Appréciation qualitative du taux de fracturation de la maçonnerie
Endoscopie, imagerie de parois dans les forages carottés **	Caractérisation visuelle de la nature et l'intégrité de la maçonnerie (vides, cohésion, fracturation et état du mortier)
Réalisation d'essais Lugeon depuis les forages carottés*	Caractérisation qualitative de la perméabilité de la maçonnerie
Sondages pressiométriques, pénétrométriques **	Caractérisation des propriétés mécaniques du sol de fondation
Réalisation d'essais de caractérisation en laboratoire du mortier et des moellons (résistance à la compression, porosité, etc.)* **	Détermination des propriétés mécanique et physico-chimique des matériaux

* investigation indispensable

** opportunité des essais à juger au cas par cas

Dans certains cas, une auscultation par RADAR pourra être envisagée. Cependant, compte-tenu du caractère hétérogène de la maçonnerie et de l'éventuelle présence d'eau, la profondeur d'auscultation restera limitée au premier mètre de profondeur. L'auscultation pourra alors permettre de détecter et localiser des vides et des hétérogénéités. Une étude de faisabilité préalable est indispensable.

D'autres techniques d'auscultation non destructives existent et peuvent être envisagées dans certains cas (tomographie par exemple).

En cas de suspicion de gonflement par attaque marine, des essais complémentaires sur échantillons de mortier sont à réaliser (voir réf. [4]) :

- Analyse au Microscope Électronique à balayage (MEB) pour caractériser la microstructure et détecter la présence de produits d'altération (ettringite, brucite, gypse),
- Analyse chimique élémentaire (dosage de la teneur en chlorures, en sulfates et en magnésium, information sur la nature du liant utilisé par exemple),
- Analyse minéralogique (estimation du dosage en liant).



Figure 5: Caisse de carottes issues d'un sondage carotté vertical dans une structure en maçonnerie



Figure 6 : Imagerie de paroi - Vue à 360° de l'intérieur d'un forage carotté



Les investigations doivent faire l'objet d'un programme détaillé justifiant les différentes propositions et précisant les procédures associées (normes, protocoles, implantation).



L'évaluation visuelle complétée par les investigations complémentaires permet de formuler un diagnostic sur l'intégrité de la maçonnerie et l'opportunité et la pertinence de réaliser des injections. On s'assurera en particulier que la structure ne présente pas de faiblesse de ces fondations. Dans ce cas, une étude complémentaire devra être conduite. Enfin, si les investigations montrent l'existence d'une attaque marine sur le mortier de la maçonnerie de remplissage, on se référera aux recommandations du document [4]. Dans ce cas, la technique d'injection peut ne pas être appropriée ou constituer une solution de traitement provisoire.

Chapitre 1 du CCTP Consistance et description des travaux

Contexte climatique et environnemental

Le CCTP indique que l'ouvrage est en site maritime afin d'imposer des produits d'injection résistants aux attaques chimiques de l'eau de mer.

En cas d'exposition au marnage, le CCTP précise les cotes marines caractéristiques (PHMA, PMVE, PMME, NM, BMME, BMVE, PBMA).

Il pourra être judicieux en complément de préciser les classes d'exposition de la structure selon la norme NF EN206/CN .

Voir PETRA - Réparation Réf [5]

Description de l'ouvrage

La structure faisant l'objet des travaux est décrite le plus précisément possible :

- Description de la nature de la structure (mur de soutènement, bajoyer, muraille de digue verticale, mur de retenue, barrage déversoir, etc.) et la nature de ses fondations (sur pieux, sur fascine, etc.),
- Description précise de la maçonnerie (maçonnerie de parement et de remplissage) : dimension des moellons, type d'assise, ouverture des joints, nature du liant, etc.),
- Description détaillée de l'état de la structure (maçonnerie de parement et de remplissage) : état du mortier d'étanchéité, de hourdage et de remplissage, présence de vides, de fracturation, présence de produits pathogènes, etc.
- Résultats du diagnostic (joints en annexe).

