I FABEM 6.1 - V2 I GUIDES STRRES I

> MAÇONNERIE

Réparation et renforcement des maçonneries

6.1
Version 2

Généralités et préparation des travaux

STRRES
NOTRE TALENT DÉFIE LE TEMPS

Validé par

IDRRIM

LES TRAVAUX PUBLICS FÉDÉRATION NATIONALE

UNE ÉDITION DU SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS
SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES (STRRES) / FÉVRIER 2016

Ce guide a été relu et validé par le Comité Opérationnel « Génie Civil » de l'IDRRIM ainsi composé :

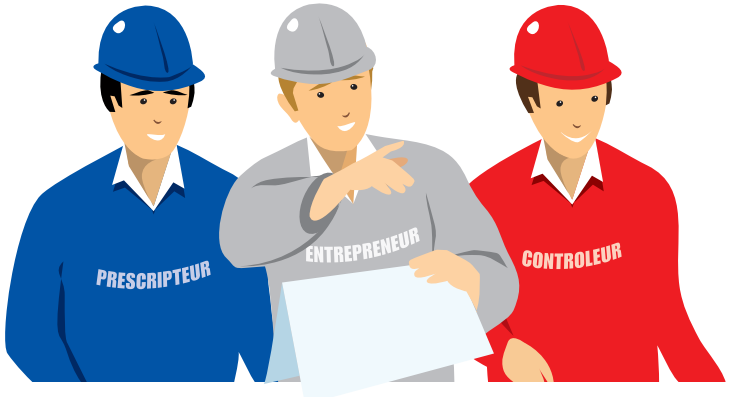
- Jean-Luc Dabert, Président du Comité Génie Civil, ASFA (APRR)
- Jacques Allemand, EGF-BTP (ACTESS)
- Alain-Henry Bellec, CINOV (Soderef)
- Guy Beurier, AITF
- Philippe Bisch, Syntec Ingénierie (EGIS)
- Christophe Boutin, ASFA
- Frédéric Cappelaere, IMGC (SITES)
- Christian Cremona, Cerema (DTec Infrastructures de Transport et Matériaux)
- Bertrand Collin, IMGC (SITES)
- Pierre Corfdir, MEDDE - DIR Est
- Michel Deffayet, CETU - AFTES
- Pascale Dumez, IMGC, (Concrete)
- Didier Germain, Cerema (DTer Centre-Est, Ouvrages d'Art)
- Bruno Godart, IFSTTAR
- Philippe Guignard, ADSTD (Département de la Gironde)
- Thierry Kretz, IFSTTAR
- Thierry Latger (SNCF Réseaux)
- Pascal Lemoine FNTP
- Laurent Llop, Cerema (DTec Infrastructures de Transport et Matériaux - CTOA)
- Véronique Mauvisseau, Syntec Ingénierie (Systra)
- Pierre Paillusseau, Cerema (DTer Sud-Ouest, Ouvrages d'Art)
- Patrick Porru, IDRRIM
- Pascal Raoul, ADSTD (Département du Rhône)
- Stéphane Rutard, FNTP
- Jean-Marc Tarrieu, Cerema (DTec Infrastructures de Transport et Matériaux)
- Marc Tassone, IDRRIM
- Jean-Noël Theillout, DGAC/STAC
- Christian Tridon, FNTP, STRRES (Artem)
- Patrick Vernisse (SNCF Réseaux)
- Philippe Vion, Syntec Ingénierie (Systra)

IDRRIM
Institut Des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité

L'IDRRIM (Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité) fédère l'ensemble des acteurs publics et privés agissant dans le domaine des infrastructures de mobilité et espaces urbains.
Créé en 2010 à l'initiative du Ministère de l'Écologie du Développement Durable et de l'Énergie, de l'Assemblée des Départements de France et des fédérations nationales de l'ingénierie privée et des Travaux Publics, l'Institut propose un cadre de réflexion et d'actions pour coproduire et partager un référentiel commun.

Lieu de convergence et d'échanges, il a pour objectif de répondre de manière homogène aux problématiques techniques et stratégiques et de faire évoluer les patrimoines d'infrastructures et espaces publics vers une conception et une gestion durables ainsi qu'une plus grande optimisation de leur utilisation. L'IDRRIM a également pour vocation d'assurer la promotion et le rayonnement du savoir-faire technique français en Europe et à l'International.

Rassemblant 49 membres représentatifs des secteurs publics et privés (services de l'Etat, collectivités locales, ingénierie publique et privée, entreprises, associations partenariales, organismes de formation et de recherche) et plus de 54 collectivités, entreprises et ingénieurs à titre individuel, l'Institut fédère l'ensemble des acteurs publics et privés des infrastructures de transport autour de ses 9 comités opérationnels thématiques.



Les trois intervenants,

SOMMAIRE

INTRODUCTION **8**

MODE D'EMPLOI DES GUIDES MACONNERIE **9**

1 DÉFINITIONS – GÉNÉRALITÉS **13**

1.1 LA SITUATION DES DIFFÉRENTS DOCUMENTS TECHNIQUES ET ADMINISTRATIFS DISPONIBLES EN 2009 ..... **14**

1.2 LES DÉFINITIONS **18**

1.2.1 Généralités **18**

1.2.2 Principales définitions du Guide technique LCPC-SETRA (1976) **18**

1.2.3 Principales définitions du Guide technique LCPC sur la technologie des maçonneries (1981) **19**

1.2.4 Principales définitions du Fascicule 64 du CCTG (1982) **20**

1.2.5 Principales définitions de la norme NF P 95-107 (2002) **21**

1.2.6 Principales définitions de la norme homologuée NF B 10-101 (2008) **22**

1.2.7 Principales définitions du Volume 5 du dictionnaire de l'entretien routier (2008) **26**

1.2.8 Morphologie des ponts et murs en maçonnerie **26**

2 DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE **31**

Sommaire

3 BREF HISTORIQUE - PRINCIPES GÉNÉRAUX **35**

3.1 BREF HISTORIQUE **37**

3.2 DOMAINES DU BÂTIMENT ET DU GÉNIE CIVIL **38**

3.3 ÉTUDES ET INVESTIGATIONS **40**

3.3.1 Généralités – Importance des études préliminaires **40**

3.3.2 Auscultation, diagnostic, pronostic **40**

3.3.3 Projet de réparation et/ou renforcement **41**

4 LES PRINCIPAUX DÉSORDRES ET LEURS ORIGINES **45**

4.1 MANIFESTATIONS DES DÉSORDRES STRUCTURELS **47**

4.1.1 Déformations massives **47**

4.1.2 Déformations localisées **48**

4.1.3 Fissures **48**

4.1.4 Fractures **49**

4.1.5 Désorganisation de la maçonnerie **50**

4.2 MANIFESTATIONS DES DÉSORDRES DES MATÉRIAUX **52**

4.3 ORIGINES DES DÉSORDRES **54**

4.3.1 Défauts de conception et de construction **55**

4.3.2 Actions de l'eau **55**

4.3.3 Altérations des pierres naturelles **64**

4.3.4 Altérations des briques **71**

4.3.5 Altération des mortiers **73**

4.3.6 Mise en contact de matériaux incompatibles **74**

4.3.7 Chape d'étanchéité absente ou inefficace **81**

4.3.8 Mauvaise qualité des matériaux de remplissage (remblais) **82**

4.3.9 Drainage inexistant ou non fonctionnel **83**

4.3.10 Modification des conditions d'utilisation de l'ouvrage. **84**

4.3.11 Altérations et désordres des fondations **86**

4.3.12 Action de la végétation sur ou au voisinage immédiat des ouvrages **113**

4.3.13 Réparations et/ou renforcements mal conduits **114**

4.3.14 Actions accidentelles **118**

5 PRÉPARATION ET RÉALISATION D'UNE OPÉRATION DE RÉPARATION ET/OU RENFORCEMENT **119**

5.1 GÉNÉRALITÉS **120**

5.2 INSTALLATIONS DE CHANTIER (pour mémoire) **123**

5.3 OUVRAGES PROVISOIRES (PONTS ET PASSERELLES) – AUTRES OUVRAGES PROVISOIRES - MOYENS D'ACCÈS – ÉTAIEMENTS PROVISOIRES **124**

5.4 CRITÈRES APPLICABLES AU CHOIX DES PRODUITS ET MATÉRIAUX **125**

5.5 CONDITIONNEMENT DES PRODUITS ET MATÉRIAUX **127**

5.5.1 Différents produits et matériaux **127**

5.5.2 Conditionnement des produits et matériaux prêts à l'emploi **127**

5.5.3 Conditionnement des produits et matériaux fabriqués sur le chantier **129**

5.6 TRANSPORT ET STOCKAGE DES PRODUITS ET MATÉRIAUX **130**

5.6.1 Généralités **130**

5.6.2 Cas des produits et matériaux avec fiches techniques et de sécurité **130**

5.6.3 Cas des autres produits et matériaux (pierres, granulats, armatures…) **131**

5.7 CONTRÔLES DE RÉCEPTION DES PRODUITS ET MATÉRIAUX (POUR MÉMOIRE) **132**

5.8 MATÉRIELS À UTILISER **133**

5.9 RÉALISATION DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET/OU DE RENFORCEMENT MODES OPÉRATOIRES **134**

5.9.1 Assurance de la qualité - Procédures et documents de suivi **134**

5.9.2 Travaux préparatoires **134**

5.9.3 Préparation des produits et matériaux **135**

5.9.4 Réalisation de l'opération **135**

5.9.5 Travaux de finition **136**

5.10 ESSAIS ET CONTRÔLES **137**

5.10.1 Généralités **137**

5.10.2 Épreuve d'étude **138**

5.10.3 Contrôles de réception des produits et matériaux **139**

5.10.4 Épreuve de convenance **140**

5.10.5 Contrôles d'exécution **141**

5.11 RÉCEPTION DES TRAVAUX **148**

Sommaire

6 OPERATIONS CONNEXES AUX TRAVAUX DE RÉPARATION ET/OU RENFORCEMENT **149**

6.1 CONCEPTION DES ÉTAIEMENTS NÉCESSAIRES AUX TRAVAUX **150**

6.2 CHOIX DES PRODUITS ET MATERIAUX : PIERRES, BRIQUES, MORTIERS ET COMPOSANTS **151**

6.2.1 Matériaux de base **151**

6.2.2 Autres produits et matériaux **177**

6.3 DÉVÉGÉTALISATION **178**

6.3.1 Domaine d'application **179**

6.3.2 Accès à l'ouvrage - Contexte réglementaire - Cas des travaux sur cordes **180**

6.3.3 Protection de l'environnement **180**

6.3.4 Différentes méthodes de dévégétalisation **181**

6.3.5 Préparation et exécution des travaux **183**

6.3.6 Contrôles de l'opération de dévégétalisation **183**

6.3.7 Réception des travaux (pour mémoire) **184**

6.4 LES MÉTHODES DE NETTOYAGE ET DE PRÉPARATION DES PAREMENTS ET PAROIS EN PIERRE NATURELLE ET BRIQUE **185**

6.4.1 Domaine d'application **185**

6.4.2 Études préalables **186**

6.4.3 Diverses familles de procédés de nettoyage et de préparation de surface **192**

6.4.4 Matériel à utiliser **195**

6.4.5 Exécution du nettoyage ou de la préparation de surface **195**

6.4.6 Contrôles d'exécution **197**

6.4.7 Réception des travaux (pour mémoire) **197**

6.5 NETTOYAGE FINAL **198**

7 HYGIÈNE ET SÉCURITÉ **199**

7.1 RAPPEL DES OBLIGATIONS **200**

7.2 CAS D'UN CHANTIER DE RÉPARATION ET/OU DE RENFORCEMENT D'UN OUVRAGE EN MAÇONNERIE **202**

8 GESTION DES DÉCHETS DU CHANTIER **205**

8.1 RAPPEL DES OBLIGATIONS **206**

8.2 CAS D'UN CHANTIER DE RÉPARATION ET/OU DE RENFORCEMENT D'UN OUVRAGE EN MAÇONNERIE **209**

9 FICHE SYNTHÉTIQUE DU PAQ **211**

TABLE DES ILLUSTRATIONS **216**

Comme **l'introduction commune** à l'ensemble des **GUIDES du STRRES** le rappelle, l'expérience montre que les opérations de réparation et de renforcement de structures en maçonnerie ne sont pas toujours couronnées de succès. **Dans un certain nombre de cas, soit les réparations ne tiennent pas, soit de nouveaux désordres apparaissent à proximité des réparations, soit il se produit lors des travaux des dérapages dans les quantités et les coûts et parfois même l'effondrement partiel ou total de la structure.** Toutes ces déconvenues sont, le plus souvent, dues à la **faiblesse du diagnostic** lors des études préliminaires et aussi à la **non mise en sécurité de l'ouvrage** avant travaux.

En effet, certains **maîtres d'ouvrage** croient qu'il suffit de traiter les **désordres apparents** (par exemple, la reprise des joints dégradés, le remplacement des pierres endommagée, le rebouchage des fissures…) pour résoudre les problèmes et, qu'en conséquence, les **études préliminaires** portent uniquement sur le **relevé des désordres visibles** et sur le **métré** qui s'y rapporte.

Il a donc été décidé de rappeler dans le **chapitre 3.3 les étapes incontournables du processus à suivre pour aboutir à une action de réparation et/ou de renforcement** qui ont été développées dans le **guide FABEM 1.**

AVERTISSEMENT

Les quatre guides «Maçonnerie» ont été rédigés dans l'optique **d'une opération de réparation ou de renforcement de maçonneries** lourde et complexe. Pour des chantiers de moindre importance, ils peuvent être adaptés, mais sans oublier les conséquences qui résulteraient d'une mauvaise exécution. Il est indispensable que soient respectées les exigences des normes et autres documents visés en référence et dans les **annexes**.

1. PREMIER CAS

La méthode à mettre en œuvre pour la réparation et/ou le renforcement a été fixée à la suite d'une étude qui a porté sur la recherche des causes des désordres et la mise au point d'un projet de réparation ou renforcement. Il reste à choisir les matériaux et produits, le matériel de mise en œuvre, à réaliser les travaux et à contrôler l'ensemble de l'opération.

Lorsque la méthode est entièrement détaillée dans un des guides «Maçonnerie», il faut suivre ses indications à toutes les étapes de l'opération, sachant que, si nécessaire, il renvoie aux autres **guides du STRRES**, voire à d'autres documents.

2. DEUXIÈME CAS :

La structure présente des désordres dont les causes restent floues et, bien entendu, la technique à mettre en œuvre n'est pas fixée. Dans un tel cas, il faut commencer par lancer une opération **de diagnostic pronostic puis un projet de réparation** en s'appuyant sur les parties du guide listées ci-devant, qui décrivent :

- la conception et les principes de fonctionnement des ouvrages voûtés et des ouvrages de soutènement ;
- les différentes méthodes de calcul des ouvrages voûtés et des ouvrages de soutènement ;
- les différents désordres et leurs causes ;
- la méthodologie de réalisation d'une expertise pour aboutir à un diagnostic et un pronostic ;
- la consistance d'un projet de réparation ou de renforcement ;
- les différentes techniques de réparation ou de renforcement à mettre en œuvre en fonction des désordres constatés et de leurs causes…

> Liste des différents travaux de réparation et/ou renforcement ainsi que des opérations connexes préliminaires ou finales traités dans guides «Maçonnerie» :

• dans le guide «Généralités et préparation des travaux» (FABEM 6.1) :

- opérations connexes préliminaires et finales :
  - dévégétalisation,
  - nettoyage et préparation des parements et parois (pierres et briques),
  - nettoyage final des parements, parois, lieux… après travaux ;

• dans le guide «Réparation non-structurale» (FABEM 6.2) :

- travaux sur les parements :
  - jointoiement et rejointoiement,
  - joints de dilatation ou de fractionnement,
  - reconstitution des parements en pierres naturelles et en briques,

- enduits de protection des parements et parois,
- revêtements de protection des parements et parois,
- remplacement ;

■ travaux sur les fondations et structures :
- remplacement du remblai des voûtes et murs – Réfection des couches d'assise et de surface des chaussées ;

■ travaux de protection contre les eaux :
- recueil et drainage des eaux de surface,
- drainage des eaux infiltrées,
- réalisation des supports de chape et des chapes d'étanchéité,
- traitement des remontées d'humidité ;

• dans le guide «Réparation et renforcement structuraux» [FABEM 6.3] :

■ travaux sur les fondations et structures :
- reconstruction partielle ou totale de parties d'ouvrages après rescindement des parties endommagées,
- réparation et/ou renforcement des fondations,
- réparation et/ou renforcement structural des maçonneries par injection,
- réparation et/ou renforcement structural par broches ou épingles, boulons d'ancrage et tirants d'enserrement,
- réparation structurale et/ou renforcement structural par :
  . contre-voûtes,
  . contre-murs,
  . ceinturages,
  . réglages de la poussée ;

■ travaux d'élargissement et d'augmentation du débouché ;

> Chaque méthode de réparation et/ou de renforcement est explicitée en respectant, dans la mesure du possible, la présentation type suivante :

1. Généralités – Domaine d'application ;

2. Documents de référence ;

3. Études préalables - Désordres et causes (rappels succincts avec renvois à la partie consacrée à l'étiologie dans le présent guide [symptômes et causes]) – Choix de la technique de réparation et/ou renforcement ;

4. Choix des produits et matériaux ;

5. Matériels à utiliser ;

6. Préparation et exécution des travaux ;

7. Essais et contrôles ;

8. Réception des travaux.

> La réparation ou le renforcement d'un ouvrage en maçonnerie impose, dans la plupart des cas, de faire appel à plusieurs méthodes à la fois. Lors d'une réparation, il peut être nécessaire de procéder à diverses opérations interpénétrées comme celles de la liste qui suit :

- dévégétaliser l'ouvrage ;
- nettoyer les parements ;
- rejointoyer la maçonnerie ;
- injecter la maçonnerie pour reconstituer le mortier de hourdage ;
- enserrer les bandeaux ;
- réaliser une nouvelle chape d'étanchéité ;
- réaménager les équipements…

Pour effectuer ces différentes opérations, il est fait appel aux **méthodes décrites dans les guides.** L'attention est attirée sur l'importance de réaliser toutes les opérations nécessaires, de coordonner l'exécution des différentes méthodes, qui doivent être effectuées dans un certain ordre, dans certaines conditions climatiques, avec ou sans possibilité de décalage dans le temps…, afin de ne pas provoquer **l'apparition de nouveaux désordres ou de rendre les réparations ou le renforcement peu durables.**

> Exemples d'erreurs à ne pas commettre :

- réaliser une contre-voûte et refaire les joints sans s'assurer de l'efficacité de l'étanchéité et du drainage car, dans ce cas, le pont devient une véritable «**piscine**»;
- remettre en état toute la superstructure d'un pont sans s'être assuré de l'état des fondations ;
- réaliser un enduit sur les parements d'un mur en maçonnerie alors que celle-ci est affectée par des remontées capillaires…

1 Définitions - Généralités

1.1 La situation des différents documents techniques et administratifs disponibles en 2011

1.2 Les définitions

UNE ÉDITION DU SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES (STRRES) / FÉVRIER 2016

1.1 La situation des différents documents techniques et administratifs disponibles en 2011

Sont cités et explicités dans le présent paragraphe la plupart des différents textes qui traitent pour les ouvrages en maçonnerie : des matériaux (caractéristiques, spécifications et essais), des travaux de construction, des désordres, des travaux de réparation et/ou renforcement ainsi que du vocabulaire (principales définitions et appellations à connaître).

LA NORMALISATION FRANÇAISE

> En matière de travaux de réparation et renforcement des ouvrages en maçonnerie, il est possible de faire référence aux quatre normes suivantes et à un DTU :

- la norme homologuée **NF P 95-107** : ouvrages d'art - Réparation et renforcement des ouvrages en maçonnerie – Spécifications relatives aux techniques et matériaux utilisés (avril 2002) ;
- la norme homologuée **NF P 95-106** : ouvrages d'art - Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Spécifications relatives aux fondations des ouvrages (août 1993) ;
- la norme homologuée **NF P 95-104** : ouvrages d'art - Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Spécifications relatives à la technique de la précontrainte additionnelle (décembre 1992) ;
- la norme homologuée **NF P 95-102** : ouvrages d'art - Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Béton projeté - Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés (avril 2002) ;
- le **DTU 20-1** : travaux de bâtiment – Ouvrages en maçonnerie de petits éléments – Parois et murs.

REMARQUE : *toutes les techniques de réparation et/ou renforcement des ouvrages en maçonnerie développées dans les guides maçonnerie ne sont pas abordées dans ces normes et, tout spécialement, dans la norme* ***NF P 95-107.*** *De plus, les* ***références normatives*** *des normes les plus anciennes sont totalement obsolètes.*

A ces normes s'ajoutent les **normes relatives aux spécifications et aux essais des matériaux** (pierres, briques, liants, mortiers) le plus souvent transposées de la normalisation européenne avec des **compléments indispensables.** Toutes ces normes sont listées en annexe 1 (guide FABEM 6.4) et sont visées, si besoin est, dans le corps des guides «Maçonnerie».

LA NORMALISATION EUROPÉENNE

Depuis le début des années 2000, le rythme de parution des normes européennes s'est accru et leur substitution aux normes nationales se termine.

Ces normes européennes, très nombreuses, traitent pour les **pierres naturelles** et les **briques**, de la terminologie, de la dénomination, des spécifications, des différents essais et même des règles de calcul, y compris de comportement au feu, relatives aux ouvrages en maçonnerie armée et non armée constitués de briques et blocs de béton (Eurocode 6).