Nature des travaux

Le CCTP précise les travaux à exécuter :

- Nature des travaux d'injections à réaliser (injection de remplissage, de consolidation/régénération, de scellement et/ou d'étanchement)
- Surfaces et localisation des zones à traiter en les délimitant si nécessaire sur un plan à l'échelle précisant les côtes marines
- Mode de confinement préalable à la réalisation des injections (notamment dans les zones constamment immergées) :
 - rejointoiement du parement, remplacement de moellons de parement
 - autre mode de confinement
- Éventuellement, les travaux préalables ou complémentaires à l'injection :
 - renforcement des fondations
 - création de barbacanes (uniquement dans le cas de structures de soutènement et à implanter au-dessus des plus hautes eaux en cas de marnage)
 - assainissement, drainage

Contraintes particulières imposées au chantier

Le CCTP décrit les parties à traiter en précisant les conditions de marnage le cas échéant et les contraintes d'accès (abaissement de plan d'eau, mise en place de batardeaux, etc.) et les contraintes liées à l'exploitation de l'ouvrage concerné (sécurité, accessibilité au site, etc.).

Chapitre 2 du CCTP : Préparation et organisation du chantier

L'entreprise a l'obligation de fournir un Plan Qualité

Il comporte :

- des dispositions et documents d'organisation générale,
- des dispositions d'exécution,
- des dispositions de suivi d'exécution.

Les dispositions et documents d'organisation générale traitent les points définis ci-après :

- identification des parties concernées : maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entreprise titulaire, sous-traitants et fournisseurs principaux,
- organigramme et encadrement responsable de l'opération, avec indication de sa qualification et de ses références professionnelles,
- désignation d'un responsable pour chaque tâche de contrôle,
- principes et conditions d'organisation du contrôle avec définition des points d'arrêt et des points critiques.

Les dispositions et documents d'exécution (procédures, modes opératoires, instructions etc ...) comprennent, pour l'essentiel :

- les listes des moyens utilisés (produits, personnel et matériel),
- les épreuves de convenances à réaliser avant travaux,
- la description des méthodes, modalités, modes opératoires de mise en œuvre des travaux,
- la liste et les modalités des opérations de contrôle et vérifications à effectuer.

L'entreprise fournira a minima deux procédures d'exécution : une relative au confinement de la structure à injecter, l'autre relative à l'injection.



Exigences environnementales :

La réalisation d'injection peut produire des départs de produits non maîtrisés directement dans l'eau de mer ou dans les sols.

L'entreprise doit fournir un PRE, détaillant notamment les dispositions mises en place pour éviter ces pollutions. Les déchets doivent être récupérés et leur traitement réalisé conformément aux prescriptions du PRE.

Chapitre 3 du CCTP : Provenance, qualité et préparation des matériaux

Produits pour les injections

Les produits utilisés et les contrôles effectués doivent être conformes et répondre aux spécifications de la norme NF P95-107.

- Eau de gâchage et d'apport : elle doit répondre aux prescriptions de la norme NF EN 1008 et de l'article 82.3 du fascicule 65 du CCTG.
- Ciments : les ciments employés doivent être conformes aux normes NF EN 197-1, NF EN 197-2 et FD P 15-010, et être Prise Mer (NF P 15-317).



Dans le cas général, la finesse des ciments courants convient mais dans certains cas où la perméabilité mesurée serait très faible ($> 10^{-3}$ m/s), des ciments fins à ultra-fins (20 à 6 μ m) seront plus adaptés (microciments) .

Composition du coulis

La composition du coulis est proposée par l'entreprise qui la soumet pour avis au maître d'œuvre.

Elle est définie en fonction des critères suivants :

- Dimensions des vides/fracturation à combler ou de la perméabilité de la maçonnerie,
- Compacité du milieu à traiter (coulis fluide si forte compacité, coulis épais si faible compacité),
- Aggressivité de l'environnement (ciment PMES et nature du ciment adaptée si besoin en cas d'agression chimique),
- Durée des phases d'injection (exigence sur le maintien de la fluidité/consistance du coulis).

Les propriétés attendues du coulis sont les suivantes :

- Pouvoir de pénétrabilité,
- Stabilité (risque de délavage et de ségrégation),
- Résistance mécanique,
- Durabilité (risque d'altération due à l'eau de mer ou agression chimique).