> Il est à noter que :

- toutes les normes européennes sur les pierres naturelles et les briques sont parues et tous les textes de référence français ont été mis à jour ;
- les normes européennes introduisent pour certaines fonctions des **exigences de performances comportant plusieurs niveaux** mais, malheureusement, sans donner les critères de choix des niveaux. Le choix des niveaux est explicité dans les guides «Maçonnerie» s'il n'y a aucune indication dans les normes françaises associées à ces normes européennes.

NOTA : ***l'annexe 1 (FABEM 6.4),*** *qui traite de tous les documents de référence cités dans les guides «Maçonnerie», liste les normes européennes actuellement en vigueur.*

LES FASCICULES DU CCTG

> Deux fascicules du CCTG de la fin du XX^e siècle traitent de la réalisation des ouvrages en maçonnerie à savoir :

- **le fascicule 63 :** confection et mise en œuvre des bétons non armés – Confection des mortiers (circulaire n°70-112 du 15 octobre 1970) ;
- **le fascicule 64 :** travaux de maçonnerie d'ouvrages de génie civil (circulaire n°82-54 du 17 juin 1982).

Le fascicule 63 se réfère :

- pour les travaux du domaine du bâtiment, au **DTU 20.1** : Travaux de bâtiment : ouvrage en maçonnerie de petits éléments – Parois et murs et au DTU 26.1 : Travaux de bâtiment : enduits aux mortiers de ciments, de chaux et de mélange plâtre et chaux aérienne ;
- **au fascicule 65** pour la composition et la mise en œuvre des bétons et mortiers moyennant quelques exceptions (**attention,** il s'agit d'un des anciens fascicules 65 et non du dernier paru, une mise à jour des renvois aux articles du fascicule actuel serait indispensable dans le cadre d'un **marché**) ;
- **au fascicule 68** pour l'exécution des travaux de fondation des ouvrages de génie civil (bétons de fondation et mortiers d'injection).

Le fascicule 64, qui s'applique aux travaux neufs mais aussi aux travaux d'entretien et de réfection de maçonneries, se réfère :

- pour les travaux du domaine du bâtiment au **DTU 20.1** : Travaux de bâtiment : ouvrage en maçonnerie de petits éléments – Parois et murs, au **DTU 26.1** : Travaux de bâtiment : enduits aux mortiers de ciments, de chaux et de mélange plâtre et chaux aérienne et au **DTU 55.2** : Travaux de bâtiment : revêtements muraux attachés en pierre mince – Partie 1 : cahier des clauses communes – Partie 2 : cahier des clauses spéciales ;
- **au fascicule 63** pour le béton non armé qui peut être associé à la maçonnerie qui sert de coffrage et de parement ou seulement de parement (revêtements muraux attachés en pierre mince).

> Ce fascicule très technique, mais dont les références normatives sont malheureusement à revoir, traite :

- du choix des matériaux (moellons divers, pierres de taille, dalles en pierres naturelles, briques, matériaux d'enrochement, gabions…) ;
- de leur mise en œuvre (maçonnerie hourdée de moellons bruts et taillés, maçonnerie de pierres de taille, maçonnerie hourdée pour voûtes, parements d'ouvrages en maçonnerie, parements en maçonnerie solidarisés à des ouvrages en béton, maçonnerie de pierres sèches, enrochements, gabions, enduits…).

NOTE : *les fascicules du CCTG sont téléchargeables gratuitement sur le site www.construction.equipement.gouv.fr.*

LES GUIDES TECHNIQUES LCPC[1] ET SETRA

> Plusieurs guides et documents sur la conception, les défauts apparents et désordres, l'entretien et la réparation des ouvrages en maçonneries (les ponts et les murs de soutènement) sont disponibles au LCPC et au SETRA :

- **guide technique :** instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSOA) du 19 octobre 1979 – 2ème partie : ponts et viaducs en maçonnerie ;
- **guide technique LCPC-SETRA :** défauts apparents des ouvrages en maçonnerie (1982) ;
- **guide technique SETRA :** ponts-routes en maçonnerie – Protection contre les eaux – Étanchéité, assainissement, drainage… (mai 1992) ;
- **guide Image de la qualité des ouvrages d'art (IQOA) :** murs de soutènement – Murs poids en maçonnerie en pierres sèches ou en maçonnerie jointoyée (1er décembre 2000).

[1] *Début 2011, le LCPC a été fusionné avec l'INRETS (institut national de recherche sur les transports et leur sécurité) pour former l'IFSTTAR (institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux).*

LES GUIDES TECHNIQUES du CENTRE D'ÉTUDES TECHNIQUES MARITIMES ET FLUVIALES (CETMEF)

> Plusieurs guides et documents sur la conception, les défauts apparents et désordres, l'entretien et la réparation des ouvrages en maçonneries des voies d'eau et maritimes sont disponibles au CETMEF :

- **étude LCPC :** confortement par injection des fondations d'ouvrages d'art (octobre 1985) ;
- **guide :** surveillance, entretien et réparation des ouvrages de navigation intérieure en maçonnerie (septembre 1986) ;
- **synthèse :** constitution des ouvrages portuaires anciens en maçonnerie (janvier 1993) ;
- **guide :** surveillance, auscultation et entretien des ouvrages maritimes – Fascicule 1 : ouvrages en maçonnerie (août 1994) ;
- **guide :** surveillance, entretien et réparation des ponts-canaux (novembre 1995) ;
- **guide :** surveillance, auscultation et entretien des ouvrages maritimes – Fascicule 4 : digues à talus et digues mixtes (février 2002) ;
- **synthèse :** conditions de glissement sous les ouvrages poids portuaires (juin 2002) ;
- **fascicules 1 et 2 :** la surveillance, l'entretien et la réparation des tunnels-canaux (juillet 2002) ;
- **synthèse :** barrage de Montaubry : étanchement de la digue (maçonnerie) par injection (janvier 2006) ;
- **logiciel :** feuille de calcul pour les ouvrages poids – Stabilité des murs de quai (juillet 2007) ;
- **synthèse :** pathologie des ouvrages portuaires – Méthodes d'investigation (septembre 2008) ;
- **guide enrochements :** l'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques (mars 2009).

NOTA : *la plupart de ces documents sont téléchargeables gratuitement sur le site du CETMEF.*

1.2.1 GÉNÉRALITÉS

Les définitions de la plupart des termes utilisés dans les guides «Maçonnerie» se trouvent regroupées dans les normes, fascicules du CCTG et documents listés ci-après. Les définitions les plus importantes figurent dans les paragraphes qui suivent.

ATTENTION : *pour un même terme, les définitions que l'on peut trouver dans les différents documents visés ci-après sont plus ou moins détaillées mais rarement identiques.*

- **guide technique LCPC-SETRA (1976) :** Nomenclature des parties d'ouvrages d'art en béton armé et précontraint, et en maçonnerie ;
- **guide technique LCPC sur la technologie des maçonneries** (Alain Lootvoet - Septembre 1981) ;
- **le fascicule 64 :** travaux de maçonnerie d'ouvrages de génie civil (circulaire n°82-54 du 17 juin 1982) ;
- **la norme homologuée NF P 95-107 :** ouvrages d'art - Réparation et renforcement des ouvrages en maçonnerie – Spécifications relatives aux techniques et matériaux utilisés (avril 2002) ;
- **la norme homologuée NF B 10-101 :** pierres naturelles – Vocabulaire (janvier 2008) ;
- **le dictionnaire de l'entretien routier :** volume 5 ; ouvrages d'art (document produit par **l'Office National de la Route (ONR)** en 2008 dont une partie traite des ponts en maçonnerie).

Nota : ***la 3ème partie du présent guide*** *et* ***l'annexe 2 (FABEM 6.4) sur la conception et les principes de fonctionnement des ouvrages en maçonnerie*** *(ponts et murs) complètent les définitions en donnant, avec croquis à l'appui, les appellations des différentes parties d'un pont en maçonnerie…*

1.2.2 PRINCIPALES DÉFINITIONS DU GUIDE TECHNIQUE LCPC-SETRA (1976)

- **douelle :** surface inférieure d'une voûte appelée aussi intrados ;

NOTA : *en architecture les* ***douelles intérieure et extérieure*** *correspondent aux deux surfaces arrondies d'un voussoir (pierre taillée). L'ensemble des douelles intérieures forment l'intrados et l'ensemble des douelles extérieures l'extrados.*

Par extension, la douelle désigne la surface de la voûte entre les bandeaux côté intérieur comme côté extérieur.

- **extrados :** surface supérieure d'une voûte ;
- **intrados :** surface inférieure d'une voûte ;
- **flèche :** distance entre la clé d'une voûte et la ligne joignant les naissances ;
- **fruit :** inclinaison du parement d'un mur par rapport à la verticale. Le fruit est négatif si l'inclinaison est dirigée vers l'extérieur ;
- **rampant :** face supérieure d'un mur en aile ;
- **redan :** relief en forme d'escalier notamment à la partie arrière de certains murs ;
- **tympan :** mur vertical formant la façade d'un pont en maçonnerie situé entre le bandeau et le couronnement.

NOTA : ***le tympan*** *prend le nom de* ***mur de tête*** *lorsque le pont ne comporte qu'une seule voûte.*

1.2.3 PRINCIPALES DÉFINITIONS DU GUIDE TECHNIQUE LCPC SUR LA TECHNOLOGIE DES MAÇONNERIES (1981)

- **lits** ou **assises :** désigne les deux faces horizontales d'une pierre normale aux efforts de compression ;
- **joints :** désigne les deux faces verticales d'une pierre en contact avec les pierres adjacentes ;
- **têtes** ou **parements :** désigne la ou les deux faces vues d'une pierre ;
- **boutisse :** pierre taillée dont la plus grande dimension est disposée dans le sens de l'épaisseur du mur, de la paroi… si elle présente deux parements, elle devient un parpaigne ou parpaing ;
- **carreau ou panneresse :** pierre taillée dont la plus grande dimension est disposée en parement ;
- **évidement :** partie enlevée entre deux faces adjacentes ;
- **refouillement :** partie enlevée entre trois faces et plus.

NOTE : ***le lecteur est invité à consulter le guide de 1981 qui présente également :***

- les différentes tailles anciennes et les tailles normalisées sur plusieurs tableaux ainsi que les outils utilisés à cet effet ;

- les dimensions et les caractéristiques des pierres naturelles et des briques ;
- les dosages et les caractéristiques des mortiers ;
- la mise en œuvre des maçonneries avec la description des appareils, les différents types de joints en mortier… ;
- les méthodes de construction des ponts et leurs détails constructifs (appareillages des voûtes, des murs et des appuis…).

1.2.4 PRINCIPALES DÉFINITIONS DU FASCICULE 64 DU CCTG (1982)

- **moellons :** le fascicule distingue :
  - les moellons bruts ordinaires,
  - les moellons bruts grossièrement et naturellement équarris,
  - les moellons bruts lités,
  - les moellons taillés sont dits de taille : éclatée, pointée ou smillée (le parement des moellons smillés peut être bosselé) ;
- **le lancis :** est une opération qui consiste à mettre en place une pierre de longueur sensiblement plus grande que les autres pierres de la maçonnerie. Elle est appelée **parpaing (parpaigne)** ou **boutisse** selon qu'elle traverse ou non l'épaisseur totale de l'élément (mur…) ;
- **jointoiement :** opération qui consiste à compléter, avec le mortier de la pose, le garnissage des joints et à les lisser à la truelle. Ces travaux sont effectués de bas en haut ;
- **jointoiement en reprise :** opération qui consiste à dégarnir le joint en montant et lorsque l'ouvrage est terminé, à le garnir d'un mortier à consistance plastique fortement dosé. Ces travaux sont exécutés de haut en bas. Le jointoiement sert à obtenir une étanchéité des joints ;
- **le rejointoiement :** est une opération qui consiste à dégarnir les joints d'une maçonnerie ancienne et à les regarnir avec un mortier plus richement dosé que le mortier de pose. Le mortier fin et peu ferme est serré fortement contre la maçonnerie. Ensuite, les bavures sont enlevées et le mortier est laissé de façon à ce qu'il perde son eau et prenne une certaine consistance. Ensuite, il est refoulé et lissé plusieurs fois avec un fer jusqu'à ce que le retrait occasionné par la dessiccation ne donne plus lieu à aucune gerçure ;
- **opérations normales de finition de la maçonnerie :**
  - nettoiement : opération qui consiste à enlever les bavures du mortier ;
  - ragrément : opération qui consiste à tailler sur place les saillies et les irrégularités résultant de l'imperfection de la préparation et de la pose ;

NOTE : *le fascicule 64 impose que les moellons posés en «opus incertum» soient taillés.*

1.2.5 PRINCIPALES DÉFINITIONS DE LA NORME NF P 95-107 (2002)

- **appareil :** assemblage de pierres de taille ou de moellons qui sont employés dans la façade d'un édifice mais également dans un bandeau, une chaîne d'angle, une douelle ;
- **calepin :** dessin représentant le travail à exécuter en pierres de taille et sur lequel les dimensions de chaque pierre sont indiquées ;
- **calepin d'appareil :** dessin qui reproduit, à une échelle déterminée, la façade, la partie d'édifice à construire ;
- **calepin de pose :** double du calepin d'appareil sur lequel sont reproduites toutes les marques permettant la pose des pierres taillées ;
- **harpage :** disposition en alternance des éléments de maçonnerie constituant un mur, destinée à permettre une continuité entre une partie nouvelle et une partie conservée ;
- **hourdage :** maçonnage grossier de moellons assemblés au moyen de mortier ;
- **jointoiement :** remplissage des joints de maçonnerie dans leur partie apparente ;
- **moellon :** élément de pierre brute de petite dimension, souvent recouvert de plâtre ou de mortier, qui s'emploie dans les massifs de construction et pour les maçonneries appareillées de type «opus incertum» ;
- **moellon assisé :** pierre de petite dimension (volume < à 0,15 m3) dont la tête est équarrie et travaillée plus ou moins finement pour dessiner un parement d'assises régulières ;
- **pierre de taille :** élément de pierre destiné à faire partie d'une construction, appareillé et taillé conformément au calepin d'appareil. La pierre de taille, même de petite dimension, se différencie du moellon en ce qu'elle a une place précise à occuper dans l'ouvrage dont elle fait partie ;
- **rejointoiement :** réfection du jointoiement ;
- **rescindement :** démolition en épaisseur partielle suivant une géométrie à définir.

REMARQUE : *certaines définitions du* ***fascicule 64 du CCTG*** *sur le jointoiement et rejointoiement sont bien plus précises que celles de la présente norme* ***NF P 95-107.***

1.2.6 PRINCIPALES DÉFINITIONS DE LA NORME HOMOLOGUÉE NF B 10-101 (2008)

- **«à passe» :** scié parallèlement aux lits de carrière ;
- **arête :** ligne d'intersection de deux faces d'un morceau taillé ;
- **banc :** couche naturelle de pierre dans la masse d'une carrière, limitée par deux lits consécutifs plus ou moins apparents ;
- **bloc équarri :** bloc de pierre façonné grossièrement en forme de parallélépipède rectangle;
- **bousin :** couche de quelques centimètres d'épaisseur, pouvant exister à la partie supérieure ou inférieure d'un banc, constituée de pierre non consolidée ou de matière terreuse et qui doit être éliminée ;
- **chant :** côté le plus petit de la section d'un élément taillé ou équarri ;
- **contre-lit :** position d'un élément dans une construction placé de telle sorte que ses lits de carrière soient verticaux ;
- **contre marche :** dalle ou face verticale d'une marche d'escalier ;
- **«à contre-passe» ou en délit :** scié perpendiculairement aux lits de carrière ;
- **dalle :** élément taillé limité par deux surfaces de sciage ou de clivage parallèles entre elles; généralement destiné à un revêtement de sol ;
- **délit :** en carrière, joint naturel qui sépare deux dépôts sédimentaires consécutifs ;
- **eau de carrière :** eau qui imprègne les bancs de pierre calcaire et présente dans les blocs récemment extraits. Cette eau disparaît dans le temps par évaporation ;
- **épaisseur nominale :** épaisseur théorique d'un élément sans tenir compte des tolérances ;
- **fil :** fissure à peine perceptible présente dans une masse ou un bloc et de forme et de direction quelconque ;
- **gras de taille :** pour un élément de taille massive : surépaisseur de quelques millimètres d'un élément taillé ou dressé qui est reprise à la pose pour obtenir la finition souhaitée ;
- **hauteur nominale :** hauteur théorique d'un élément sans tenir compte des tolérances ;
- **largeur nominale :** largeur théorique d'un élément sans tenir compte des tolérances ;
- **lit d'attente :** face supérieure d'un élément de l'assise d'un mur, destinée à recevoir l'élément de l'assise supérieure ;
- **lit de carrière :** dans la masse, surface de séparation naturelle, parallèle à la direction des lits de sédimentation ;

- **lit de pose :** face inférieure d'un élément de l'assise d'un mur, destinée à être posée sur l'élément de l'assise inférieure ;
- **longueur nominale :** longueur théorique d'un élément sans tenir compte des tolérances ;
- **masticage :** remplissage d'un trou ou d'une fente de la pierre avec une préparation adaptée généralement à base de résine et de poudre de pierre ;
- **moellon :** le moellon est un élément destiné à être mis en œuvre manuellement sans l'aide de moyens mécaniques, d'une masse au plus égale à 35 kg ;
- **moellon brut :** moellon de forme quelconque ;
- **moellon équarri :** les quatre arêtes de parement sont sensiblement d'équerre. Les faces sont sommairement dressées. Le parement du moellon peut être :
  - éclaté,
  - pointé,
  - smillé,
  - scié ;
- **moie :** dans un banc, couche mince de pierre tendre ou très tendre, généralement parallèle aux lits de carrières et non nettement délimitée du reste de la pierre ;
- **parement** ou **face de parement :** sur un élément taillé, face destinée à être vue ;
- **pierre prétaillée ou pierre dimensionnée :** élément débité par sciage de blocs ou directement dans la masse de la carrière sous la forme d'un parallélépipède rectangle et destiné à être posé brut de sciage ;
- **plan de joint :** face à l'extrémité d'un morceau taillé et perpendiculaire à la face de parement. Cette face n'est pas apparente dans l'ouvrage fini ;
- **queue d'un élément :** profondeur d'un élément mesurée à partir du parement d'un mur ;
- **semelle :** dalle ou face formant le dessus d'une marche d'escalier ;
- **sur lits :** position d'un morceau placé de telle sorte que le plan moyen correspondant à ses lits de carrière soit en général horizontal ;
- **taillerie :** atelier où se fait la taille de pierre ;
- **finitions de parement :** les définitions suivantes ne portent que sur l'aspect de quelques finitions de parements. La nature et les dimensions des éléments sont indicatives et peuvent différer légèrement entre deux surfaces traitées ;
- **finition Aspect[2] :**
  - adoucie : surface unie, très finement rayée, rayures non visibles à l'œil nu,
  - bossagée : gros éclats formant une saillie bombée. Gros éclats de formes et de saillies diverses semés irrégulièrement de quelques traces de percussion allongées. Profondeur des traces quelconque, espacement des points de 5 cm à 15 cm. L'aspect final est grossièrement bombé,

[2] *Des photos illustrant la finition des parements en pierre naturelle figurent dans le présent guide.*

- bouchardée : points de meurtrissures :

  - à 16 dents,
  - à 25 dents,
  - à 64 dents,
  - à 100 dents,

  Nombreux points ronds de meurtrissures disposés en quadrillage empiétant l'un sur l'autre. Ces points ont une largeur de 1 mm à 3 mm. Profondeur entre creux et bosses de 1 mm à 3 mm. L'espacement entre les points est variable :

  - à 16 dents de 3 mm à 12 mm,
  - à 25 dents de 2 mm à 9 mm,
  - à 64 dents de 2 mm à 5,5 mm,
  - à 100 dents de 1 mm à 4 mm.

  Les points sont sommairement alignés en des directions approximativement parallèles aux arêtes ou légèrement en courbe,

- brochée ou layée : longues traces creuses parallèles formées de longs sillons parallèles séparés par des bandes en relief de cassures d'éclatement très grossières. Ces sillons sont de largeur variant de 5 mm à 10 mm. Leur longueur est indéfinie. La profondeur entre creux et bosses varie de 15 mm à 20 mm et leur espacement entre 4 cm et 8 cm. Chaque sillon est constitué de traces profondes pouvant être discontinues et dont le dessin général est droit ou légèrement courbe. Ces sillons sont grossièrement parallèles et vont d'un bord à l'autre de la face dans une direction sensiblement à 45° des arêtes,

- ciselée : bande plus ou moins rugueuse, taillée au ciseau éventuellement pour former un bord de face. Les fonds des creux d'une ciselure sont sensiblement à la cote spécifiée pour la face dont elle fait partie,

■ **toutes les tailles précédentes peuvent être exécutées avec ciselure en complément :**

- éclatée : gros éclats en bosses et creux de formes diverses,

- égrisée ou egresée : surface unie, finement rayée. Les fines rayures sont de direction quelconque et d'une profondeur de 0,1 mm à 0,2 mm,

- flammée : état de surface résultant du passage d'une flamme provoquant un choc thermique de la face sciée, afin de rendre la face antidérapante,

- grenaillée : état de surface résultant d'une projection de billes d'acier inox sur la face sciée, afin de rendre la face antidérapante,

- pointée :

  - par traits,
  - par points (dit aussi cloué),

Gros traits ou points de percussion isolés. Les gros creux de percussion sont semés irrégulièrement parmi des cassures d'éclatement en relief et grossières. Ces creux de forme un peu allongée (par traits) ou ronde (par points) ont une largeur de 3 mm à 8 mm, une longueur de 3 mm à 30 mm, une profondeur entre creux et bosses de 2 mm à 20 mm et un espacement de 10 mm à 50 mm. Lorsque les creux sont allongés, ils peuvent être de même direction ou de direction diverses.