Selon le contexte et la nature de la maçonnerie à traiter, la composition du coulis peut être très variable, allant du mortier à la résine très fluide.

En général, le coulis est composé de ciment, d'eau et de bentonite (**coulis ternaire**). Bien que moins fluide qu'un **coulis binaire**, il gagne en homogénéité, en stabilité et en résistance mécanique.

Si les quantités à injecter sont importantes (dimensions importantes des vides) et que la perméabilité de l'ouvrage le permet, il peut être intéressant d'avoir recours à un **coulis chargé** (mortier) d'un constituant inerte (fillers, cendres volantes ou sablon).

Plusieurs compositions différentes peuvent être nécessaires sur un même ouvrage en fonction de l'hétérogénéité de la maçonnerie et/ou des arrivées d'eau.



Les coulis d'injection

Type	Constituants possibles	Propriétés
Coulis de ciment (binaire)	- Ciment - Eau	- Suspension instable, homogène si maintenue en mouvement - Résistance assez élevée - Injection des fissures de quelques mm - Rayon d'action limité (blocage rapide)
Coulis de ciment adjuvanté (tertiaire)	- Ciment - Eau - Bentonite - Plastifiant - silice	- Moins fluide mais plus stable - Rayon d'action élargi - Adapté aux maçonneries immergées (résistance au délavage)
Coulis chargé (mortier)	- Ciment - Eau - Fillers - Sables	- Volume d'injection important (réduction des coûts) - Nécessite un matériel d'injection plus puissant.



Dans le cas de travaux en zone de marnage, si des circulations d'eau de mer dans la maçonnerie sont possibles, le CCTP exigera un produit ayant un temps de prise compatible avec les conditions de réalisation.

Injection de résine expansive

Il existe des techniques d'injections de résines expansives, principalement utilisées pour des reprises de fondations de bâtiments en sous-oeuvre. Leur caractère expansif permet notamment de redonner des performances mécaniques au sol.

Ces produits peuvent être utilisés pour des injections de maçonneries en milieu maritime notamment pour remédier ponctuellement à des arrivées d'eaux, avant de procéder aux injections de coulis classique.

Bien qu'elles soient injectées à faible pression, ces résines ont des caractéristiques d'expansion importantes ce qui peut présenter un risque possible d'endommagement de la structure si l'exécution n'est pas parfaitement maîtrisée.

Un suivi géométrique continu doit alors être mis en place pour prévenir toute déformation excessive.



Cette technique est maîtrisée actuellement par peu d'entreprises et le retour d'expérience en ouvrages maritimes reste limité à ce jour.

Le coût de ces produits étant élevé, leur utilisation est, à l'heure actuelle, limitée à des contextes particuliers.

Travaux préparatoires

Les travaux préparatoires concernent principalement la réalisation éventuelle d'un **confinement périphérique de la structure** pour éviter les fuites de coulis d'injection. Quand il est nécessaire, ce confinement peut être réalisé par un simple rejointoiement du parement de la maçonnerie. L'opération est plus délicate lorsque l'état de la maçonnerie de parement en zone constamment immergée est altérée (disjointoiement, lacunes en moellons, cavités, maçonnerie désorganisée).

Selon l'état de la maçonnerie et la géométrie de la structure, différentes techniques peuvent alors être utilisées :

- rejointoiement, reprise de maçonnerie (comblement) par des plongeurs : adaptés aux maçonneries peu altérées,
- application d'une membrane étanche provisoire en surface sur la périphérie de la structure en maçonnerie : adaptée aux ouvrages peu exposés à la mer (courant, houle),
- création d'une enceinte ou d'une coque (rideau de palplanches, paroi composite par exemple) en périphérie de la structure suivi d'un comblement de l'espace entre l'enceinte et le parement de la maçonnerie : ce scénario nécessite une étude préalable spécifique.

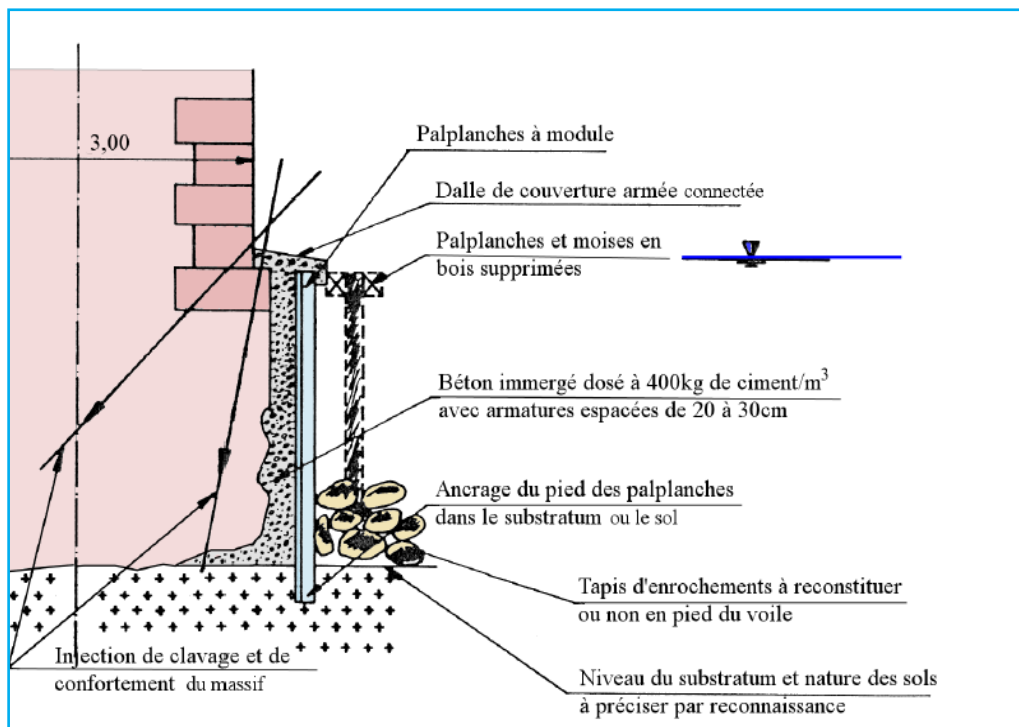


Figure 7: Exemple de confinement préalable à l'injection d'une partie de structure en zone constamment immergée

Dans le cadre d'un marché, les modalités de confinement peuvent faire l'objet d'une autorisation à variantes.



Pour les ouvrages de soutènements, une réflexion préalable devra être faite sur les dispositifs de drainage (barbacanes et drains)

Travaux d'injection

Les travaux d'injection nécessitent des moyens matériels spécifiques de fabrication (malaxeur, mélangeur, pompe à injection) et de suivi (manomètre, débitmètre par exemple).