- polie : surface brillante unie, sans rayures apparentes, formant miroir,

- ravalée :
  - à dents,
  - sans dents,

Surface unie, un peu rayée. La surface unie est couverte de petits creux et de rayures de direction quelconque et d'une profondeur de 0,5 mm à 1 mm. Si le rabot est à dents, la surface présente, de plus, des raies parallèles de longueur et de directions quelconques espacées de 3 mm à 4 mm et d'une profondeur d'environ 1 mm,

- sciée :
  - à lames,
  - au fil,
  - à dents,
  - au disque,

Surface relativement plane, éventuellement striée. La surface relativement plane est couverte de très petits creux et peut comporter de petites ondulations ou décrochements. La profondeur des creux varie de 0,5 mm à 1,5 m. Les ondulations ou décrochements ne s'écartent pas du plan général du parement de plus de :
  - sciée à lames, 2 mm,
  - sciée au fil, 5 mm,
  - sciée à dents, 5 mm,
  - sciée au disque, 2 mm,

La surface peut avoir un gauche allant jusqu'à 8 mm en plus ou en moins suivant ses dimensions plus ou moins grandes,

- smillée : courtes traces parallèles et obliques. Les traces courtes, nombreuses et parallèles sont séparées par de petites cassures d'éclatement. Ces traces ont une largeur de 1 mm à 5 mm, une longueur de 5 mm à 25 mm, une profondeur entre creux et bosses de 2 mm à 7 mm et un espacement de 5 mm à 20 mm,

- le dessin général de ces traces discontinues est droit ou légèrement courbe et va d'un bord à l'autre de la face dans une direction sensiblement à 45° des arêtes.

- talotée : gros points de meurtrissures en groupes et en nombres variés avec de gros points ronds de meurtrissures diversement espacées entre cassures d'éclats. Ces points ont une largeur de 2 mm à 4 mm, une profondeur entre creux et bosses de 1 mm à 4 mm et un espacement de 3 mm à 20 mm,

■ **Tranche :** plaque de pierre brute obtenue par sciage d'un bloc brut généralement au moyen d'un châssis à fils diamantés ou d'un grand disque.

1.2.7 PRINCIPALES DÉFINITIONS DU VOLUME 5 DU DICTIONNAIRE DE L'ENTRETIEN ROUTIER (2008)

La partie consacrée aux ponts en maçonnerie comporte **cinq pages de définitions.** Le lecteur est invité à consulter ce document téléchargeable sur le site de la **Documentation Technique Routière Française (DTRF).**

1.2.8 MORPHOLOGIE DES PONTS ET MURS EN MAÇONNERIE

Les quelques figures de ce paragraphe, extraites de **l'annexe 2** (guide FABEM 6.4), ont pour but d'illustrer les principales définitions des termes utilisés dans les guides «Maçonnerie».

ATTENTION, *certains ponts peuvent associer la maçonnerie, le béton armé et même l'acier. Certains murs de soutènement en béton armé ont des parements habillés par des pierres. Se reporter à* ***l'annexe 3*** *(guide FABEM 6.4) qui décrit ces ouvrages mixtes particuliers.*

1.2.8.1 Ponts en maçonnerie

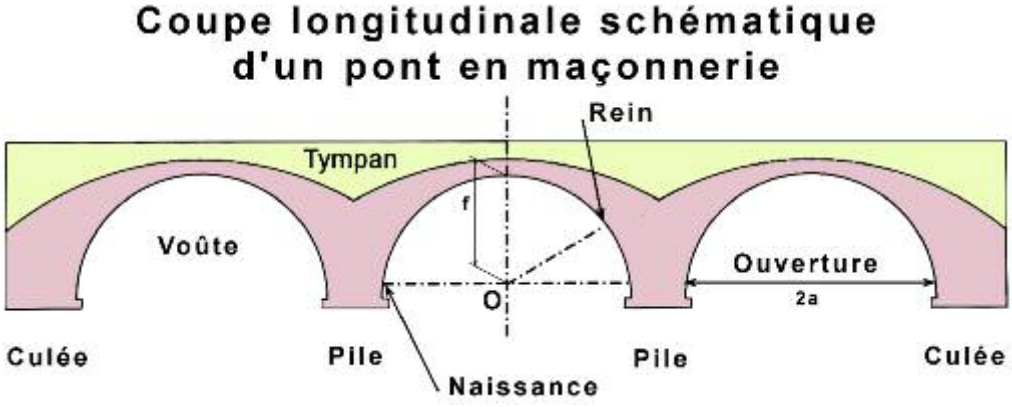


Figure n°1 : coupe longitudinale schématique d'un pont en maçonnerie

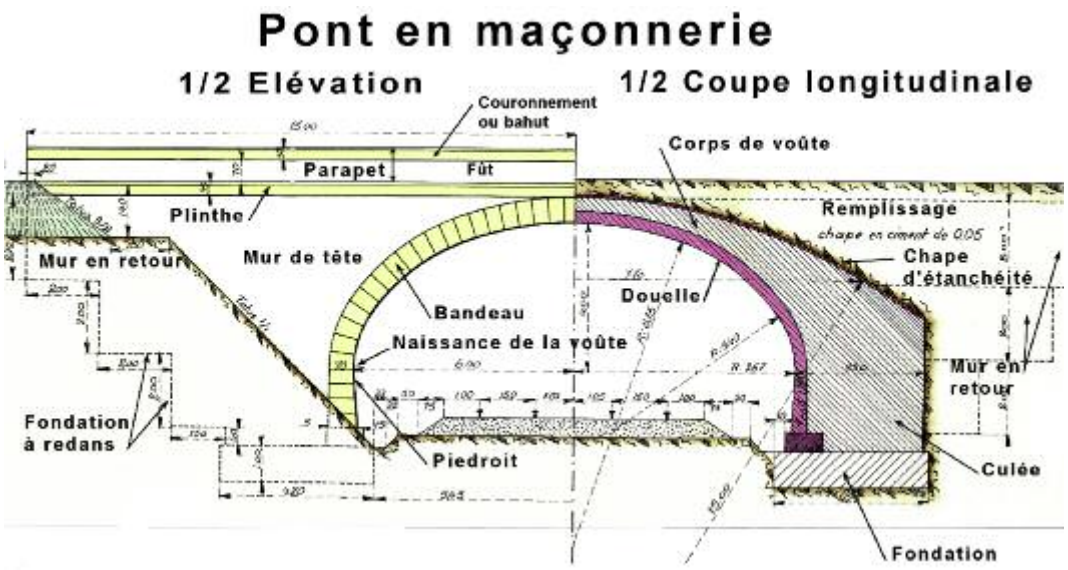


Figure n°2 : demi-élévation et demi-coupe longitudinale d'un pont en maçonnerie

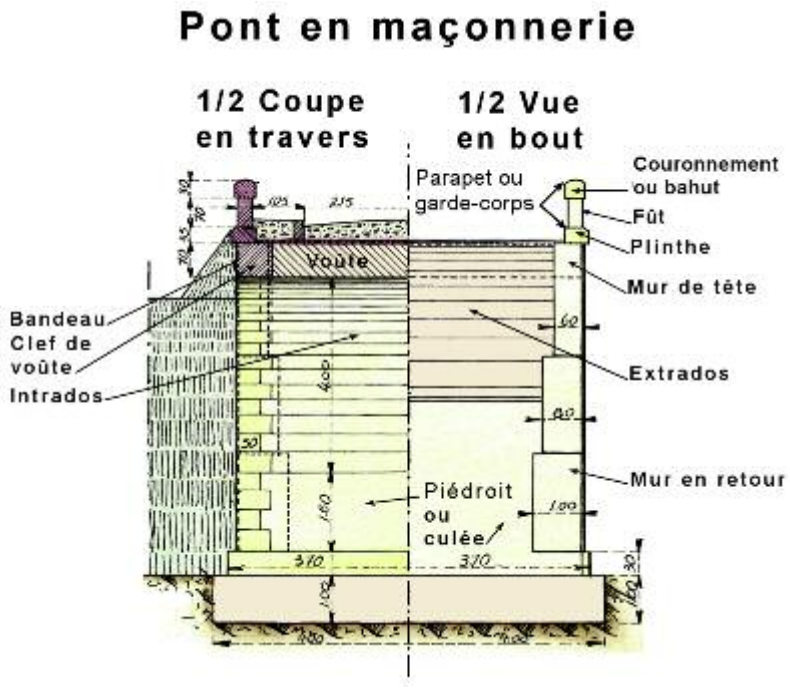


Figure n° 3 : demi-coupe transversale et demi-vue en bout d'un pont en maçonnerie

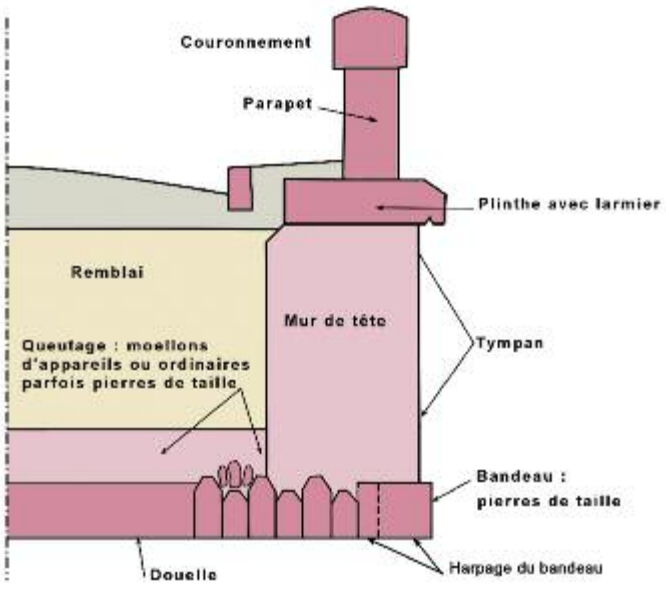


Figure n°4 : demi-coupe transversale schématique d'un pont en maçonnerie

1.2.8.2 Murs de soutènement en maçonnerie

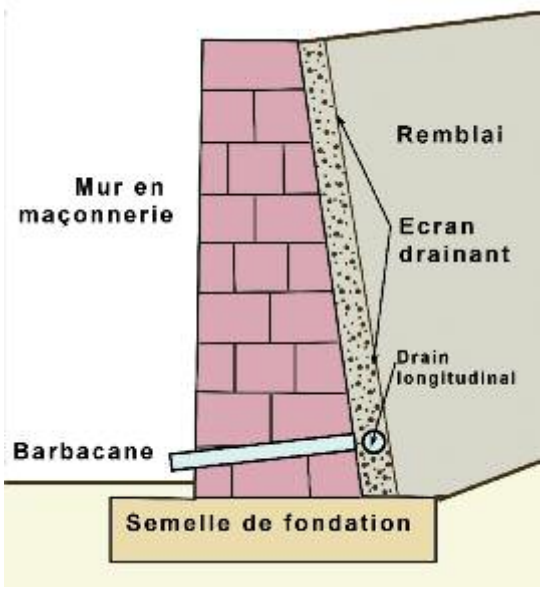


Figure n°5 : coupe transversale type d'un mur de soutènement en maçonnerie

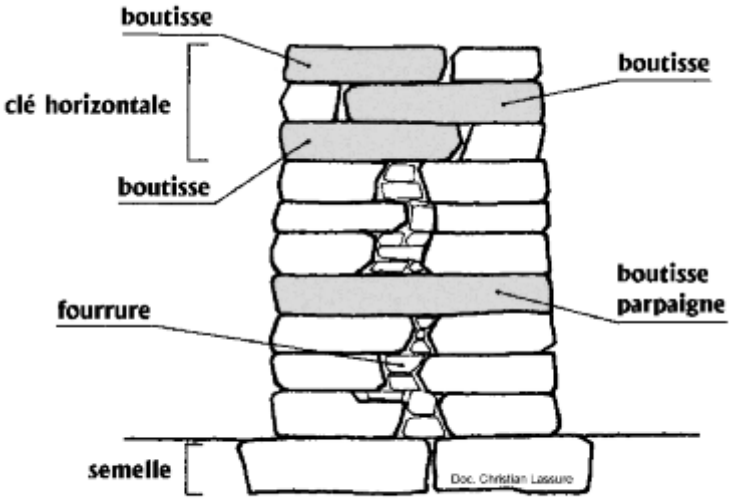


Figure n°6 : coupe transversale d'un mur en pierre sèche *(crédit photo Wikipédia)*

2

Documents de référence

| Retour au sommaire |

UNE ÉDITION DU SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES (STRRES) / FÉVRIER 2016

L'évolution continuelle des documents de référence et, en particulier, des normes rend très rapidement caduc tout document imprimé ou non. **La liste complète des documents de référence** visés dans les guides maçonnerie a donc été reportée dans **l'annexe 1** (FABEM 6.4) avec **les dates de valeur de ces documents.** On notera cependant que les **références normatives** d'un certain nombre de textes, y compris même les normes, ne sont pas à jour comme le montre l'exemple ci-après.

> Exemple : la norme **NF P 95-107** de 2002 fait référence à plusieurs normes obsolètes. En effet, la norme **XP P 49-646 n'existe plus,** la norme **XP B 10-601** et devenue **NF B 10-601,** la norme **XP P 18-303** a été remplacée par la norme **NF EN 1008**, etc.

Il est fait référence, dans les différents paragraphes des guides «Maçonnerie», à un certain nombre de textes actuellement en vigueur (normes, DTU et fascicules du CCTG…). **Du fait de la parution des nouvelles normes européennes,** certains de ces textes vont devoir être modifiés ou retirés ces prochaines années. Les guides «Maçonnerie» prennent cependant en compte, si nécessaire, certaines des modifications ainsi apportées. De plus, dans la mesure du possible, ces guides pointent les textes dont les références normatives ne sont pas à jour. Ces modifications ou retraits peuvent aussi concerner les **autres guides du STRRES de la famille [FABEM]** déjà parus.

> Les mises à jour de la liste des documents de référence peuvent être trouvées sur les sites des organismes suivants et aussi au moyen de mots clés dans les logiciels de recherche :

- l'Association Française de Génie Civil (AFGC) ;
- l'Association Française de Normalisation (AFNOR) ;
- l'Association pour la Qualité de la Précontrainte et des Équipements (ASQPE) ;
- l'Association pour la Qualité de la Projection des Mortiers et Bétons (ASQUAPRO) ;
- l'Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain (AFTES) ;
- le Centre Français de l'Anticorrosion (CEFRACOR) ;
- le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) ;
- le Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF) ;
- le Centre d'Études des Tunnels (CETU) ;
- le Centre Technique des Matériaux Naturels de Construction (CTMNC) – Pierre naturelle et terre cuite ;
- la Documentation Technique Routière Française (DTRF)
- la Fédération Française du Bâtiment (FFB) ;

- la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP) ;
- l'ICOMOS (International Council on Monuments and Sites) ;
- l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR) ;
- Légifrance ;
- l'Office Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics (OPPBTP) ;
- le Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA ou Sétra). Consulter la partie consacrée aux ouvrages d'art dénommée « PILES » ;
- le Syndicat des Entreprises Distributrices de Précontrainte par Post-Tension (SEDIP) ;
- le Syndicat National des Joints et Façades (SNJF) ;
- le Syndicat National des Entrepreneurs Spécialistes de Travaux de Réparation et Renforcement de Structures (STRRES) ;
- etc.

Les coordonnées de ces différents sites sont disponibles dans une **annexe au GUIDE GÉNÉRAL.**

> ***Rappel important :*** *en général, les normes et les guides ne fixent ni le rôle de chacun des intervenants, ni les conditions de choix des produits et de leur mise en œuvre, ni la consistance exacte des épreuves d'étude, de convenance ou de contrôle (par exemple, types et nombre d'essais). Ils ne traitent pas non plus de ce qui relève des contrôles internes ou externes ou extérieurs à l'entreprise, etc.* ***Il appartient donc au marché de fixer les exigences correspondantes.***

NOTA : *il est possible de s'appuyer, pour la rédaction d'un* ***marché de réparation*** *et/ou* ***renforcement*** *d'un ouvrage en maçonnerie, sur le* ***modèle de CCTP et de BPU*** *mis au point par la* ***Division des Grands Ouvrages du SETRA.*** *Ces documents ne traitent cependant pas de toutes les techniques des guides «Maçonnerie».*

> Il est rappelé que, dans un marché, la contractualisation d'un texte tel qu'un guide, un fascicule de CCTG, un DTU, une norme… doit, le plus souvent, être complétée par des exigences additionnelles adaptées aux dispositions du texte et aux conditions de réalisation des travaux de réparation ou de renforcement à effectuer. Par exemple :

- **dans un guide,** seules certaines parties relèvent de la contractualisation ;
- **dans un DTU,** la liste des travaux relatifs au corps d'état concerné par ceux-ci est fixée. **Le DTU** peut attribuer à d'autres corps d'état certains des travaux préparatoires. Enfin, il

renvoie **aux documents particuliers du marché (DPM)** pour fixer certains des travaux du corps d'état qui n'ont pas été retenus dans la liste susvisée (ce point est explicité dans la remarque ci-après à cause de son incidence sur la rédaction des pièces de marché) ;

- **dans une norme,** plusieurs niveaux de performances peuvent être proposés, un choix est donc à faire ;

- **dans une norme,** les conditions climatiques (température et hygrométrie) retenues pour les essais des produits peuvent ne pas correspondre à celles qui seront enregistrées sur le site de l'ouvrage lors de la mise en œuvre des produits, il faut alors fixer des exigences plus contraignantes…

REMARQUE IMPORTANTE : *un marché de* ***bâtiment*** *est décomposé le plus souvent en plusieurs lots attribués à différents corps d'état. Un marché de* ***génie civil*** *fait appel le plus souvent à une entreprise générale ou à un groupement d'entreprises. Les textes officiels concernant ces deux domaines ont donc été rédigés en conséquence. Il faut en tenir compte lors de la rédaction d'un* ***marché*** *de réparation. Dans la mesure du possible les guides «Maçonnerie» attirent l'attention sur les particularités des deux domaines.*

3

Bref historique - Principes généraux

3.1 Bref historique
3.2 Domaines du bâtiment et du Génie Civil
3.3 Études et investigations

> Après un bref historique, ce paragraphe traite :

- des adaptations à effectuer suivant que les travaux concernent le domaine du bâtiment ou celui du génie civil, voire celui des monuments historiques ;
- de l'importance et de la méthodologie des études préalables pour la mise au point du projet de réparation et /ou de renforcement ;
- de la méthodologie d'établissement du projet de réparation et/ou renforcement.

La pierre est un matériau minéral. Il a fallu en choisir le gisement, l'extraire, la tailler, la sceller. Autant de tâches qu'il a fallu apprendre à maîtriser. De la même façon, il a fallu maîtriser la fabrication et la mise en œuvre de la brique dans les régions où les pierres n'étaient pas disponible en quantité suffisante.

Nous pourrions aller chercher chez les Egyptiens ou les Chinois des qualités évidentes de maçonnerie. Mais, étant Français et il y a bien longtemps Gaulois, nous devons nous souvenir que notre chère Gaule a été très longtemps occupée par les Romains (jusqu'au milieu du V^{e} siècle). Ces occupants avaient compris que, pour développer une économie moderne, il fallait des routes pour communiquer et transporter du matériel et des produits. Il leur a fallu construire des ponts pour ces routes mais, plus encore, pour acheminer l'eau nécessaire à l'organisation de la vie, ils durent construire de nombreux «aqueducs» dont l'un des plus célèbres, venu sans trop de modifications jusqu'à nous, est celui du Gard.

Vient ensuite entre le XI^{e} et le XVI^{e} siècle, le temps de la construction des cathédrales. Elles ont été les premiers grands «chantiers» de notre ère. Il a fallu apprendre ou du moins réapprendre les techniques que d'autres déjà maîtrisaient parfaitement (l'empire byzantin en particulier) à savoir : le trait, la taille, la voûte, l'arc, et bien entendu, le mortier.

Dans le même temps, ont été développées des techniques permettant de construire en s'affranchissant des problèmes liés à la présence de l'eau, comme les digues et batardeaux, ainsi que des problèmes posés par les sols trop meubles, comme les pieux en bois fichés dans le terrain.

Grâce à tous ces progrès, la construction de grands ponts a pu se réaliser. Deux des plus célèbres, encore utilisés aujourd'hui dans leur configuration d'origine des XVI^{e} et début du XVII^{e} siècle sont les «Ponts Neufs» de Toulouse et de Paris. La construction des ponts et des viaducs en pierre se poursuivra jusque vers les années 1930. La maîtrise de la maçonnerie se prolongera jusque vers les années 50, avec la reconstruction des ponts détruits par faits de guerre.

Les moyens de transport lourds et de gros volumes étant peu développés, la maçonnerie était, traditionnellement, réalisée avec les ressources locales. Ceci avait pour avantage que les matériaux et produits utilisés se comportaient souvent assez bien puisqu'ils étaient conservés dans leur environnement climatique habituel.

Au-delà de l'exploit technique que représentait la construction d'un ouvrage d'art, et en particulier d'un pont, il faut souligner la persévérance des constructeurs car la réalisation pouvait durer de très nombreuses années (100 ans pour le Pont Neuf de Toulouse). De plus, cette édification créait un véritable lien social intéressant tout un ensemble de corps d'état différents : les carriers (ou les cuiseurs de briques) les tailleurs de pierres, les bûcherons, les scieurs de long, les boiseurs, les charpentiers, les bouviers (transport de matériaux) et sans oublier les commerces environnant tels que les hôteliers, les aubergistes, les ateliers de confection, etc.