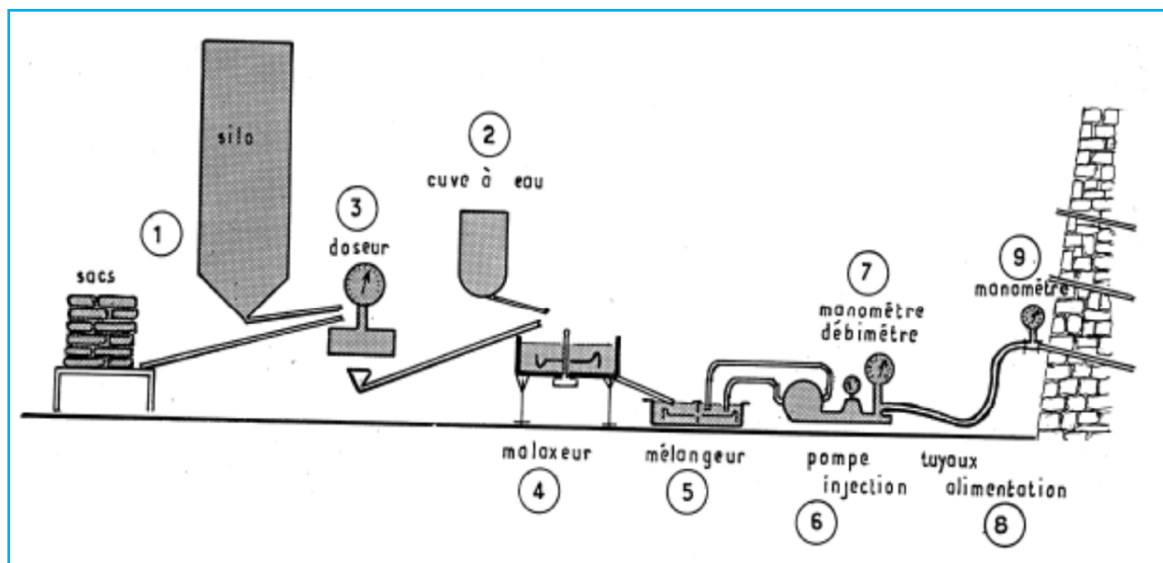


Figure 8: Matériel nécessaire à l'injection

Injection depuis les parements latéraux

Les injections sont réalisées par pianotage du bas vers le haut. Le calepinage des forages d'injection est fonction de la zone d'action du coulis d'injection et donc de la qualité de la maçonnerie (perméabilité). La répartition des forages est susceptible d'être adaptée en cours de chantier suivant l'état de la maçonnerie rencontrée.

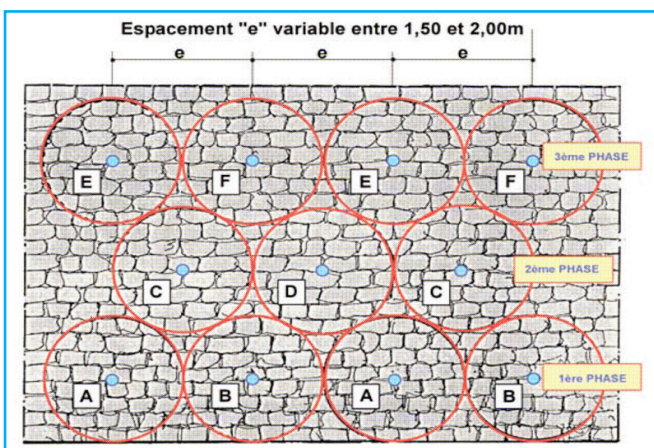


Figure 9: Principe de calepinage pour des injections en parement



Figure 10: Exemple d'injection depuis le parement d'une jetée

Injection depuis la surface supérieure :

Les injections sont réalisées par pianotage, de la périphérie vers le centre de la structure à traiter.



La composition du coulis est adaptée en fonction des paramètres d'injection (volume et pression d'injection). Ce point nécessite une grande maîtrise de la part de l'entreprise.

La procédure d'exécution de l'entreprise doit définir notamment des valeurs maximales de pression d'injection (pression limite) afin d'éviter tout endommagement de la maçonnerie. La pression limite est définie à partir des essais d'investigations réalisés (essais Lugeons) et de l'état général de l'ouvrage. La procédure définit par ailleurs la conduite à tenir dans différents cas de figures, par exemple :

- L'injection de volume important de coulis sans montée en pression peut être l'indication de fuite ou de présence de cavité de grande importance : vérification des fuites par plongeurs, ajustement de la composition du coulis (utilisation d'un coulis chargé à la place d'un coulis ternaire par exemple).
- A l'inverse une forte montée en pression alors que les volumes injectés sont faibles peut être l'indication d'un remplissage complet des vides ou d'une trop faible fluidité du coulis : arrêt de l'injection ou ajustement de la composition du coulis (utilisation d'un coulis ternaire à la place d'un coulis chargé par exemple).

Dans certain cas, il pourra être nécessaire, au niveau d'un même point d'injection de procéder dans un premier temps à une injection de coulis très fluide puis dans un second temps à l'injection d'un coulis moins fluide.

Certaines configurations (accès impossible par la surface supérieure par exemple) peuvent nécessiter la réalisation de forages d'injection inclinés.



Les travaux d'injection sont généralement des opérations longues (séquençage, phasage, attente de la prise du coulis, renouvellement d'injection, etc.). La qualité et l'efficacité des injections dépend en grande partie du respect de cette temporalité.