Des compléments sur l'évolution des ouvrages en maçonnerie sont disponibles dans **l'annexe 2** (guide FABEM 6.4) et dans certains des documents cités en référence.

Les rédacteurs des guides «Maçonnerie» se sont posés la question suivante : faut-il traiter séparément **les domaines du bâtiment et du génie civil ?** L'examen des textes de référence a permis de faire les propositions suivantes en se basant sur l'examen des deux domaines.

> DANS LE DOMAINE DU BÂTIMENT

À cause des **obligations d'assurance,** les procédures de mise en œuvre des différents produits dans le domaine du bâtiment doivent, soit satisfaire aux dispositions des **DTU**, qui ont été transformés en normes depuis quelques années, soit faire l'objet **d'exigences dans le cadre d'un cahier des prescriptions techniques du CSTB complétées par des Avis Techniques ou des certifications telles que CSTbat.** Ce principe est applicable, aussi bien pour la réalisation des **ouvrages neufs** que pour la **réhabilitation** et les réparations, sous réserve que les textes existent et que l'opération prévue s'inscrive bien dans le **domaine d'application** couvert par ces différents documents.

En revanche, il n'est pas nécessaire de faire la séparation pour le **domaine des réparations et des renforcements qui ne sont pas directement visés par les DTU ou les avis techniques.**

En conclusion, les documents particuliers du marché (DPM) peuvent, en s'inspirant des présent guides «Maçonnerie», compléter, en tant que de besoin les clauses du ou des **DTU concernés (le DTU 20.1** relatif aux ouvrages en maçonnerie de petits éléments est le principal texte concerné pour les bâtiments en maçonnerie).

Il convient cependant de prendre en compte, **pour le choix des produits et matériaux, les contraintes spécifiques au bâtiment,** telles que le **niveau de tenue au feu, sans oublier les obligations liées aux assurances…**

NOTA : *les guides «Maçonnerie» ne traitent normalement pas du* ***domaine des bâtiments historiques.*** *Se reporter au document «Ouvrages en maçonnerie» de juin 2006 rédigé pour le compte de la Direction de l'Architecture et du Patrimoine et disponible sur le site du Ministère de la culture et de la communication. Cependant, certaines des techniques développées dans les guides «Maçonnerie» ne figurent pas dans le document susvisé.*

> DANS LE DOMAINE DU GÉNIE CIVIL

Il est possible de se baser, d'une part, sur la norme NF P 95-107 : Ouvrages d'art – Réparation et renforcement des maçonneries – Spécifications relatives aux techniques et matériaux utilisés et, d'autre part, sur le **fascicule 64 du CCTG relatif aux travaux de maçonnerie d'ouvrages de génie civil,** qui s'applique normalement aux **ouvrages neufs.** Bien entendu, ses prescriptions peuvent être adaptées aux réparations et renforcements.

De plus, comme les réparations et/ou les renforcements des ouvrages en maçonnerie peuvent faire appel à la mise en œuvre d'armatures de béton armé, d'armatures de précontrainte, de béton…, les prescriptions d'autres **fascicules du CCTG** peuvent être utilisées. Par exemple, celles du **fascicule 3** (fourniture de liants hydrauliques), du **fascicule 4 titre II** (armatures à haute résistance pour constructions en béton précontraint par pré ou post-tension), du **nouveau fascicule 65…**

ATTENTION : les fascicules du CCTG *sont loin d'être à jour, en particulier, en matière de références normatives ; il faut donc compléter le* ***marché*** *en conséquence.*

3.3.1 GÉNÉRALITÉS – IMPORTANCE DES ÉTUDES PRÉLIMINAIRES

Toute réparation et/ou renforcement d'un ouvrage en maçonnerie doit débuter par une étude de l'état de la construction avant d'aborder la recherche et la mise au point de la ou des solutions de confortement.

> Ce processus passe par des étapes incontournables qui ont été développées et détaillées dans le guide FABEM 1 auquel le lecteur est invité à se reporter. Les principales étapes sont rappelées ci-dessous :

- **1. la détection des dégradations ;**
- **2. l'auscultation – le diagnostic – le pronostic ;**
- **3. l'établissement du projet de réparation et/ou de renforcement ;**
- **4. la mise en sécurité de l'ouvrage ;**
- **5. la mise en œuvre de la réparation et/ou du renforcement ;**
- **6. les contrôles et vérifications des résultats ;**
- **7. la surveillance de la structure réparée et/ou renforcée.**

Les étapes 1 à 3 sont nécessaires à la mise au point du **projet** et du **DCE. Elles sont de la responsabilité du maître d'ouvrage et de son maître d'œuvre.**

Les étapes 4 à 6 correspondent à l'intervention de **l'entrepreneur** sous le **contrôle** du **maître d'œuvre.**

L'étape 7 est de la **responsabilité** du **maître d'ouvrage** et du **gestionnaire de l'ouvrage.**

3.3.2 AUSCULTATION, DIAGNOSTIC, PRONOSTIC

La seconde étape, qui porte sur **«l'auscultation – le diagnostic – le pronostic»,** est essentielle. Elle doit permettre d'identifier la maladie, d'en estimer l'étendue et d'en identifier les causes. La qualité de ce diagnostic revêt une grande importance pour la réussite ou l'échec de la réparation, notamment sa durabilité.

L'aide au diagnostic est assurée dans le **paragraphe 4 qui détaille les causes et les origines des principaux désordres** qui peuvent affecter les ouvrages en maçonnerie ainsi que les **investigations** qui peuvent être faites pour confirmer le **diagnostic visuel.**

ATTENTION, *un ouvrage en maçonnerie à réparer ou renforcer est souvent* ***vieux de plusieurs siècles.*** *Il a été conçu et réalisé suivant les* ***techniques*** *et les* ***connaissances*** *disponibles à l'époque de sa construction. De plus, il peut avoir été* ***réparé, reconstruit partiellement, renforcé ou élargi*** *à plusieurs reprises. Il est donc indispensable, pour aboutir à un diagnostic pertinent et à une solution de confortement efficace, de connaître* ***L'HISTOIRE DE L'OUVRAGE EN CAUSE.***

Par exemple, l'article paru en juillet et août 1981 dans la revue TRAVAUX, qui relate le cas du pont de Tours, montre la complexité extrême à laquelle on peut être confronté et l'importance du ***DOSSIER DE L'OUVRAGE.***

Il n'était pas pensable de traiter dans les guides «Maçonnerie» toute l'évolution des conceptions et des techniques de la maçonnerie. Cependant un ***bref historique*** *figure dans le* ***paragraphe 3.1*** *et, surtout,* ***l'annexe 2 (guide FABEM 6.4)*** *donne de précieuses indications sur la* ***conception*** *et le* ***mode de fonctionnement des ponts et murs de soutènement en maçonnerie*** *(morphologie, détails technologiques, mode de fonctionnement et évolution des techniques de construction et des méthodes de calcul). Le lecteur pourra trouver des informations complémentaires dans les nombreux documents et guides visés en référence.*

En l'absence d'un DOSSIER D'OUVRAGE digne de ce non, il faut parfois, à l'aide de sondages, reconstituer la géométrie de la structure (par exemple, le tracé de l'extrados d'une voûte, l'épaisseur des tympans…). Il peut aussi être nécessaire de connaître par des sondages, des prélèvements et des essais la nature, la géométrie et les caractéristiques des différents maçonneries associées qui constituent une voûte (par exemple, pierres de taille pour les bandeaux et chaînes d'angle, moellon d'appareil à l'intrados, moellons ordinaires à l'extrados et pour les culées…)… Toutes ses investigations sont, normalement, à réaliser pendant la **phase des études préalables** qui aboutissent au projet de réparation ou de renforcement.

3.3.3 PROJET DE RÉPARATION ET/OU RENFORCEMENT

L'aide à l'établissement du projet de réparation et/ou renforcement de la troisième étape est assurée par **les paragraphes 5 et 6** du présent guide qui détaillent la **préparation de l'opération,** les **tâches** et les **travaux connexes** puis par les **guides FABEM 6.2 et 6.3** qui présentent les différentes **méthodes de réparation et/ou renforcement** en fonction des désordres constatés et de leurs causes.

Le projet de réparation et/ou renforcement d'un ouvrage en maçonnerie, ainsi que les travaux qui en résultent, doivent intégrer, impérativement, **le facteur durabilité,** et ce, pour les raisons exposeés ci-après.

Photo n° 1 : pont Fabricio (dit des quatre têtes) construit en 62 avant J. C. *(crédit photo D. Poineau)*

Sous réserve ***d'opérations répétées d'entretien préventif,*** *et, si besoin est, de* ***réparations*** *ou de* ***renforcements, la maçonnerie a une durée de vie beaucoup plus importante que celle des autres matériaux de construction (le béton et l'acier).***

Il est donc conseillé, *au minimum, d'utiliser* ***des armatures traitées contre la corrosion,*** *sous réserve qu'elles soient* ***facilement remplaçables (non scellées).*** *Si ce n'est pas le cas il est préférable d'avoir recours à* ***des armatures non corrodables*** *(armatures composites [résines fibrées], armatures en aciers inoxydables de composition adaptée…).*

Photo n° 2 : état de l'église Notre-Dame de Royan construite entre 1955 et 1958 *(crédit photo D. Poineau)*

Dans le domaine des monuments historiques, riche d'expériences, il a été constaté, à maintes reprises, que des armatures métalliques ordinaires scellées avec des mortiers dans des réservations à l'intérieur de la maçonnerie (technique utilisée dans les ouvrages neufs et lors des restaurations) peuvent provoquer, **par corrosion, au bout d'un certain nombre d'années, des désordres importants dans les structures.**

> Par exemple :

- dans les années 2000, de nombreux éclatements de pierres ont été relevés dans la coupole du Panthéon dans laquelle des armatures de liaison entre les pierres avaient été mises en place lors de sa construction ;
- le Parthénon où des armatures ont été mises en place lors d'une précédente restauration a été victime de désordres semblables ;
- l'article du Moniteur du 21 août 1992 sur la restauration du portail de la cathédrale de Reims met en cause l'incidence très néfaste de la corrosion des crampons et goujons métalliques utilisés pour la fixation des statues lors des différentes restaurations entre le XVII^{e} et le XX^{e} siècle.

À noter que les anciens scellaient les éléments métalliques, comme les agrafes, avec **du plomb,** pour limiter les risques d'éclatement de la pierre dus à la corrosion du métal.

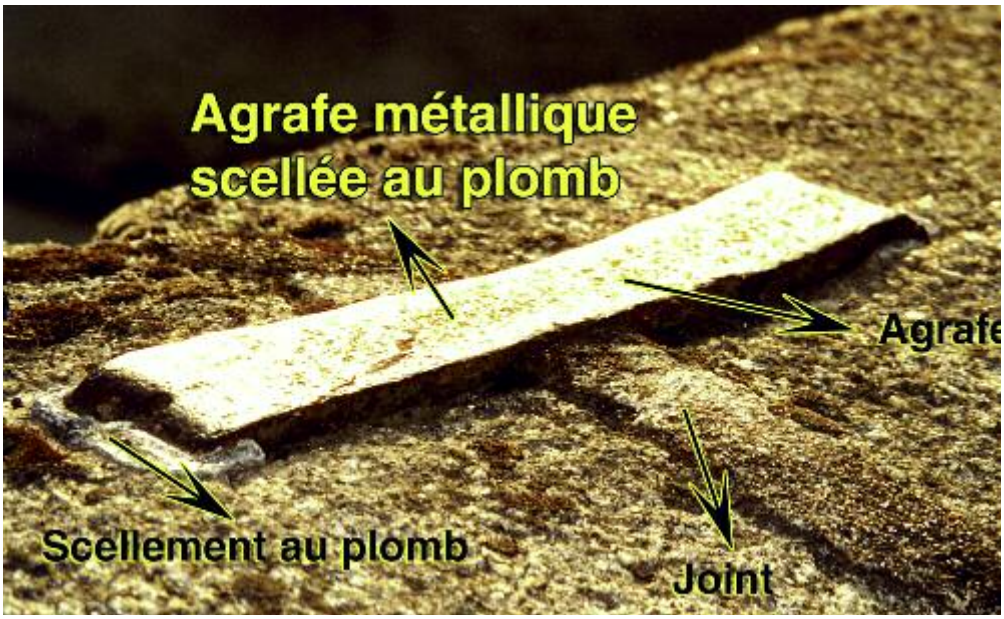


Photo n° 3 : couronnement d'un garde-corps à Dinan Côtes d'Armor *(crédit photo D. Poineau)*

Il appartient au **marché** de fixer les **exigences en matière de durabilité des réparations et/ou des renforcements** en tenant compte des conseils développés dans l'ensemble des guides.

4

Les principaux désordres et leurs origines

4.1 Manifestations des désordres structurels
4.2 Manifestations des désordres des matériaux
4.3 Origines des désordres

UNE ÉDITION DU SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES (STRRES) / FÉVRIER 2016

Le présent paragraphe décrit en premier comment se manifestent les principaux désordres structurels, en second comment se manifestent les principaux désordres des matériaux que sont la pierre, la brique et les mortiers (hourdage et joints) et, en troisième les origines des principaux désordres, ainsi que les investigations à effectuer pour confirmer le pré-diagnostic visuel.

ATTENTION, *cependant, l'absence de résistance à la traction de la maçonnerie, les déformations qui se sont produites lors du décintrement, les effets des variations thermiques et le passage des charges lourdes font que* ***TOUTES LES VOÛTES SONT FISSURÉES.*** *Bien entendu, la fissuration est beaucoup plus marquée dans les grandes voûtes ; pour les plus petites, il s'agit d'une microfissuration. Ce fonctionnement est normal si les fissures ont* ***une faible ouverture et un comportement cyclique.***

La multiplication des fissures, l'augmentation de leur ouverture, l'apparition d'éclatements de pierres montrent un comportement anormal de la structure.

L'apparition des désordres décrits ci-après doit conduire, suivant l'importance et l'évolution du phénomène constaté, à mettre **EN SÉCURITÉ LA STRUCTURE** puis à effectuer rapidement les investigations nécessaires à l'élaboration du diagnostic et du pronostic. Les désordres des matériaux peuvent aussi provoquer des problèmes structurels.

4.1.1 DÉFORMATIONS MASSIVES

> Ces sont les déformations qui affectent l'ouvrage sur l'ensemble de sa structure. Ces défauts sont le résultat de problèmes de faiblesse dans les parties porteuses de l'ouvrage :

- altération du terrain de fondation ;
- altération massive des parties enterrées ou immergées de l'ouvrage ;
- ruptures de pieux ;
- glissement de terrain…

Ces déformations se caractérisent par des défauts plus ou moins importants des parties d'ouvrage normalement en alignement, comme les plinthes et les couronnements.

Photo n° 4 : déformation liée à un affouillement sous la fondation de la pile mettant en danger le pont de Régereau sur le Vicoin *(crédit photo J-P Levillain)*

4.1.2 DÉFORMATIONS LOCALISÉES

Photo n° 5 : déformation du mur en retour d'un pont en maçonnerie *(crédit photo J. M. Michotey)*

Elles se caractérisent par des ventres venant en saillie sur le parement. Elles peuvent affecter toutes les parties de l'ouvrage en désignant les parties «souffrant» d'une pathologie ; elles sont les alertes pour des désordres plus graves qu'il convient de traiter dans l'urgence avant désorganisation complète et ruine de l'édifice.

La partie d'ouvrage concernée et l'importance de la déformation déterminent plus précisément le degré d'urgence des réparations à amener, la voûte étant plus inquiétante que les tympans et les mouvements de bandeaux plus alarmants que ceux de la douelle.

Les origines de ces déformations sont multiples mais, souvent, la présence d'écoulement d'eau ou de traces de son passage est révélatrice d'une altération du mortier de hourdage et d'une décompression du corps de maçonnerie.

4.1.3 FISSURES

Les fissures sont des fentes de faibles ouvertures visibles en surface. Elles peuvent altérer les joints uniquement, les pierres et les joints ou les pierres seules. La recherche de leurs origines est délicate. Leur longueur, leur orientation et leurs variations d'amplitudes sont des éléments d'analyse. Une instrumentation et un suivi peuvent aider au diagnostic.

Photo n° 6 : fissure des moellons dans une voûte composite associant la pierre et la brique *(crédit photo J. M. Michotey)*

4.1.4 FRACTURES

Photo n° 7 : fracture à la jonction entre le bandeau et la voûte avec écrasement d'une des pierres de la clé de voûte
(crédit photo LRPC)

Elles témoignent d'une rupture franche du matériau, les deux parties sont désolidarisées. Leurs ouvertures sont souvent centimétriques. En général, elles suivent les zones de moindres résistances que sont les joints.

Sur les ponts en maçonnerie, les fractures les plus communes sont situées à l'interface entre le bandeau et la douelle.

Elles sont caractérisées par leur ouverture, leur désafleurement et leur rejet (mouvement relatif dans le sens parallèle à l'ouverture).

4.1.5 DÉSORGANISATION DE LA MAÇONNERIE

La désorganisation de la maçonnerie, lorsqu'il y a disparition des joints, des chutes de moellons… met en jeu la **capacité portante et la sécurité de la structure.** Elle peut être locale ou plus étendue comme le montrent les photos suivantes. Cette désorganisation se caractérise par le fait qu'elle va nécessiter, après mise en sécurité, la reconstruction de la partie concernée après démontage des parties instables.

Photo n° 8: désorganisation locale *(crédit photo CDOA Corse)*

Photo n° 9 : désorganisation de la maçonnerie d'une pile *(photo CDOA 70)*

La désorganisation de la maçonnerie peut aussi ne concerner que les joints lorsque ceux-ci ont été détruits sur une grande profondeur et sur des surfaces importantes et que l'on peut considérer quasiment que la maçonnerie hourdée s'est transformée en une maçonnerie de pierres sèches. La chute de moellons est à redouter, ce qui conduirait la structure à présenter la pathologie précédente.

Photo n° 10 : désorganisation quasi-totale des joints *(crédit photo J. M. Michotey)*

Les altérations des matériaux (pierres, briques et joints) se traduisent par une **désorganisation du parement de la maçonnerie** sur une épaisseur variable pouvant atteindre quelques centimètres. De tels désordres, au début, **ne sont pas structuraux mais peuvent le devenir** s'ils ne sont pas traités, car la désorganisation pénètre en profondeur comme le montre une des photos ci-après.

Un glossaire illustré sur les différentes formes d'altération de la pierre peut être consulté sur le site de l'ICOMOS :
http://www.international.icomos.org/publications/monuments_and_sites/15/pdf/Monuments_and_Sites_15_ISCS_Glossary_Stone.pdf.

Photo n° 11 : désorganisation locale d'un parement en briques *(crédit photo J. M. Michotey)*

Photo n° 12 : désorganisation de surface du parement en pierres calcaire du pont de Favernay due au gel *(crédit photo DDE 70)*

Photo n° 13 : désorganisation profonde de pierres calcaires mettant en jeu la stabilité et la capacité portante du mur d'une habitation *(crédit photo D. Poineau)*

4.3 Origines des désordres

Les ponts maçonnés en France ont principalement été construits entre le XVII[e] siècle et le début du XX[e] siècle. Outre le vieillissement naturel des différents éléments qui constituent ces ouvrages, les causes de dégradations sont très nombreuses. Dans la suite du texte, un inventaire est fait et reprend plus en détail les mécanismes qui, en se conjuguant souvent, rendent délicat le diagnostic nécessaire à la remise en état.

> Les mécanismes, causes des désordres, peuvent être classés dans les catégories suivantes :

- défauts de conception et de construction
- actions de l'eau ;
- altération des matériaux (pierres, briques et mortiers) ;
- désordres physico-chimiques ;
- mise en contact de matériaux incompatibles ;
- chape d'étanchéité absente ou inefficace ;
- mauvaise qualité des matériaux de remplissage (remblais) ;
- drainage inexistant ou non fonctionnel ;
- modification des conditions d'utilisation de l'ouvrage :
- augmentation des charges d'exploitation ;
- modification de la géométrie ;
- mouvements des fondations ;
- action de la végétation sur ou au voisinage immédiat des ouvrages ;
- réparations et/ou renforcements mal conduits ;
- méthode de nettoyage agressive ;
- actions accidentelles…

4.3.1 DÉFAUTS DE CONCEPTION ET DE CONSTRUCTION

> Causes

Bien que la plupart des ouvrages de mauvaise conception aient naturellement disparus sous les actions climatiques, les crues…, il existe encore des ouvrages qui, pour des raisons d'économie, de rapidité d'exécution ou de facilité de construction présentent des anomalies : briques ou pierres de mauvaise qualité et sensibles au gel, maçonnerie de remplissage hourdée par des mélanges de chaux et de terre, absence de chape d'étanchéité, remblai argileux, fondations affouillables, des déformations et des fissures dues au tassements non maîtrisés du cintre ou des fondations mal fondées…

Photo n° 14 : exemple d'emploi de matériaux inadaptés : pierres et mortier de hourdage *(crédit photo LRPC)*

> Investigations

La surveillance continue et/ou périodique permet de constater la présence des désordres. Ensuite, en fonction des désordres constatés, il faut effectuer les investigations adaptées pour en déterminer les causes. Se reporter aux différents articles ci-après du présent paragraphe.

4.3.2 ACTIONS DE L'EAU

Cet article général sur les effets de l'eau est complété par quatre autres ci-après qui détaillent les pathologies causés par l'absence ou l'inefficacité de la chape d'étanchéité, la mauvaise qualité des matériaux de remplissage, l'absence ou le mauvais état du réseau de drainage et la végétation.

4.3.2.1 Constatations

La plupart des pathologies sur les ouvrages en maçonnerie sont liées à **L'EAU** et à sa circulation dans le corps de l'ouvrage ou à l'extérieur de celui-ci.

La présence de l'eau dans la maçonnerie est liée principalement à des défauts de l'étanchéité supérieure, à un mauvais drainage, à la présence de canalisations fuyardes mais aussi, pour une plus faible part, aux expositions directes aux eaux de pluie et aux remontées capillaires.

Les eaux stagnantes et courantes à l'extérieur de l'ouvrage peuvent pénétrer dans la maçonnerie comme les eaux de ruissellement. De plus, les eaux courantes exercent des effets mécaniques (abrasion et affouillement).

A. CAS DES EAUX DE PLUIE ET DE RUISSELLEMENT

> En cas de défaut ou d'inefficacité des dispositifs de recueil des eaux et de drainage, de la chape d'étanchéité et de la qualité des joints, le passage des eaux au travers de la maçonnerie (cela concerne principalement les voûtes mais les murs de soutènement en sont aussi victimes) entraîne :

- la destruction des liants constituants les mortiers par dissolution chimique des chaux ou ciments, ce qui se traduit par la présence de coulures, de stalactites de calcite en intrados;
- l'entraînement et le vidage mécanique des joints ;
- l'altération des pierres calcaires ou à liant calcaire (grès) ;
- à terme, la chute de pierres ou de moellons descellés et, en final, l'effondrement partiel ou total de la structure.

Photo n° 15 : dissolution du mortier des joints *(crédit photo LRPC)*

En hiver, l'action de l'eau est accrue par des effets mécaniques d'expansion lorsque des stalactites de glace se forment.

Le passage des eaux a des effets encore plus sévères lorsque **les pierres ont une résistance au gel non adaptée à l'environnement** car, faute de moyens de transports rapides, les constructeurs utilisaient pour la construction des petits et des moyens ouvrages les matériaux disponibles à proximité du site de construction. De plus, si certaines pierres ont été posées en délit, la fissuration qui peut se produire favorise leur désorganisation.

Photo n° 16 : coulures d'humidité et de calcite et pierres sensibles au gel sous un ancien pont ferroviaire *(crédit photo DDE 52)*

En cas d'un drainage défaillant et d'une mauvaise qualité du matériau de remplissage, il est possible de constater des phénomènes de mises en charges directes des tympans ou des murs de soutènement pouvant provoquer des gonflements, voire la ruine partielle ou totale de l'ouvrage.

> La présence d'humidité favorise également le développement de la végétation :

- les mousses maintiennent l'humidité et produisent des acides humiques favorisant la destruction du mortier des joints ;
- les algues et lichens, qui produisent des salissures organiques (vertes, noires et rouges) maintenant l'humidité, produisent des acides organiques et leurs racines ont un rôle mécanique ;
- les arbustes, par les effets chimiques des acides émis par les racines pour récupérer les éléments nutritifs et surtout par les effets mécaniques causés par le développement des racines, accélèrent la désorganisation de la maçonnerie ;
- les racines envahissent aussi les systèmes de drainage comme les barbacanes, les gargouilles…

Photo n° 17 : incidences destructrices de la végétation fidèle alliée de l'eau *(crédit photo CDOA 78)*

Photo n° 18 : racine dans une des barbacanes d'un mur de soutènement *(crédit photo D. Poineau)*

B. CAS DES EAUX COURANTES (TORRENTS, RIVIÈRES...)

Dans le cas des ponts en milieu aquatique, il faut compter avec les effets de l'eau courante qui favorisent la circulation d'eau dans les maçonneries et le matériau de remplissage avec les effets déjà cités ci-devant. De plus, cette eau met en suspension des éléments solides qui provoquent par abrasion et chocs l'érosion des maçonneries.

Photo n° 19: désorganisation des murs en retour d'une culée *(crédit photo LRPC)*

La photo suivante montre l'abrasion par les eaux des bandeaux du pont romain de Vaison-la-Romaine. En effet, par temps de crue, le niveau des eaux peut atteindre et même dépasser le niveau de la clé de voûte : lors de la crue de 1992, l'Ouvèze est passée par-dessus les parapets.

Photo n° 20 : pont romain sur l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine *(crédit photo Paul Munhoven Wikipedia)*

Photo n° 21 : effondrement d'un pont lors des crues du Sud-est en 1992 *(crédit photo DDE 84)*

Dans les cours d'eau soumis à des crues brutales, les effets de celles-ci sont accrus par la présence des encombrants de bois qui forment barrage et accroissent la vitesse et le niveau des eaux. Cela entraîne souvent des désordres structurels graves par affouillement des fondations souvent fragiles. Ce dernier point est traité dans la suite du présent guide dans le paragraphe 4.3.11 ci-après. Sur la photo ci-dessus, il y a lieu de noter l'importance des encombrants.

C. CAS DES REMONTÉES D'HUMIDITÉ ET DE SELS

L'érosion par cristallisation des sels est une altération peu sensible à l'échelle des ouvrages récents qui est parfois évoquée pour les monuments historiques. Cette érosion est souvent appelée à tort **«érosion éolienne».** En effet, elle résulte de la remontée par capillarité des sels provenant en général du sol environnant le massif de fondations de la maçonnerie.

Le sel le plus courant est le nitrate de potassium (salpêtre) dont la formule chimique est KNO_3. Il se présente sous la forme de fibres blanches et est le résidu du développement de bactéries qui se nourrissent de l'ammoniac provenant de l'eau du sol et du carbonate de potassium contenu dans les murs. La transformation se termine au contact de l'oxygène de l'air pour former le nitrate de potassium ou «salpêtre». Le résultat de la perte de l'eau de cristallisation de ce sel donne une couche pulvérulente blanchâtre se formant sur les murs humides de pierres ou de briques.

Le soleil et le vent accélèrent l'évaporation des eaux chargées de sels et provoquent leurs cristallisations dans la maçonnerie jusqu'à environ 1 m à 2 m au dessus du niveau du sol.

> La hauteur de cristallisation est fonction, d'une part, des conditions microclimatiques de la maçonnerie de soubassement et, d'autre part, des propriétés intrinsèques de cette maçonnerie à savoir :

- sa capillarité ;
- la taille et la distribution de ses pores dont la mesure est appelée porométrie.

Les sels véhiculés par l'eau de capillarité viennent cristalliser sur le parement en altérant la matrice de surface de la pierre ou de la brique, ce qui forme un poudroiement, lequel est chassé par le vent en créant une cavité qui va malheureusement se creuser indéfiniment avec le temps. **La cause de cette altération est, en général, mais pas toujours, la remontée d'eau par capillarité à travers la maçonnerie des fondations.** Cette remontée se fait préférentiellement par les parois latérales de la maçonnerie car, sous la fondation, avec les tassements, le sol est plus compact.

Les deux photos qui suivent montrent **le cas du viaduc d'accès au pont de Saint-André-de-Cubzac** où l'eau agit, d'une part, par **le haut de l'ouvrage** dont l'étanchéité est défaillante et, d'autre part, par **des remontées dans le corps des piles.** Ici, cette eau provoque la destruction progressive de certaines des pierres de ce viaduc. Les habitations et murs de clôture en maçonnerie à proximité de cet ouvrage présentent les mêmes désordres.

Photo n° 22 : effets sur la pierre du passage des eaux de pluie au travers du remblai et des murs de tête
(crédit photo D. Poineau)

Photo n° 23 : effets des remontées d'humidité et de sels dans les piles *(crédit photo D. Poineau)*

Photo n° 24 : à gauche alvéolisation pathologique de la pierre calcaire des remparts d'Avignon à droite vermiculures sculptées d'un bandeau en pierres de taille d'un immeuble parisien *(crédit photo D. Poineau)*

La photo ci-devant montre les désordres qui affectent certaines parties des remparts de la cité d'Avignon. Ici, c'est le Mistral qui accélère la désorganisation des pierres en favorisant l'évaporation et l'érosion. Il est à noter que l'aspect des désordres fait penser aux «**vermiculures**» de certains bandeaux sculptés.

Ce phénomène est observable sur de très nombreux monuments et sites, tels que le Sphinx de Guizèh, l'amphithéâtre romain d'Arles, la place de la Concorde à Paris…

La remontée d'eau par capillarité dans les matériaux poreux est fonction du diamètre des pores. En effet, sous réserve qu'ils communiquent, plus grande est la finesse des pores et plus l'élévation de l'eau est importante.

> La figure ci-après illustre ce phénomène sur des tubes capillaires de différents diamètres. Cette élévation est régie par la loi de Jurin :

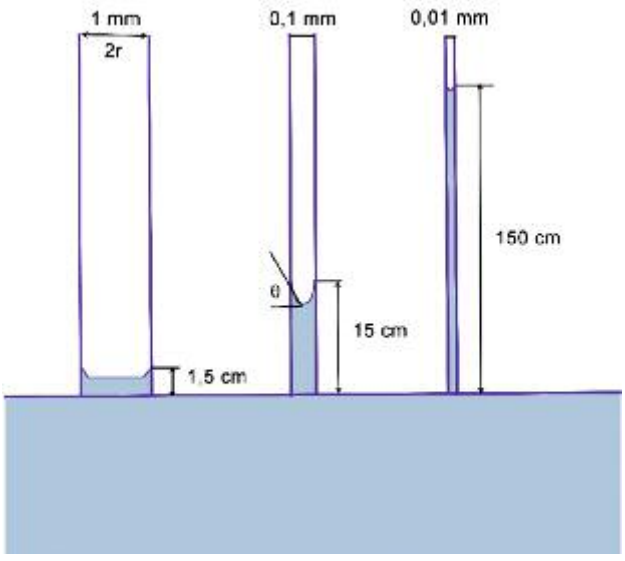


Figure n°7 : application de la loi de Jurin

$$h = \frac{2A.\cos\theta}{\mu.g.r}$$

- A est le coefficient de tension superficielle du liquide (eau = 73.10^{-3} Nm^{-1} à 20°C),

- θ est l'angle de contact (θ = 0° eau dans un tube de verre très propre dans le cas de la mouillabilité parfaite),

- g est le champ de la pesanteur (9,81 m/s^2),

- μ est la masse volumique du fluide (10 000 kg/m^3),

- 2r est le diamètre du tube (en m).

> En général, dans un mur, la remontée d'humidité se produit de la façon suivante :

- dans la masse du mur (pierre ou brique) ;
- par le mortier de pose ;
- par l'enduit.

Le graphique de la figure ci-dessous illustre des résultats de mesures de teneur en eau qui démontrent ici que l'humidification de ce mur se fait principalement par capillarité et par le mortier de pose.

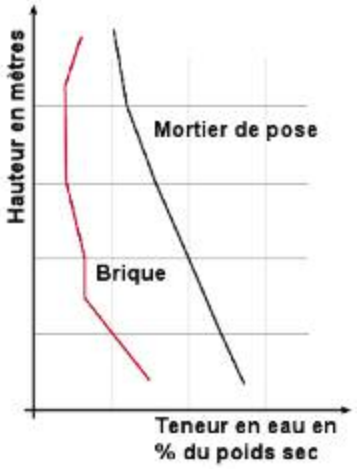


Figure n° 8 : résultats de mesures de teneur en eau dans un mur

4.3.2.2 Investigations

La surveillance continue et/ou périodique permet de constater la présence des désordres. Ensuite, en fonction des désordres constatés, il faut effectuer les investigations adaptées pour en déterminer les causes. Se reporter aux différents paragraphes ci-après relatifs aux altérations des pierres, briques et mortiers, à la qualité des matériaux de remplissage, à l'efficacité des chapes d'étanchéité…

4.3.3 ALTÉRATIONS DES PIERRES NATURELLES

4.3.3.1 Facteurs de vieillissement des pierres naturelles

Il est délicat de parler des défauts de la pierre naturelle au paragraphe des défauts de construction puisque, par essence, la pierre est un matériau périssable qui s'altère naturellement à l'état de roche. Son utilisation comme matériau de construction ne fait qu'accélérer les phénomènes naturels de dégradation par exposition à l'air et modification des contraintes mécaniques et physico-chimiques. Bien entendu, la dégradation est accélérée dans le cas où le choix de la pierre est inadapté au type de construction et à son environnement.

La responsabilité du constructeur se limite donc au bon choix du matériau en fonction des sollicitations physiques qui seront imposées à son édifice : contraintes mécaniques, exposition aux agents climatiques…

De nos jours, la réponse à cette question est la norme française **NF B 10-601**, qui précise les prescriptions générales d'emploi des pierres naturelles en fonction de leur destination dans l'ouvrage suivant leur localisation géographique. **À l'époque des bâtisseurs de notre patrimoine en maçonnerie,** les moyens de transport limitaient fortement les choix possibles ; la situation géographique de l'ouvrage à réaliser imposait parfois l'utilisation des matériaux de qualité médiocre issus de carrières proches. Parfois la bonne alternative était d'élaborer localement des matériaux artificiels, tels que la brique.

> Les principales causes de l'altération des pierres naturelles sont :

- la gélivité : pour les roches très perméables, le changement de l'eau en glace provoque une augmentation de volume de 9%, occasionnant des ruptures lorsque la teneur en eau atteint un seuil critique ne permettant à la glace de se développer dans les pores du matériau ;
- la sensibilité au plan de litage surtout en cas de pose en délit (perpendiculaire au plan de carrière, qui est la surface de séparation naturelle, parallèle à la direction des lits de sédimentation) ;
- les inclusions qui affaiblissent la pierre (par exemple les éléments marneux pour les calcaires) ;
- l'absence de stockage à l'abri des pierres avant leur emploi pour permettre une diminution de leur teneur en eau ;
- la présence de stylolites[3], microfissures, ou fissures dans la pierre peuvent accélérer grandement l'altération…

Photo n° 25: utilisation de pierres calcaires sensibles au gel *(crédit photo LRPC)*

[3] Définition : surfaces irrégulières résultant de la dissolution de la roche où ils se développent à la suite de fortes pressions (cf. site www.stylolite.free.fr). Ce phénomène concerne surtout les roches sédimentaires (calcaires et grès).

Dans les deux paragraphes ci-après du présent guide, ne sont développées que les deux causes les plus fréquentes d'altération des pierres ainsi que leurs mécanismes d'action. Il est rappelé qu'il est possible de découvrir toutes les formes d'altération de la pierre dans un **glossaire illustré** disponible sur le site :

http://www.international.icomos.org/publications/monuments_and_sites/15/pdf/Monuments_and_Sites_15_ISCS_Glossary_Stone.pdf

4.3.3.2 La maladie de la pierre calcaire - Effets des pluies acides - Désordres physico chimiques

4.3.3.2.1 Constatations

Les gaz et fumées provenant des usines, des véhicules automobiles ou chauffages urbains combinées aux eaux zénithales occasionne la **formation d'acides** qui attaquent les roches calcaires et les liants.

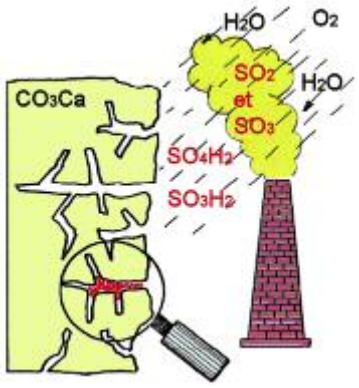


Figure n° 9 : comment se forment les pluies acides

Les pluies acides vont pénétrer par capillarité dans le support. Puis, par évaporation, le sulfate de calcium ou gypse (SO4Ca, 2H2O) va se déposer sur les façades.

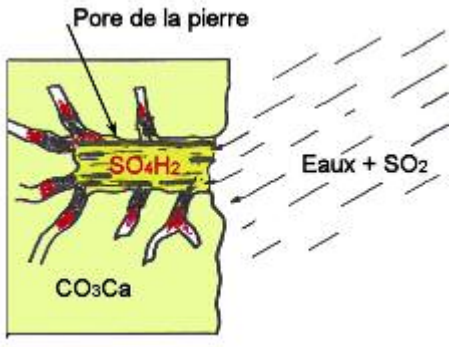


Figure n°10 : conséquences sur la pierre

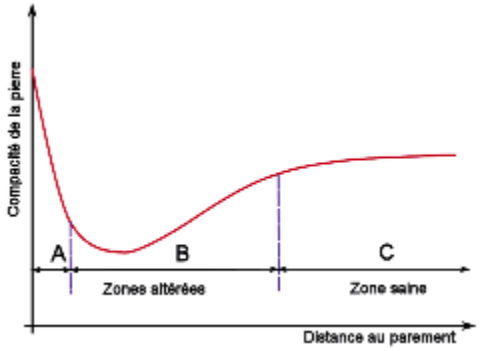


Figure n° 11 : graphique donnant l'évolution de la masse volumique

Le graphique ci-devant montre l'évolution de la masse volumique (compacité) en fonction de la distance du parement pour une pierre tendre en milieu urbain après quelques dizaines d'années.

- **la zone A** représentant l'épiderme de la pierre (quelques millimètres en général) : nous sommes en présence d'une croûte dure de sulfocarbonate possédant les caractéristiques suivantes :
  - forte compacité (porosité faible),
  - faible perméabilité (aux liquides et aux gaz),
  - module d'élasticité élevé ;
- dans la zone B, pouvant représenter une dizaine de centimètres d'épaisseur, la pierre est très appauvrie en carbonate de calcium (déminéralisation) et possède une porosité élevée et une capillarité généralement élevée ;
- à l'interface des zones A et B, la pierre est souvent réduite à l'état de poudre. Il arrive parfois que la pierre se soit vidée et que l'on trouve des cavités importantes dans cette zone ;
- l'interface A et B constitue, selon le degré d'altération de la pierre, une barrière capillaire empêchant la migration de certains produits consolidant vers le cœur du matériau ;
- dans la zone C, on retrouve une pierre possédant des caractéristiques proches de celles de la pierre à son état origine.

Photo n° 26 : maladie d'une pierre calcaire *(crédit photo D. Poineau)*

Photo n° 27: desquamation de pierres calcaires de l'église de Villejuif *(crédit photo D. Poineau)*

4.3.3.2.2 Investigations

> Des analyses des différentes couches permettent de connaître la composition chimique de la croûte noire qui est différente du reste de la pierre. L'épaisseur des concrétions peut atteindre 1 cm, voire plus sur certains sites :

- ce noircissement est constitué en grande partie de sulfate de calcium hydraté ou gypse ($CaSO_4$, $2H_2O$), cimentant les autres poussières, telles que les cendres volantes et les suies ;
- les croûtes se forment dans les zones abritées des pluies battantes ou ruisselantes ;
- les cendres volantes vont contenir, entre autres, des particules métalliques (fer, nickel, vanadium, cobalt…) qui vont favoriser l'oxydation du dioxyde de soufre (SO_2) en SO_3 et ensuite en acide sulfurique (H_2SO_4) ;
- les micro-suies sont émises par la combustion du fuel de chauffage, des moteurs diesel et du bois.

La composition chimique de la croûte reflète l'histoire de la pollution environnementale de l'ouvrage d'art ou du monument. En général, celle-ci est composée de strates (sédimentation de sulfate de calcium, de cendres volantes et de suie).

4.3.3.3 La décohésion granulaire des marbres

4.3.3.3.1 Documents de référence

- **A. Bouineau et R. Perrier :** Faudra-t-il renoncer aux façades en marbre agrafé ? (Les Cahiers Techniques du Bâtiment n°167 de décembre 1995) ;
- **A. Bouineau et R. Perrier :** la décohésion granulaire, maladie des revêtements de façade en marbre (Éditions Mines et Carrières).

4.3.3.3.2 Constatations

Les problèmes récemment rencontrés à la Grande Arche de la Défense avec des bombements et diminution de la résistance à la flexion des dalles de marbre minces fixées au support béton ont conduit à rechercher, dans le phénomène de décohésion granulaire des marbres, les causes de ces désordres.

Toutes les roches se dilatent, avec des coefficients de dilatation thermique compris généralement entre 2 et 13.10^{-6}/°C.

La décohésion granulaire apparaît comme une conséquence de la dilatation thermique, mais elle produit une déformation irréversible, alors que la dilatation simple est réversible, et une chute des caractéristiques mécaniques de la roche. Elle s'explique par **l'anomalie de dilatation de la calcite.**

La plupart des minéraux, sauf ceux appartenant au système cubique, présentent une dilatation inégale selon les directions : leur dilatation est caractérisée par trois coefficients différents, orientés selon les axes de symétrie des cristaux, ils sont anisotropes.

> La calcite, composant principal des marbres et des calcaires, est également anisotrope, mais, de plus, sa dilatation est négative selon certaines directions cristallographiques :

- suivant l'axe de symétrie d'ordre 3 (ou axe c), le coefficient de dilatation est très élevé (20 à 24.10^{-6}/°C), du même ordre de grandeur que celui de métaux très dilatables comme l'aluminium et le magnésium,
- dans les directions perpendiculaires à c, le coefficient est négatif (-4 à -7.10^{-6}), c'est-à-dire que le cristal se rétracte quand on le chauffe ;
- il y a apparition de contraintes de tension, avec ouverture des joints, dans des cristaux de calcite d'orientation différente.