La mise en pression d'un fluide d'injection est une opération délicate susceptible de déstabiliser la structure. Il est impératif que ces opérations soient effectuées par une entreprise et du personnel spécialisés et expérimentés. Une pression d'injection trop élevée peut créer un effet de vérin pouvant conduire à minima à un endommagement localisé de la maçonnerie, au pire à une ruine partielle ou complète de l'ouvrage.

4

CONTROLES DES TRAVAUX

4

Généralités

L'ensemble des opérations de contrôles sont réalisés en présence du maître d'œuvre et/ou de son représentant qui assure la part des opérations liées aux contrôles extérieurs.

Le marché précise les dispositions particulières propres au chantier, qui viennent en complément des exigences de l'art. 6.3.2.4 de la norme NF P95-107 pour les essais et contrôles à réaliser lors des phases suivantes :

- convenances,
- contrôles d'exécution des travaux,
- réception des travaux.

Le Plan Qualité de l'entreprise (PAQ) établit précisément, pour chaque phase, ce qui relève des contrôles intérieurs (internes, externes) et extérieurs ; les essais et contrôles à réaliser ; ainsi que la liste des points critiques et d'arrêt.

Les points d'arrêt ne peuvent être levés que par le maître d'œuvre ou son représentant. Ils sont fixés dans le CCTP :

- Validation du PAQ, du PRE et des procédures d'exécution => Autorisation de procéder à l'épreuve de convenances.
- Validation de l'épreuve de convenance (vérification de l'adéquation des moyens mis en œuvre par l'entreprise pour exécuter l'ensemble de l'opération : qualification, produits, matériels, techniques, ...)
- Validation des zones à traiter et du calepinage => Autorisation de procéder aux forages.
- Réception des travaux

Épreuves de convenue

Le marché fixe le contenu des épreuves de convenue à réaliser afin de vérifier :

- le choix des produits et composition du coulis,
- la préparation du support,
- la mise en œuvre,
- la qualification du personnel.

Ces épreuves permettent de valider la procédure d'exécution. En général, elles relèvent du contrôle intérieur.

Lors de ces épreuves, sont vérifiés les points suivants :

- l'approvisionnement et le stockage des produits,
- le matériel ,
- la qualification du personnel,
- le respect des dosages et du malaxage du produit,
- l'obtention des caractéristiques attendues du coulis (densité, fluidité, stabilité, viscosité, résistance mécanique).

Cône de March
(fluidité)



Balance
(densité)



Éprouvette graduée
(exsudation, stabilité)



- les paramètres d'injection du coulis : réalisation de courbes pression / volume notamment. Les essais d'injections pratiqués lors de cette épreuve permettront de valider la formulation ou de la réajuster en fonction des résultats obtenus.

La validation des épreuves de convenue par le maître d'oeuvre constitue un point d'arrêt de l'exécution. Après validation, les zones traitées lors de l'épreuve de convenue sont conservées et servent de zones de références pour le suivi du chantier.

Contrôle d'exécution

Les contrôles d'exécution sont effectués en cours de chantier et relèvent généralement du contrôle intérieur à la charge de l'entreprise. Le maître d'oeuvre (dans le cadre du contrôle extérieur) s'assure que les contrôles sont effectués conformément au PAQ et aux procédures de l'entreprise.

Le contrôle intérieur (exercé par l'entreprise) comprend notamment les points suivants :

- contrôles de la fabrication du coulis (température, temps de malaxage, fluidité, densité, exsudation),
- suivi précis et continu des paramètres d'injection (volume, pression, débit, durée),
- vérification de l'absence de fuite aux abords de l'ouvrage (peut nécessiter la présence de plongeurs),
- suivi topométrique éventuel de la structure.

Le contrôle extérieur (exercé par le maître d'oeuvre) comprend notamment les points suivants :

- vérification de la bonne application de la procédure d'exécution de l'entreprise,
- vérification des contrôles effectués par l'entreprise,
- contrôles des conditions de stockage et du matériel
- suivi des fiches de non-conformités,
- réalisation éventuelle d'essais contradictoires (détermination des propriétés du coulis d'injection),
- levée des points d'arrêt.