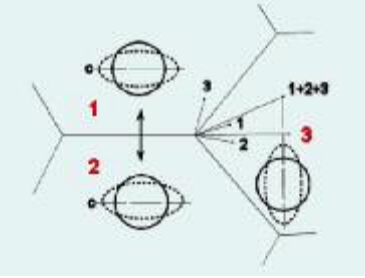


Figure n° 12 : disposition des grains dans une coupe d'un marbre calcaire

Pour comprendre la formation de micro-fractures par dilatation anisotrope, il faut considérer la coupe de la figure ci-dessus dans un marbre calcaire dont les grains sont séparés par des limites planes, formant un réseau hexagonal. Si tous les grains ont des axes cristallins parallèles, il y a dilatation globale dans un sens et contraction dans l'autre, mais pas d'ouverture entre grains. Par contre, si deux grains parallèles 1 et 2 sont en contact avec un grain perpendiculaire 3, les grains 1 et 2 s'écartent, car le grain transverse 3 empêche la contraction. La largeur de cette ouverture peut se calculer : pour une température s'élevant de 20 à 60°C, elle est de 0.9 µm pour des grains de 1 mm, de 0,18 µm pour des grains de 0,2 mm. Les ouvertures devraient donc être plus importantes pour les marbres à gros grains. Le calcul de la contrainte d'extension indique environ 23 MPa, valeur supérieure à la résistance à la traction de la plupart des marbres.

4.3.3.3.3 Conclusions

> Pour éviter la décohésion granulaire des marbres, il faut pour le choix des pierres et les conditions de leur mise en œuvre appliquer les deux normes suivantes :

- la norme de mise en œuvre est la norme **NF P 65-202-1 (DTU 55.2 :** Travaux de bâtiment - Revêtements muraux attachés en pierre mince) ;
- la norme de spécifications des pierres naturelles est la norme homologuée **NF B 10-601** : Produits de carrières - Pierres naturelles - Prescriptions générales d'emploi des pierres naturelles.

4.3.3.4 Investigations à effectuer sur les pierres naturelles d'un ouvrage existant

Les investigations sont à adapter en fonction des constatations effectuées in situ sur l'état des pierres et de leur mortier de pose de façon à pouvoir connaître les causes des désordres mais, également, leurs caractéristiques géométriques et mécaniques et autres propriétés.

> Outre les investigations citées ci-devant dans le cas d'altérations spécifiques, il faut citer les investigations courantes suivantes :

- le relevé des dimensions ;
- la mesure de la masse volumique ;
- la nature de la pierre (calcaire, granit, grès…) par un examen pétrographique ;
- la mesure de la résistance à la compression ;
- la mesure de la capillarité ;
- la mesure de la résistance aux cycles de gel-dégel ;
- la détection d'activités biologiques (bactéries et champignons) pouvant provoquer des attaques nitriques et sulfuriques ;
- l'analyse de la composition du mortier…

Photo n° 28 : carottes prélevées dans les pierres calcaires du pont de Villeneuve-Loubet *(crédit photo P. Vion)*

4.3.4 ALTÉRATIONS DES BRIQUES

4.3.4.1 Causes des altérations des briques

Il y a lieu de rappeler les exigences du DTU 20.1 sur l'imperméabilité à l'eau de pluie tout en permettant le passage de la vapeur d'eau, qui se traduisent par des dispositions particulières à adopter lors de la conception et de la réalisation d'un mur en maçonnerie (pierres ou briques). Le non respect de ces exigences conduit à certaines pathologies. Se reporter aussi, dans la suite du guide, aux exigences de la norme **NF EN 771-1** relative aux briques en terre cuite.

> Parmi les causes d'altération des briques dans les domaines du bâtiment et du génie civil, il est possible de citer :

- des défauts de cuisson (alvéolisation, fendillement…) ;
- une perméabilité excessive (brique non protégée par un enduit, brique soumise au rejaillissement, joints verticaux entre briques non remplis…) ;
- des fissures et fentes (mauvaise répartition des contraintes de compression causée par un mortier d'épaisseur non constante) ;
- une incompatibilité entre la brique et le mortier (apparition d'efflorescences, désorganisation de la brique due à des gonflements) ;
- l'emploi en parement de briques devant être revêtues (type LD) à la place de briques de type HD ;
- l'emploi de briques à forte teneur en sels alors que celles–ci sont soumises à des venues d'eau (apparition d'efflorescences)[4] ;
- la réalisation de joints avec un mortier trop riche en ciment, donc trop rigide et inadapté au module du matériau brique ;
- le gel (brique de mauvaise qualité, briques non utilisable en parement sans enduit…) ;
- les remontées d'humidité et de sels (absence d'enduit sur des briques enterrées et/ou de coupure capillaire…) ;
- l'absence ou le mauvais état de la chape d'étanchéité ;
- la suppression d'un enduit de protection pour rendre des briques apparentes alors que celles-ci sont inadaptées pour cet emploi ;
- une méthode de nettoyage agressive (par exemple le sablage, qui provoque la destruction de la couche protectrice issue de la cuisson)…

[4] Les briques pressées anciennes ont une forte porosité ; au contact de l'eau, les sels qui se forment cristallisent à l'intérieur des pores, ce qui limite les efflorescences. Au contraire, les briques filées actuelles ont une faible porosité ; aussi, lorsque des sels se forment, ils ont tendance à cristalliser sur leur surface et former des efflorescences.

Photo n° 29 : altération de briques de parement *(crédit photo D. Poineau)*

4.3.4.2 Investigations à effectuer sur les briques d'un ouvrage existant

> Les investigations sont à adapter en fonction des constatations effectuées in situ sur l'état des briques et de leur mortier de pose, de façon à pouvoir connaître les causes des désordres mais, également, leurs caractéristiques géométriques et mécaniques et autres propriétés. Parmi ces investigations, il est possible de citer :

- le relevé des dimensions ;
- la mesure de la résistance à la compression ;
- la mesure de la teneur en sels solubles ;
- la mesure de la résistance aux cycles de gel-dégel ;
- la détection d'activités biologiques (bactéries et champignons) pouvant provoquer des attaques nitriques et sulfuriques ;
- l'analyse de la composition du mortier ;
- la recherche d'un risque de voir se développer des efflorescences…

NOTA : *le seul traitement efficace des efflorescences consiste en* ***un brossage à sec des parements touchés.*** *Un tel traitement est à renouveler car le phénomène peut se réactiver si le parement est soumis à des venues d'eau (pluie…).*

4.3.5 ALTÉRATION DES MORTIERS

4.3.5.1 Causes des altérations des mortiers

> Parmi les causes d'altération des mortiers de hourdage et des joints dans les domaines du bâtiment et du génie civil, il est possible de citer :

- la mauvaise composition (présence de terre, de plâtre dans le mélange lors de la réalisation) ;
- l'érosion (maçonnerie au contact de l'eau courante) ;
- la dissolution des composants du mortier (dissolution de la chaux ou du carbonate de chaux par les eaux pures et acides) ;
- l'absence ou le mauvais état de la chape d'étanchéité
- le gel (composition inadaptée) ;
- les réactions alcali-granulats ;
- la présence d'eaux chargées en chlorures et/ou sulfates ;
- un défaut d'adhérence aux pierres et briques (mauvaise mise en œuvre [mortier desséché, mortier rebattu, maçonnerie mal humidifiée, absence de protection…] ou désorganisation de la pierre ou de la brique) ;
- une perméabilité excessive (mauvaise composition et/ou mauvaise mise en œuvre)…

4.3.5.2 Investigations à effectuer sur les mortiers d'un ouvrage existant

> Les investigations sont à adapter en fonction des constatations effectuées in situ sur l'état de la maçonnerie (pierres et briques) et de leur mortier de pose, de façon à pouvoir connaître les causes des désordres mais, également, leurs caractéristiques mécaniques et autres propriétés. Parmi ces investigations, il est possible de citer :

- l'analyse minéralogique (composition) ;
- l'évaluation du vieillissement des propriétés du mortier (incidences des réactions destructives ou gonflantes entre la portlandite [$Ca(OH)_2$] et les anions des acides [CO_2^{--}, SO_4^{--}, Cl^{--}, NO_3^{-}…]) ;
- la détection d'activités biologiques (bactéries et champignons) pouvant provoquer des attaques nitriques et sulfuriques ;
- la mesure de la résistance à la compression ;
- les mesures de résistance à la cohésion de la maçonnerie par l'essai d'ancrage ;

- la perméabilité de la maçonnerie (pierre, brique ou joint)
- l'adhérence sur la pierre ou la brique…

NOTA : *les désordres pouvant affecter les enduits, les investigations à effectuer en sus de la détection des décollements au marteau sont voisines de celles effectuées sur les mortiers.*

4.3.6 MISE EN CONTACT DE MATÉRIAUX INCOMPATIBLES

4.3.6.1 Introduction

Outre les altérations naturelles traitées ci-devant, il peut y avoir des incompatibilités entre les matériaux constituant la maçonnerie qui ont pour origines divers phénomènes chimiques, physiques ou physico-chimiques.

Les pierres peuvent contenir des inclusions comme des sulfures (pyrites) qui vont provoquer des taches au caractère inesthétique. Le tanin que contient le chêne ou le châtaigner lorsque ces essences sont utilisées pour fabriquer des cales destinées à bloquer des pierres en attendant le durcissement du mortier de pose provoque des taches indélébiles sur les parements.

L'utilisation de mortiers contenant (ciments ou granulats) des sulfates, des sulfures, des chlorures et des nitrates peuvent provoquer l'apparition d'efflorescences jusqu'à la destruction de la pierre ou de la brique.

La mise en place de pierres ayant un faible coefficient de dilatation au milieu d'une maçonnerie de pierres ayant un coefficient de dilatation plus important, peut provoquer l'apparition de fissures et fractures dans les pierres au plus faible coefficient de dilatation…

En l'absence de dispositions particulières (scellement au plomb, utilisation d'acier inoxydable…), la pierre ou la brique n'assurant pas la protection des éléments en acier scellés dans la maçonnerie, la rouille qui se forme et s'expanse va provoquer la fissuration puis l'éclatement de la pierre ou de la brique.

La fixation, sans précaution, sur une maçonnerie de pierres ou de briques d'éléments en aluminium, zinc, cuivre…, qui ont un coefficient de dilatation beaucoup plus élevé que celui de la pierre ou de la brique, peut provoquer des désordres dans la maçonnerie.

4.3.6.2 Comment éviter les incompatibilités avec les mortiers

Il est vrai que la meilleure solution pour rejointoyer le matériau d'un ouvrage maçonné existant serait, comme c'était le cas par le passé, d'utiliser des broyats de pierre liés avec un liant très faiblement hydraulique afin d'assurer une compatibilité parfaite entre les deux matériaux.

Malheureusement, cela n'est, aujourd'hui, que rarement possible pour des raisons de temps d'intervention limité, de conditions de travail difficiles et des contraintes de saisonnalité (en hiver par temps de gel et en été par grosses chaleur, **il ne faut pas utiliser la chaux aérienne ou grasse** qui, en outre, durcit lentement et uniquement à l'air par carbonatation au contact du gaz carbonique).

> Il est cependant possible de monter les pierres avec les matériaux modernes sous réserve de respecter quelques règles simples pour éviter des désordres :

- un indice d'hydraulicité correct pour pouvoir travailler en toute saison (IH compris entre 0,15 et 0,30) ;
- un taux de sels solubles dans le liant du mortier le plus faible possible (un taux inférieur à 0,25 % en Na2O et K2O) pour éviter des efflorescences… ;
- une perméabilité à la vapeur d'eau (résistance à la diffusion vapeur d'eau «μ» au environ de 12) afin d'éviter les blocages de transfert hydrique qui amèneraient inéluctablement à des décollements de mortier ;
- une porosité correcte pour respecter là aussi les transferts hydriques et éviter les dégradations dues au gel/dégel notamment ;
- un module d'élasticité faible afin d'assurer une compatibilité de résistance et déformation entre la pierre et le mortier.

Ces différents items sont développés dans les paragraphes suivants.

4.3.6.3 Indice d'hydraulicité

Louis Vicat, en 1817, avait classé les chaux par un indice appelé Indice d'Hydraulicité (IH). Cet indice est le rapport des éléments acides du liant (amenés par l'argile et l'alumine) et des éléments basiques du liant (amenés par la chaux).

$$IH = (SiO_2 + Fe_2O_3 + Al_2O_3) / (CaO + MgO)$$

Selon l'échelle de Louis Vicat :

IH	Appellation des chaux	Teneur en argile en %
IH ~ 0	Chaux grasse	0 à 5 environ
IH < 0,15	Chaux faiblement hydraulique	5 à 8 environ
0,15≤ IH < 0,30	Chaux moyennement hydraulique	8 à 15 environ
0,30 ≤ IH < 0,45	Chaux hydraulique	15 à 20 environ
0,45 ≤ IH < 0,50	Chaux éminemment hydraulique	20 à 22 environ
IH > 50	Chaux limite	22 à 27 environ

Tableau n° 1 : appellations des différentes chaux

Plus cet indice est faible, plus on respectera l'intégrité entre la pierre à jointoyer et le mortier. Par contre, les contraintes d'un chantier ne permettent pas toujours d'aller vers des produits ne contenant que de la chaux grasse qui ne durcit qu'à l'air et lentement.

C'est pour cette raison qu'il faudra plutôt aller vers des liants dont **«l'IH»** est proche d'une chaux moyennement hydraulique.

4.3.6.4 Pourcentage de sels solubles

L'un des facteurs importants de dégradation des pierres calcaires montées au mortier contenant une forte proportion de ciment est la quantité de sels solubles apportée par ce ciment. En effet, on observe alors des traces blanchâtres souvent très inesthétiques.

L'importance d'un taux de sels solubles limité (taux < 0,25% en alcalins solubles de sodium et de potassium sous sa forme $Na2_O$ et $K2_O$ selon Tabasso et Sammuri)[5] a été démontré.

Des mélanges de chaux aérienne (CL) et de ciment portland (CEM I avec des caractéristiques PM/ES [prise mer et résistance aux eaux eau sulfatées]) garantissent des taux d'alcalins solubles faibles. Des mortiers à base de chaux hydraulique naturelle (NHL) choisie permettent d'obtenir des taux faibles (de l'ordre de 0,1%) tout en gardant des temps de durcissement compatibles avec des conditions chantiers.

Photo n° 30 : efflorescences très inesthétiques *(crédit photo D. Poineau)*

[5] *M. LAURENZI TABASSO and P. SAMMURI, 1984 : « Evaluation of mortars for use in conservation from standpoint of the release of soluble salts » (1984)*

4.3.6.5 Perméabilité à la vapeur d'eau des maçonneries

La perméabilité à la vapeur d'eau peut s'exprimer par un coefficient de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau appelé μ. Une valeur de μ = 1 signifie que le matériau est aussi perméable qu'un mètre d'air au repos.

La perméabilité à la vapeur d'eau d'un **mortier de jointoiement** doit être suffisamment élevée afin d'éviter le blocage de l'eau à l'intérieur de l'ouvrage maçonné dans le cas où il y a des transferts d'eau importants par les murs (par exemple : absence d'étanchéité en tête de mur provocant des infiltrations qui seront évacuées à travers le mur sous forme liquide mais aussi par évaporation sous forme vapeur). **Un matériau peu perméable** aura des valeurs de μ très élevées.

Le tableau suivant donne les valeurs du coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau de diverses maçonneries. Les pierres calcaires dites froides ainsi que les basaltes, granits, etc. sont très peu perméables, c'est le joint qui assure les transferts hydriques.

Matériaux	μ sec	μ humide
Air	1	/
Granit, Basalte, Porphyre, Marbre	Infini	Infini
Pierre Ferme (de 2160 à 2349 Kg/m³)	/	70 - 90
Pierre tendre (de 1650 à 1839 Kg/m³)	/	26 - 32
Pierre tendre (de 1110 à 1500 Kg/m³)	5 - 10	5 - 10
Maçonnerie de briques légères (de 700 à 1000 Kg/m³)	5 - 10	/
Maçonnerie de briques moyennes (1300 Kg/m³)	7,5	/
Maçonnerie de briques moyennes (1500 Kg/m³)	8	/
Maçonnerie de briques lourdes (de 1700 à 1900 Kg/m³)	9 - 14	/
Maçonnerie de briques lourdes (2100 Kg/m³)	31	/
Mortier de ciment fortement dosé	15 - 41	/
Mortier à la chaux	9 - 41	/

Tableau n° 2 : coefficients de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau

Pour le mortier de rejointoiement, il peut être admis qu'un coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau inférieur à 15 est suffisant pour permettre un bon transfert hydrique.

4.3.6.6 Porosité

> Dans les pierres, il existe plusieurs types de porosités :

- **Porosité occlue :** il s'agit d'espaces poreux totalement déconnectés du réseau poreux et non accessibles aux fluides mouillants (même au mercure sous pression). Dans les calcaires, la porosité occlue est quasiment négligeable. De plus, comme elle est totalement déconnectée du réseau poreux, son importance dans la dégradation de la roche est quasiment nulle. Ce type de porosité peut être considéré comme négligeable ;

- **Porosité libre et porosité piégée :** ici encore, il s'agit de la caractérisation d'une fraction de la porosité en fonction de son comportement vis-à-vis des fluides mouillants. La porosité libre se sature en fluide mouillant et celui-ci est totalement restitué lors de la désaturation du milieu. La porosité piégée a un comportement différent car, soit elle ne se sature pas en fluide lors de l'imbibition du milieu, soit elle ne restitue pas les fluides lors du drainage. Les pores ayant une porosité piégée sont classiquement des pores à trois dimensions dont les tailles d'accès sont réduites par rapport à la dimension totale du pore, ou des milieux où les circulations de fluides mouillant sont difficiles ;

- **Porosité interconnectée ou non connectée :** les macropores peuvent, soit être connectés entre eux par de petits pores capillaires de forme globalement cylindrique (mauvais degré de connexion), soit se connecter directement les uns avec les autres (fort degré de connexion). Un fort pourcentage de porosité piégée peut indiquer que les pores sont mal connectés, mais il faut surtout relier le taux de connexion de la porosité au degré de perméabilité aux fluides.

- **Porosité initiale (dite aussi porosité primaire) et porosité acquise (dite aussi porosité secondaire) :** la porosité primaire est une porosité que le sédiment possédait lors de son dépôt ou de sa formation, par exemple entre les grains ou à l'intérieur des organismes creux. Par contre, la porosité secondaire s'est formée au cours de l'histoire du calcaire par des phases, soit de dissolution, soit de fracturation. L'histoire d'un calcaire montre très souvent une alternance entre des phases de diminution de la porosité (poronécrose par compaction, cimentation…) et des phases de création de porosité (porogenèse par dissolution, fissuration…). Ainsi, la porosité primaire peut être partiellement ou totalement obturée par des phases diagénétiques postérieures.

Pour les mortiers de rejointoiement, il faut considérer **la porosité libre et la porosité interconnectée,** car elles déterminent la faculté qu'aura le matériau à résister aux agressions diverses (gel/dégel notamment). Elle se mesure à l'aide d'un porosimètre à mercure et doit être de l'ordre de 30%.

4.3.6.7 Module d'élasticité

Le module d'élasticité d'une maçonnerie fait intervenir celui de la pierre ou de la brique et celui du mortier du joint en fonction de sa résistance et de son épaisseur. Avec le temps, les caractéristiques de la pierre peuvent évoluer (effet des intempéries) mais aussi celles du mortier à cause du vieillissement du matériau En conséquence le module d'élasticité de la maçonnerie évolue aussi.

L'annexe 2 (guide FABEM 6.4) donne quelques indications sur l'ordre de grandeur du module d'élasticité d'une maçonnerie qui peut varier entre 5 000 MPa et 25 000MPa.

La thèse citée dans cette annexe 2 indique la façon de procéder pour obtenir le module d'élasticité du matériau (pierre ou brique), celui du mortier et celui de la maçonnerie homogénéisée (pierre ou brique plus mortier) avec ou sans cycle de vieillissement. Les résultats des mesures figurent dans le tableau ci-après.

Maçonnerie de briques			
Module du mortier vieilli (MPa)	**Module de la brique (MPa)**	**Module du composite brique + mortier (MPA)**	**Observations**
7800	5500	6800	
Maçonnerie de pierres de taille			
Module du mortier vieilli (MPa)	**Module de la pierre calcaire (MPa)**	**Module du composite pierre de taille + mortier (MPA)**	**Observations**
7800	28100	28100	Le joint très mince ne modifie pas le module du composite
Maçonnerie de moellons taillés ou ordinaires			
Module du mortier vieilli (MPa)	**Module de la pierre calcaire (MPa)**	**Module du composite moellons taillés ou ordinaires + mortier (MPA)**	**Observations**
7800	28100	21700	

Tableau n° 3 : (extrait de la thèse de N. Domède)

4.3.6.8 Coefficient de dilatation

Le coefficient de dilatation des pierres varie d'une façon importante entre 1.10^{-6} à 16.10^{-6}. Celui des terres cuites est quasiment constant entre 5 et 7.10^{-6}.

> ***Rappel :*** *le coefficient de dilatation du béton vaut 10.10^{-6} et celui des aciers de construction vaut 12.10^{-6}.*

Coefficients de dilatation linéaire des pierres naturelles à la température ambiante (10^{-6}m / °C)	
Ardoises	6 à 14
Calcaires	2 à 6
Granites	6 à 9
Gneiss	3 à 8
Grès	7 à 11
Marbres calcaires	1 à 16
Marbres dolomitiques	7 à 9
Schistes	7 à 9
Tufs volcaniques	5 à 7
Coefficients de dilatation linéaire de la terre cuite à la température ambiante (10^{-6}m / °C)	
Briques	5 à 7

Tableau n° 4 : coefficients de dilatation des pierres naturelles et de la terre cuite

Le changement de température génère un changement de volume ; sa répétition sur des parties d'ouvrage exposées à de forts gradients peut diminuer la qualité mécanique des matériaux en provoquant un feuilletage. Sur les pierres tendres et de forte porosité, son principal effet est de provoquer la circulation de l'eau qui va s'évaporer en surface, entraînant des phénomènes de précipitations de sels dissous amenant un fort durcissement localisé en surface (calcin) et une altération de surface (desquamation).

Photo n° 31 : fissure due à l'absence d'un joint de fractionnement *(crédit photo D. Poineau)*

Dans les murs de grande longueur, en l'absence de joints de fractionnement ou de dilatation, il peut se produire des fissures quasi verticales qui se substituent aux joints inexistants.

Photo n° 32 : joint de fractionnement (photo D. Poineau)

Les voûtes porteuses subissent les effets des variations thermiques. Par exemple, elles s'abaissent en hiver avec apparition de fissures au-dessus des retombées, à ne pas confondre avec les effets d'un écartement des appuis. C'est la raison pour laquelle, il faut ménager des **joints de dilatation ou de fractionnement.** Ces joints sont recommandés à la fois par le **DTU 21.1** et par le **fascicule 64 du CCTG.**

Des indications sur le positionnement des joints sont données dans le **guide FABEM 6.2.**

Dans le cas où l'ouvrage comporte des voûtes transversales d'élégissement, une fissuration à la clé de la voûte d'élégissement placée au-dessus des retombées se produit en l'absence de dispositions destinées à permettre la dilatation. Cette fissuration nuit au fonctionnement de la voûte porteuse.

4.3.7 CHAPE D'ÉTANCHÉITÉ ABSENTE OU INEFFICACE

4.3.7.1 Constatations

La surveillance continue et/ou périodique permet de constater l'apparition de coulures, efflorescences, concrétions, stalactites par temps de gel… mais, aussi, la dégradation de la qualité des matériaux et notamment l'appauvrissement de la qualité du mortier des joints, les épaufrures et éclatement des pierres ou briques liés au gel…

REMARQUE *: l'élimination des concrétions de calcite est une opération longue et difficile à cause de l'adhérence du produit.*

Photo n° 33 : concrétions de calcite sous l'intrados d'une voûte *(crédit photo J. M. Michotey)*

4.3.7.2 Investigations

Connaître l'état exact d'une chape d'étanchéité nécessite l'ouverture de fenêtres qui permettent de constater la présence ou l'absence d'une chape d'étanchéité sur une voûte, à l'arrière d'un mur… Ces investigations sont souvent combinées à celles concernant les matériaux de remplissage et le drainage (consulter les **guides du SETRA** sur la protection contre l'action des eaux).

4.3.8 MAUVAISE QUALITÉ DES MATÉRIAUX DE REMPLISSAGE (REMBLAIS)

4.3.8.1 Constatations

Pour les mêmes raisons que celles évoquées dans le choix de la pierre, les remblais des ouvrages étaient extraits au plus près. Ils n'ont donc pas toujours les qualités requises pour une bonne transmission des efforts vers les éléments résistant que sont les voûtes, les piles et les culées.

Un mauvais matériau de remplissage peut se manifester par un orniérage de la chaussée, mais également par des désordres structurels dus à la mise en charge des tympans…

> Ces matériaux doivent avoir les qualités suivantes :

- avoir une cohésion suffisante afin de ne pas mettre en pression les tympans par fluage ;
- être perméables afin de drainer les infiltrations vers les différents captages ;
- être insensibles à l'eau :
  - ne pas contenir d'éléments solubles ou de petites tailles pouvant, par migration, créer des décompressions,
  - ne pas présenter de phénomènes de gonflement, ni de retrait ;
- être facile à mettre en place avec une faible intensité de compactage…

Ces défauts que peuvent présenter les matériaux de remblais et leurs conséquences concernent également les murs de soutènement.

4.3.8.2 Investigations

Des essais sur prélèvements des matériaux du remblai effectués à plusieurs endroits et à plusieurs niveaux permettent de connaître les caractéristiques de ceux-ci et de savoir s'ils sont adaptés à cet usage. Ces investigations sont souvent combinées à celles concernant le drainage et la chape d'étanchéité.

La 6ème partie du **guide FABEM 6.2** fixe les normes d'essai, les essais à effectuer, les caractéristiques que doivent présenter les **matériaux de remplissage** et les règles de leur mise en œuvre.

UNE EDITION DU SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES (STRRES) / FÉVRIER 2016

4.3.9 DRAINAGE INEXISTANT OU NON FONCTIONNEL

4.3.9.1 Constatations

Photo n° 34 : gargouille de l'aqueduc de la Vanne entre Arcueil et Cachan par temps de gel *(crédit photo D. Poineau)*

Un ouvrage en maçonnerie et plus particulièrement un pont, suivant la nature des éléments qui le composent (qualité géologique de la pierre ou degré de cuisson de la brique), se comporte comme une boîte qui peut se remplir d'eau et dont les parois sont plus ou moins étanches.

Cette eau, contenue dans les points bas de l'ouvrage, ressortira naturellement par les parois, par écoulement gravitaire ou par des exutoires naturels.

> Cette eau entraîne en premier des désordres esthétiques puis des désordres structurels :

- l'apparition de coulures, efflorescences, concrétions ;
- la dégradation de la qualité des matériaux et, notamment, l'appauvrissement de la qualité du mortier des joints. Ceci provoque le début d'une décompression des voûtes. De plus, si l'ouvrage est soumis au gel, celui-ci en accentue considérablement les désordres ;
- la mise en surpression hydraulique (poussée hydrostatique) d'une partie de la structure, à l'arrière des tympans ou d'un mur de soutènement, par exemple.

Photo n° 35 : désorganisation des briques du bandeau due à l'eau et au gel *(crédit photo J. M. Michotey)*

4.3.9.2 Investigations

Une simple inspection visuelle permet de constater que le drainage est inefficace : stagnation des eaux à la surface de la chaussée, non fonctionnement des gargouilles, ravinement des remblais, présence de coulures et concrétions… Bien entendu, il faut aussi s'assurer de la présence de l'efficacité de la **chape d'étanchéité** comme indiqué ci-devant. Ces investigations sont souvent combinées à celles concernant les matériaux de remplissage et la chape d'étanchéité.

En présence de désordres structurels (fissures à la jonction de la voûte et du bandeau, basculement d'un mur de soutènement), les investigations sont à adapter à l'importance des désordres constatés.

La 7ème partie du guide FABEM 6.2 fixe les bonnes dispositions constructives pour réaliser un drainage des eaux efficace.

4.3.10 MODIFICATION DES CONDITIONS D'UTILISATION DE L'OUVRAGE

4.3.10.1 Constatations

La plupart des ponts-routes en maçonnerie ont été construits pour permettre la circulation des piétons, cavaliers et véhicules attelés. De plus, la circulation près des tympans était empêchée par la présence de bornes, comme le montre la photo ci-après, ou de trottoirs.

Cependant comme le montre la photo n°37, des charges importantes pouvaient être transportées sur des fardiers attelés à de longues files de chevaux de trait.

Photo n° 36 : conception d'un pont ancien *(crédit photo J.L. Michotey)*

> Pour adapter les ponts- routes aux conditions de circulation actuelles, les protections ont été supprimées, les chaussées rechargées, les tabliers ont été élargis :

- suppression des trottoirs ;
- construction d'encorbellements en béton ou en métal ;
- réalisation de dalles en béton armé…

Ces élargissements ont été construits avec plus ou moins de bonheur. Les transferts de charges d'exploitation additionnées à l'augmentation des charges permanentes (poids de l'élargissement) modifient totalement le fonctionnement de l'ouvrage. Les tympans sont souvent surchargés, la voûte sollicitée anormalement. Il en est souvent résulté l'apparition de décollement entre les bandeaux et les voûtes, des déversements des tympans, des désordres dans les avant-becs…

Photo n° 37 : transports de charges lourdes par fardier attelé à des chevaux de trait - Rechargement de chaussée excessif et circulation à ras des tympans sur un pont de la RN 3 *(crédit photo chariotpierretaille_web.jpg, D. Poineau et J. M. Michotey)*

Photo n° 38 : fracturation et déversement d'un avant-bec chargé par un élargissement mal conçu *(crédit photo LRPC)*

De même, les ponts-rails ont été conçus pour permettre la circulation de trains aux essieux beaucoup plus légers que les essieux actuels et qui circulaient à des vitesses bien inférieures aux normes actuelles. Pour les ouvrages ferroviaires les vitesses sont passées de quelques dizaines de km/h à 220 et les charges à l'essieu de 5 à 22 tonnes.

D'où, actuellement, dans ces ponts, des sollicitations importantes aggravées par les effets dynamiques qui peuvent nécessiter des renforcements.

4.3.10.2 Investigations

La surveillance continue et/ou périodique permet de constater la présence des désordres. Ensuite, en fonction des désordres constatés, il faut effectuer les investigations adaptées pour en déterminer les causes (se reporter aux différents paragraphes ci-devant et ci-après).

4.3.11 ALTÉRATIONS ET DÉSORDRES DES FONDATIONS

En général, il faut considérer que les **fondations des ouvrages en maçonnerie situés en site aquatique** sont fragiles et sensibles aux agressions de l'environnement hydraulique.

4.3.11.1 Évolution de la conception et des techniques de réalisation des fondations

En France, quasiment jusqu'au milieu de XIXe siècle, presque tous les ponts en maçonnerie ont été construits pour franchir des cours d'eau. Au delà de cette période, qui marque le développement des chemins de fer (rappel : 1823-1827 réalisation de la première ligne entre Andrézieux et Saint-Étienne), les ponts en maçonnerie ont aussi été construits pour franchir ou pour rétablir des voiries existantes, pour surplomber des vallées sèches…

L'enseignement initial actuel du génie civil ne traite que très rarement des ouvrages en maçonnerie (ponts, ouvrages maritimes et fluviaux [murs de quai, digues…]) ; les ingénieurs ont donc, le plus souvent, une réelle méconnaissance de leur conception, des techniques de réalisation et, en particulier, de celles de leurs fondations en site aquatique.

En France, jusqu'à la fin du XVIIIe siècle, les fondations étaient réalisées, soit sur des pieux en bois battus, soit directement sur le sol mais à sec, car la chaux aérienne ne permettant pas de couler des massifs sous l'eau. Il est à noter cependant que «les constructeurs du XVe et XVIe siècle utilisaient la recette de Vitruve (mélange de chaux grasse et de pouzzolane sous forme de poudre de tuileaux)»[6] mais ils ne savaient pas maîtriser le durcissement de tels mélanges.

En 1818, parait le traité de Vicat sur la fabrication des chaux artificielles hydrauliques. Ce traité avait été rédigé après cinq années d'essais suite à la redécouverte de la chaux hydraulique lors de la construction du pont de Souillac.

La fabrication industrielle des chaux hydrauliques, puis celle du ciment à partir du milieu de XIXe siècle, celle de la fonte, du fer puddlé puis celle des aciers ont révolutionné la construction et, en particulier, la réalisation des fondations. L'évolution des matériaux s'est aussi accompagnée d'une évolution des moyens de réalisation avec la machine à vapeur, le caisson sans fond, le caisson havé, le caisson foncé à l'air comprimé…

De précieuses informations sur la conception et la réalisation des fondations anciennes peuvent être trouvées dans le **guide LCPC-SETRA :** fondations de ponts en site aquatique en état précaire (1981).

4.3.11.2 Quelques ouvrages de référence

> Documents sur la construction :

- **Chaix,** ponts en maçonnerie (1879),
- **Séjourné,** cours de construction – ponts en maçonnerie (ENPC),
- **Perronet,** construction des ponts au XVIIIe siècle ;

[6] *« Louis Vicat sa vie et ses travaux » par Maurice Merceron-Vicat paru en 1903*

> Documents récents :

- **Guide SETRA-LCPC :** fondations de ponts en site aquatique en état précaire - guide pour la surveillance et le confortement (1981),
- **Fascicule n°10 :** fondations en site aquatique (fascicule de la seconde partie de l'instruction technique sur la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art),

4.3.11.3 L'environnement hydraulique des ouvrages et les agressions qui en résultent

4.3.11.3.1 Généralités sur les interactions entre un ouvrage et un cours d'eau

Un ouvrage de franchissement d'un cours d'eau a une interaction sur celui-ci en induisant des pertes de charges, un exhaussement des niveaux des crues… Par voie de conséquence, le cours d'eau agresse le franchissement, par exemple en affouillant ses fondations… Les agressions sont amplifiées par les autres aménagements réalisés dans le lit du cours d'eau ainsi que par les transformations urbaines et agricoles sur son bassin versant car tous les aménagements modifient les conditions d'écoulement du cours d'eau.

Pour résumer : *toute action humaine provoquant une modification morphologique d'un cours d'eau aura des conséquences dommageables pour les ouvrages.*

La surveillance d'un ouvrage se doit d'intégrer tous les aménagements et toutes les transformations qui peuvent modifier le cours d'eau à l'amont comme à l'aval et provoquer des interactions dommageables à l'ouvrage. Il faut anticiper les problèmes et non les subir.

4.3.11.3.2 Actions naturelles de l'écoulement sur les fonds et matériaux du cours d'eau

> Affouillement généralisé du lit :

Au-delà d'une vitesse d'écoulement critique, une certaine épaisseur de sédiments meubles est mobilisée. Elle perd toute propriété mécanique et se trouve translatée vers l'aval. Cette profondeur d'affouillement est fonction de la granulométrie des sédiments, du débit du cours d'eau, de la hauteur d'eau… Plus le sédiment est fin, plus il est mobilisé sur de fortes épaisseurs. Celles-ci peuvent varier entre quelques dizaines de centimètres et plusieurs mètres. **L'affouillement généralisé par perte des propriétés mécaniques des sols peut provoquer la ruine** de toute fondation non protégée ou d'encastrement insuffisant. À la fin de la crue, le fond du lit retrouve quasiment sa position d'avant la crue.

> Actions mécaniques et chimiques sur les matériaux de l'ouvrage :

L'eau, dont l'action est aggravée par les sédiments en suspension, provoque l'abrasion des matériaux avec lesquels elle rentre en contact. Les éléments en bois sont très sensibles à cette abrasion, qui peut les détruire en quelques dizaines d'années. De même, certaines pierres et certains mortiers sont très sensibles à l'abrasion. De plus, l'eau dissout les chaux des mortiers mais aussi les pierres calcaires. Enfin, l'eau corrode les métaux et les transforme en oxydes pâteux sensibles aux abrasions.

NOTE : *l'eau peut aussi provoquer une altération plus ou moins rapide du substratum rocheux situé sous la couche des alluvions et une abrasion par charriage du sédiment.*

4.3.11.3.3 Actions du cours d'eau sur l'ouvrage

> Phénomène du ressaut :

La présence des piles et des culées d'un pont dans le lit du cours d'eau réduit le débouché, ce qui provoque un exhaussement du plan d'eau à l'amont appelé **remous.** En régime fluvial, il y abaissement du plan d'eau entre les piles alors, qu'en régime torrentiel, il y a élévation. L'exhaussement et l'abaissement du plan d'eau constituent le **ressaut.**

Le rétrécissement du lit qui provoque l'accélération du courant entraîne un **creusement du lit au droit des appuis.**

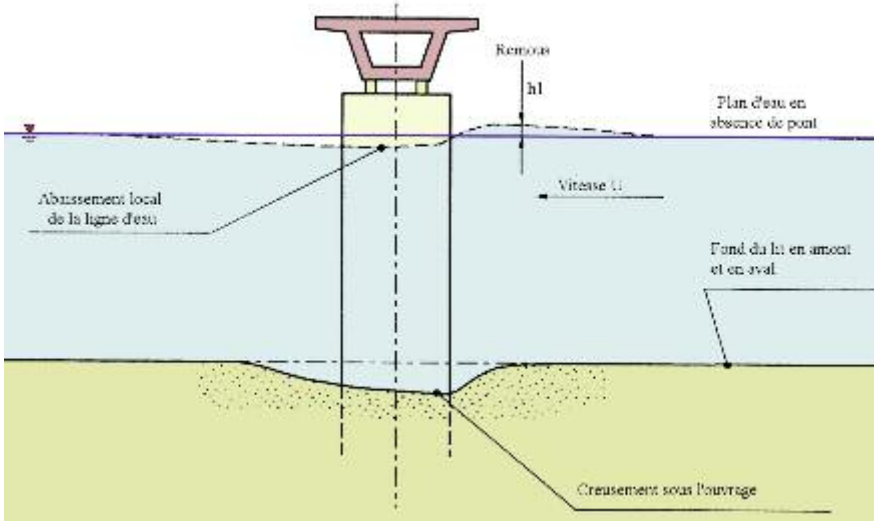


Figure n°13 : ressaut hydraulique au franchissement d'un ouvrage

> Affouillement local :

L'affouillement local se développe le long de la génératrice amont d'un appui non protégé. La profondeur maximale d'affouillement peut atteindre deux fois la largeur de la pile ou de son maître-couple. Les sédiments affouillés se redéposent à l'aval.

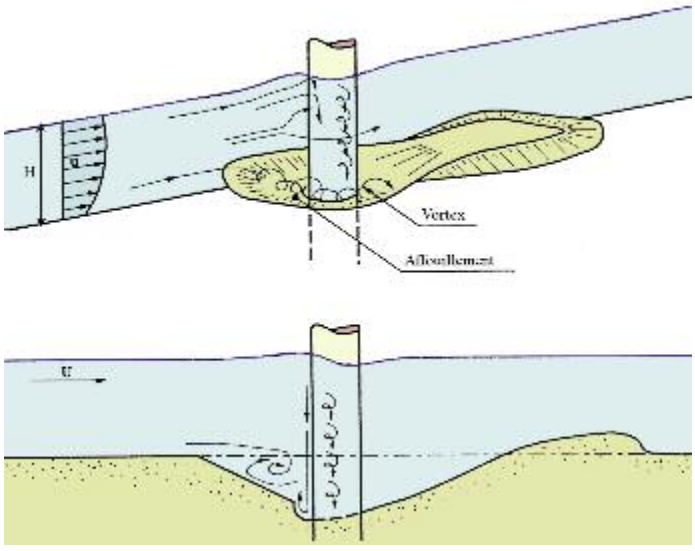


Figure n°14 : affouillement local à l'amont d'un appui

4.3.11.3.4 Conséquences sur les ouvrages des aménagements réalisés sur un cours d'eau

> Cas des dragages :

Les dragages des sédiments pour leur récupération en tant que matériaux de construction ou pour la réalisation d'un chenal de navigation modifient les conditions d'équilibre morphologique du cours d'eau par réduction des apports solides, augmentation locale de la section d'écoulement. Cela va entraîner une modification de la pente d'écoulement avec les conséquences suivantes :

- **si les berges ne sont pas protégées :** l'apparition de méandres, ce qui modifie l'angle d'attaque des courants sur les ouvrages et peut accélérer les affouillements,
- **si les berges sont protégées :** l'augmentation de la pente d'écoulement se fait à l'intérieur du lit même. Il y a creusement vers l'amont **(érosion régressive)** et également creusement vers l'aval par déficit de transport solide et **érosion progressive.** Les ouvrages (ponts, quais…) situés dans la zone des creusements peuvent être le siège de sérieux désordres. Par exemple, il est possible de citer l'effondrement partiel du pont Wilson à Tours en 1978 et l'effondrement total du pont sur la rivière Saint-Étienne à la Réunion en 2007.

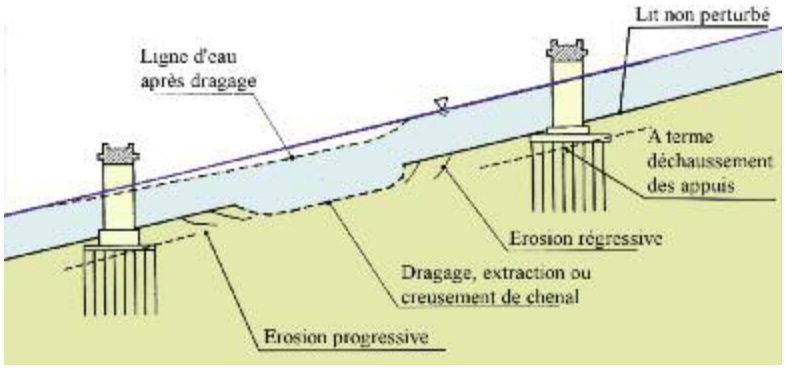


Figure n°15 : effets des dragages sur le cours d'eau

> Cas de l'aménagement des berges et des remblaiements :

- **une réduction de la largeur du lit d'un cours d'eau** par endiguement ou comblement de zones inondables provoque, par accélération du courant, une érosion du fond du lit pouvant entraîner le déchaussement des fondations et de leurs protections. À l'amont du rétrécissement, le niveau de l'eau subit un exhaussement,

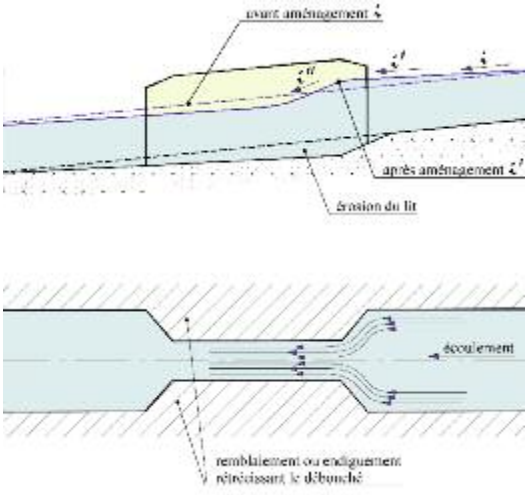


Figure n°16 : conséquences de la réduction de section d'un cours d'eau

- **une suppression des méandres** a pour effet d'augmenter la pente de l'écoulement dans la zone concernée. Il y a apparition d'une érosion régressive vers l'amont pouvant être préjudiciable aux fondations et à leurs protections et des atterrissements en aval nécessitant des dragages pour maintenir le tirant d'eau devant les ouvrages.