Réception

La réception des travaux d'injection s'appuie sur la réalisation de carottages de contrôles. Ces carottages sont réalisés dans les mêmes conditions que ceux effectués lors du diagnostic. On s'assure que les injections ont permis d'améliorer l'état de la maçonnerie (approche comparative). Cette vérification s'appuie en général sur l'examen visuel des carottes, la réalisation d'imagerie de paroi et la réalisation d'essais Lugeon.

Dans certain cas et de manière complémentaire, des auscultations non destructives peuvent être réalisées (RADAR, tomographie par exemple).

Phasage	Points à contrôler	Moyens de contrôle
Préparation	Obturation du drainage et des fuites sur le parement (rejointoiement)	Essais à l'eau
Convenance Fabrication des coulis (mise au point)	Composition, densité, viscosité, décantation, résistance, injectabilité	Labo de chantier, balance Baroïde, viscosimètre, éprouvettes graduées
Fabrication des coulis (contrôle continu)	Composition, densité, viscosité, décantation, résistance	Labo de chantier, balance Baroïde, viscosimètre, éprouvettes graduées
Mise en oeuvre	Quantités injectées, pressions d'injection	Utilisation d'enregistreurs de paramètres placés sur la conduite
Mise en oeuvre	Résurgences, déformations éventuelles induites, fonctionnement des événements	Visuel Surveillance des parements et environnement
Réception	Contrôle efficacité des injections	Endoscope, carottage, examen radar, mesure perméabilité, tomographie
Réception	Propreté du chantier	Contrôle visuel

Source STRRES

Lexique

Contrôle extérieur : Il est exercé pour le maître d'ouvrage, le maître d'oeuvre, un organisme ou une personne étrangère à l'entreprise.

Contrôle intérieur : Il est de la responsabilité de l'entreprise. On distingue deux niveaux :

- le contrôle interne effectué par les exécutants eux-mêmes, quel que soit leur rang ou leur hiérarchie,
- le contrôle externe exercé par un organe appartenant ou n'appartenant pas à l'entreprise et n'ayant pas de responsabilité dans l'exécution.

Côtes marines pour :

PHMA : Plus Haute Mer Astronomique,

PMVE : Pleines Mers de Vives-Eaux,

PMME : Pleines Mers de Mortes-Eaux,

NM : Niveau Moyen

BMME : Basses Mers de Mortes-Eaux

BMVE : Basses Mers de Vives-Eaux

PBMA : Plus Basse Mer Astronomique

FTP : Fiches techniques produits

DCE : Dossier de Consultation des Entreprises

PAQ : Plan qualité de l'entreprise

Point d'arrêt

Un point d'arrêt marque la fin d'une ou de plusieurs phases de la mise en œuvre de la protection anticorrosion. Pour sa levée, c'est-à-dire pour continuer cette mise en œuvre, un point d'arrêt donne lieu :

- à la production de documents remis au maître d'œuvre et prouvant qu'un certain nombre de vérifications et de contrôles ont été effectués lors de la ou des phases en question,
- à un accord préalable et explicite du maître d'œuvre. Pour cet accord, le maître d'œuvre dispose d'un délai de réponse.

Point critique

Un point critique est une phase importante de la mise en œuvre de la protection anticorrosion qui est signalée au maître d'œuvre afin qu'il puisse intervenir. Il donne lieu :

- à la mise à disposition du maître d'œuvre, sur les lieux des travaux, de documents de suivi d'exécution de cette phase,
- à un délai de préavis à respecter par l'entreprise pour prévenir le maître d'œuvre et lui permettre d'intervenir (lui-même ou son contrôle extérieur).

PRE : Plan de Respect de l'Environnement

TUP : Durée pendant laquelle le produit est applicable conformément aux prescriptions du fabricant, dans les conditions du chantier



Contacts Cerema Ouest

Département Laboratoire de Saint-Brieuc

- Michel Menguy - Groupe Ouvrages d'Art et Maritimes - michel.menguy@cerema.fr
- Benoit Thauvin - Groupe Ouvrages d'Art et Maritimes - benoit.thauvin@cerema.fr



MAN - 9 rue René Viviani
BP 46223 - 44262 Nantes cedex 2
Tél. : +33 (0)2 40 12 83 01