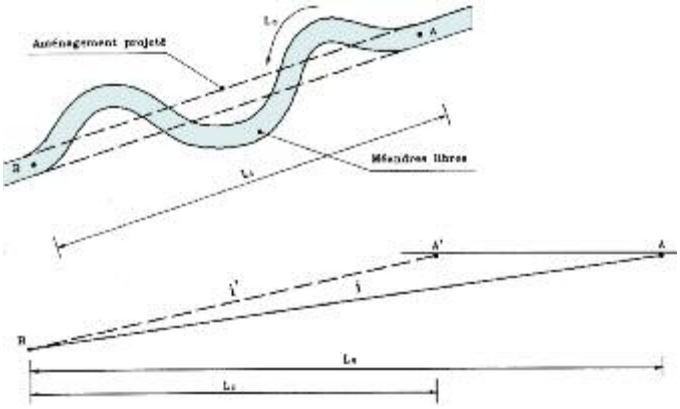


Figure n° 17 : conséquences de la suppression de méandres sur un cours d'eau

> Cas de la modification des protections des fondations pour compenser un abaissement du lit d'un cours d'eau pouvant entraîner un effet de seuil noyé :

L'abaissement, de parfois plusieurs mètres, du lit d'un cours d'eau dû à des aménagements (dragages d'amélioration du chenal de navigation,..) conduit au cours de travaux confortatifs à augmenter les dimensions des protections des fondations avec les conséquences suivantes :

- le rechargement en largeur et en hauteur des massifs d'enrochements autour de chaque appui fait que les protections peuvent se rejoindre et former un véritable barrage sous-marin,
- les nouvelles crèches de protection des fondations plus larges et hautes, en réduisant la largeur du débouché, provoquent des approfondissements du lit...

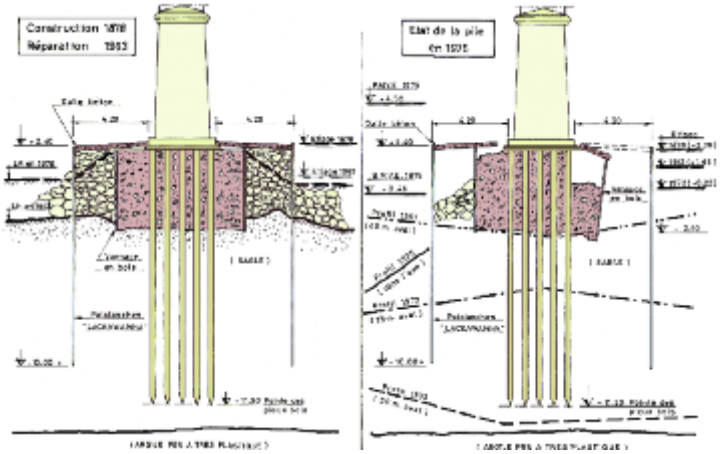


Figure n° 18 : conséquences de la réalisation, en 1963, de crèches sensées renforcer les fondations des piles du pont de Thouaré en Loire-Atlantique

En l'absence d'un radier aval assurant la protection des fonds sur une grande distance, se creusent des fosses profondes de plusieurs mètres, voire jusqu'à une vingtaine de mètres avec des talus à 1/1 très instables. Des ruptures de talus peuvent se produire, entraînant le déchaussement des fondations par l'aval et l'effondrement des ouvrages.

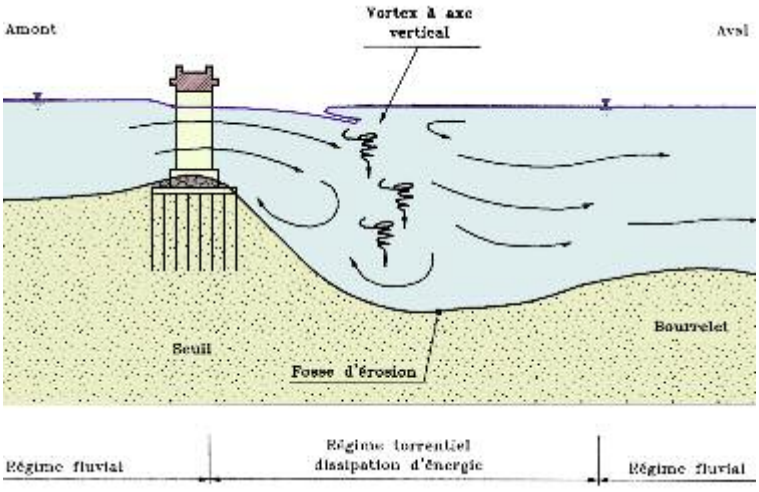


Figure n° 19 : effet de seuil dû aux protections trop larges autour des fondations

> Cas des seuils :

La création de seuils transversaux permet de maintenir la ligne d'eau amont ainsi que le niveau du lit mais, par le dépôt des sédiments charriés à l'amont, un seuil provoque aussi la remonté du lit. L'arrêt du transit de sédiments entraîne une érosion du lit dans la zone non alimentée pouvant provoquer le déchaussement des fondations des ouvrages situés à l'aval du seuil.

Pour éviter de tels phénomènes, une solution consiste à recréer artificiellement une alimentation de la rivière en sédiments à l'aval.

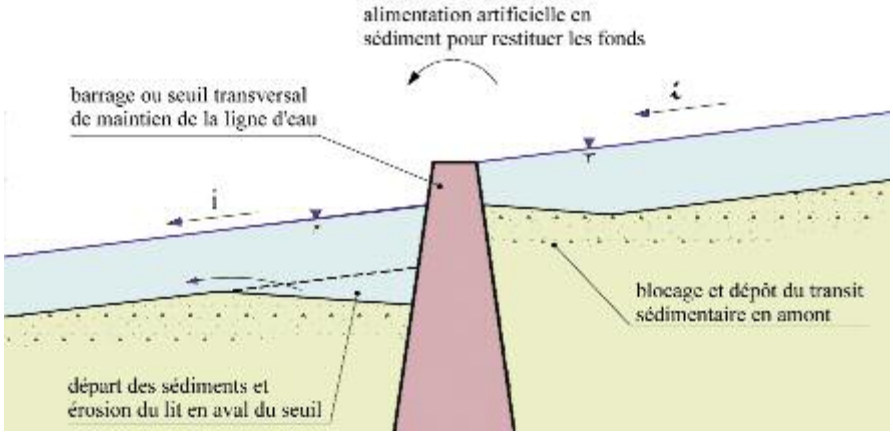


Figure n° 20 : conséquences des barrages sur le cours d'eau

4.3.11.3.5 Conséquences sur les ouvrages de l'érosion créée par le jet des hélices des bateaux

Ce phénomène date d'une trentaine d'années avec l'augmentation de la vitesse des écoulements des systèmes de propulsion des bateaux. Les quais implantés dans des sols alluvionnaires ont été les premiers touchés mais les fondations des ponts peuvent aussi en subir les conséquences. Un exemple célèbre est celui des effets des «vaporettos» sur les quais et les fondations des immeubles de Venise.

4.3.11.3.6 Conséquences des aménagements urbains et agricoles

L'urbanisation galopante augmente dans de fortes proportions les surfaces étanchées. Toutes les eaux qui y sont recueillies sont conduites rapidement vers les cours d'eau. De même, l'agriculture intensive, avec ses drainages efficaces, la suppression des haies, les sillons parallèles à la pente… favorise une rapide arrivée des eaux de pluie dans les cours d'eau.

Les relevés, **à pluviométrie égale,** montrent un accroissement de la **vitesse de montée des eaux en crue** et une augmentation des **débits de pointe** qui n'avaient jamais été mesurés jusqu'à nos jours. Les niveaux des crues décennales et centennales se trouvent modifiés.

> Ces phénomènes ont deux conséquences :

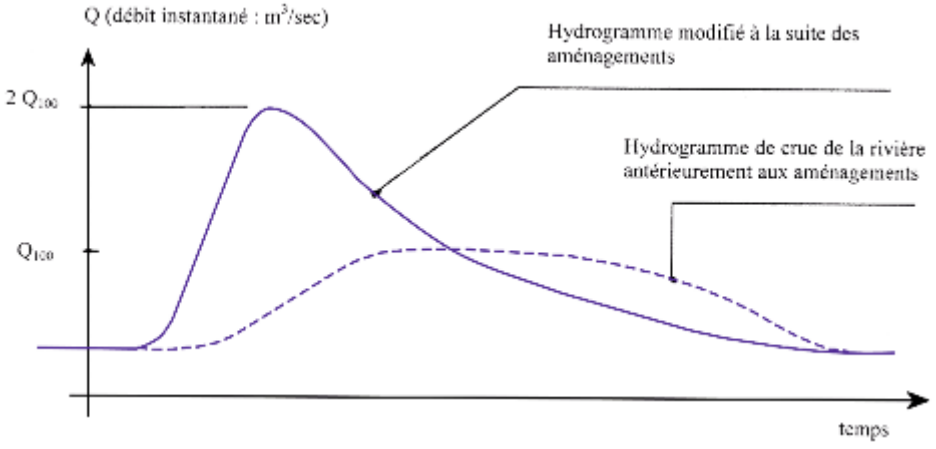


Figure n° 21 : schéma de modification des hydrogrammes de crue dû aux aménagements urbains et agricoles

■ sur les nappes phréatiques :

Les eaux s'écoulent trop rapidement, ce qui empêche la réalimentation des nappes. Après la période des crues, on peut observer des sécheresses sévères par défaut de la remontée des nappes ;

- sur les ouvrages :

  - la mise en charge des ouvrages non dimensionnés pour évacuer de tels débits,
  - des affouillements et la formation de cavités sous les fondations par abaissement du lit du cours d'eau,
  - une diminution de la stabilité des fondations par la réduction de leur encastrement dans le sol,
  - l'affouillement des radiers de protection des fondations,
  - l'érosion des berges au pied des culées, avec contournement de l'ouvrage par la crue provoquant la destruction des remblais d'accès,
  - dans certains cas, l'effondrement total ou partiel de certains ouvrages…

4.3.11.4 Autres causes de fragilisation des fondations

Les travaux de confortement mal conçus ou mal préparés et mal exécutés peuvent être aussi la cause d'une fragilisation des fondations de l'ouvrage, voire de son effondrement.

4.3.11.5 Désordres pouvant être constatés sur les parties visibles des ouvrages

Lorsque les fondations d'un ouvrage sont détériorées, un certain nombre de signes (fissures, fractures, déformations…) peuvent alerter le gestionnaire qui peut alors mettre en place des **MESURES DE SAUVEGARDE** et lancer **une campagne d'investigations.** Malheureusement, les désordres affectant les fondations n'ont pas toujours une répercussion sur les parties visibles : **l'ouvrage parait sain alors que des cavités importantes existent sous ses fondations.**

Des inspections subaquatiques périodiques sont donc indispensables en complément des autres actions de surveillance.

Les figures qui suivent donnent les **principaux signes avertisseurs de désordres affectant les fondations** et indiquent les **causes de ces désordres** (tassement des appuis symétriques ou non, écartement ou rapprochement des culées…) en fonction de la **position des fissures, des éclatements des pierres…** Cependant, un glissement ou un tassement peut s'accompagner de **basculements** qui modifient le positionnement des fissures, comme le montrent les différentes photos ci-après. De plus, la rigidité des murs tympans et des parapets intervient fortement dans le schéma de ruine dans les ponts étroits comme le montre une des photos ci-après.

Dans le cas, pris comme exemple, d'une **voûte surbaissée,** dès que les mouvements des fondations se font sentir, des fissures apparaissent comme le montrent les figures ci-après.

ATTENTION : *dans ces schémas statiques* ***l'ouvrage est encore stable*** *(par exemple, dans le cas de l'écartement ou du rapprochement des culées,* ***3 rotules*** *[appelées «* ***points de contact*** *» dans le programme voûte] se forment dans la voûte décomposant celle-ci en* ***2 grands voussoirs ou blocs,*** *ce qui créé une* ***sorte d'arc à 3 articulations****). La position des rotules dépend du type de voûte (plein-cintre, surbaissée, ogivale…) et des actions qui lui sont imposées, de la symétrie ou non des tassements, déplacements…*

Ensuite, *lorsque les mouvements des fondations s'accentuent, la* ***voûte s'adapte,*** *d'autres fissures ou fractures apparaissent. Cette adaptation s'achève à la formation d'un nombre suffisant d'articulations plastiques décomposant la voûte en blocs :* ***la voûte est alors très proche de sa ruine, qui se produit par la rotation des blocs les uns par rapport aux autres.***

Par exemple, *dans un problème symétrique, le «****schéma de rupture****» comporte 5 rotules et 4 blocs si une des rotules se trouve la clé de voûte et 6 rotules et 5 blocs dans le cas contraire.* ***L'annexe 2*** *(FABEM 6.4) donne un certain nombre de «****schémas de rupture finaux****» avec le nombre des rotules et des blocs.*

Les mouvements des appuis se traduisent par des fissures transversales (perpendiculaires à l'axe de la voie portée) qui apparaissent le plus souvent à la clé et aux reins. Si le tassement est dissymétrique, les fissures ont un tracé diagonal.

En cas de rapprochement des culées, des fissures s'ouvrent à l'intrados de la voûte au niveau des reins et à son extrados au niveau de la clé. Un exemple spectaculaire figure dans « les grandes voûtes de Séjourné ».

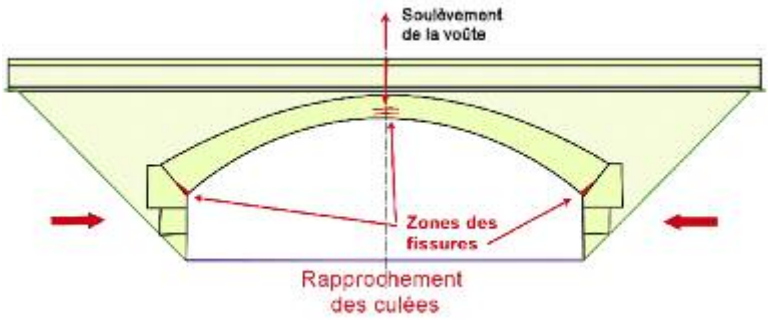


Figure n° 22 : désordres dus au rapprochement des culées causé par un glissement de terrain

En cas d'écartement des culées, c'est l'inverse : des fissures s'ouvrent à l'extrados de la voûte au niveau des reins et à son intrados au niveau de la clé.

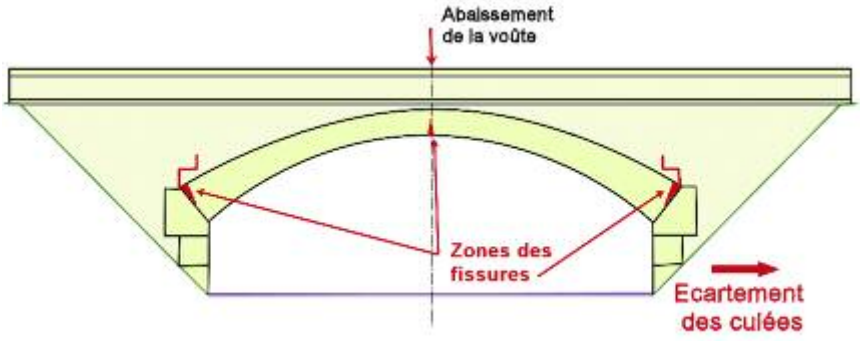


Figure n° 23 : désordres dus à un écartement des culées

Photo n° 39 : effondrement d'une maquette *(crédit photo D. Poineau)*

En cas de tassement d'une des culées, la fissuration est dissymétrique, comme le montre la figure ci-après.

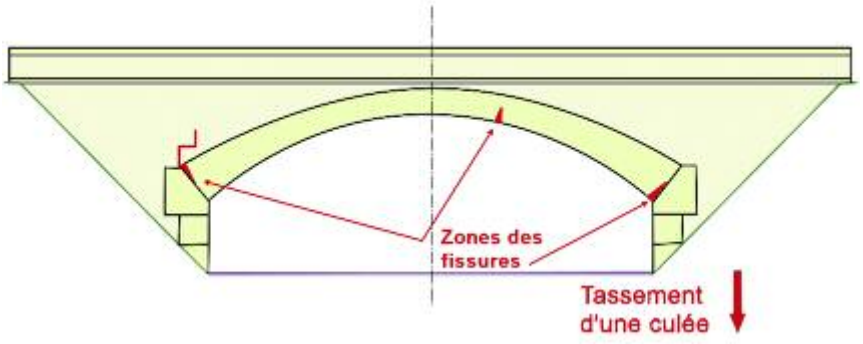


Figure n° 24 : désordres dus au tassement d'une culée

Dans le cas de la photo suivante, il s'est formé un arc de décharge entre l'ensemble parapet et plinthe et le mur en retour ce qui a empêché l'effondrement total de la voûte.

Photo n° 40 : rupture due à l'affouillement d'une culée *(crédit photo LRPC)*

En cas de tassement de la pile (ici un pont à deux travées symétriques), la fissuration est symétrique comme le montre la figure ci-après.

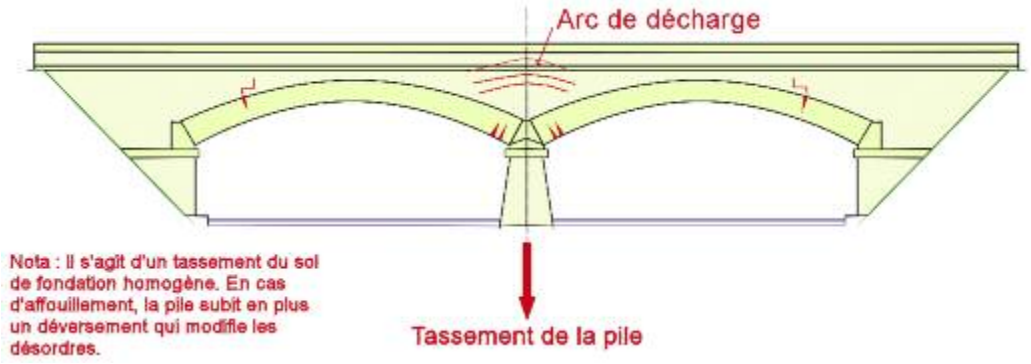


Figure n° 25 : désordres dus au tassement d'une pile

Photo n° 41 : tassement d'une pile dû à un affouillement *(crédit photo M. Virlogeux)*

La photo ci-après montre que les désordres dus au tassement d'une pile sont aussi affectés par le basculement de celle-ci (affouillement dissymétrique de la fondation).

Photo n° 42 : rupture due à un affouillement d'une pile *(Crédit photo Jean-Louis Michotey)*

Les images et photos ci-devant traitent essentiellement des ponts en maçonnerie, mais les **désordres peuvent aussi concerner des murs de soutènement, des piles en maçonnerie** supportant un tablier en métal ou béton, un tunnel…

Par exemple, il est possible de citer l'effondrement brutal de la totalité du pont de la rivière Saint-Étienne à la Réunion le 25 février 2007 lors du passage du cyclone Gamède à cause de l'affouillement de la fondation superficielle de la pile P 7 aval en maçonnerie. Le tablier routier de cet ouvrage, mis en service en 1993, reposait sur les piles d'un ancien tablier de chemin de fer terminé en 1882.

4.3.11.6 Principaux désordres sur les fondations dus à l'eau

Les agressions dues à l'eau qui s'écoule sous un ouvrage conduisent en général à un abaissement du fond du lit du cours d'eau par affouillement ou érosion au pourtour des fondations, une diminution de la portance des sols et une abrasion ou une dissolution des matériaux constitutifs de la fondation ou de ses protections.

4.3.11.6.1 Désordres dans les fondations superficielles sur massif

La redécouverte de la chaux hydraulique et sa fabrication industrielle ont permis de réaliser des bétons de chaux faisant prise sous l'eau. Cela évitait l'opération de mise à sec de la fouille ou la réalisation d'une fondation sur pieux en bois.

Ces massifs de fondation étaient réalisés dans des rideaux de vannage en bois de pieux et de palplanches formant un coffrage et généralement peu encastrés dans les alluvions ou reposant directement sur le fond rocheux.

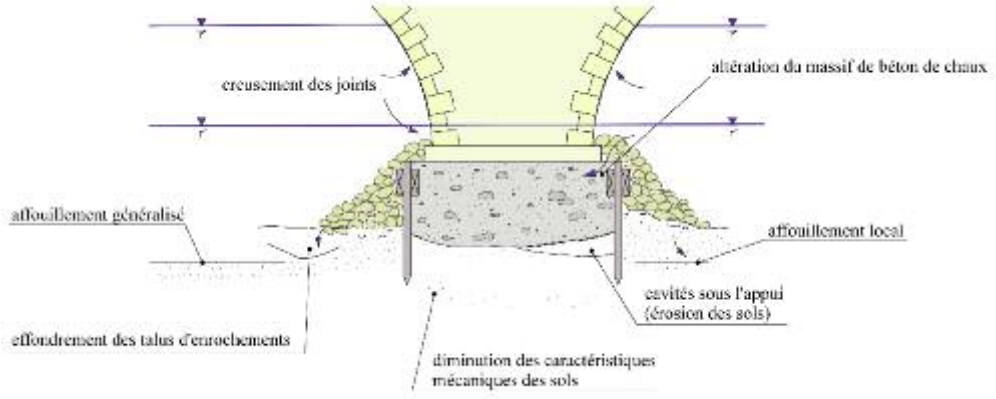


Figure n° 26 : dégradations type sur un massif de fondation superficielle

> Réduction de la force portante des fondations :

Tout abaissement du fond du lit entraîne une réduction de la force portante de la fondation de l'appui concerné par diminution de son encastrement.

> Disparition des enrochements :

La disparition des enrochements de protection est due à la formation de fosses à l'aval qui entraîne un raidissement des talus d'enrochement et des désordres par glissement des enrochements dans les fosses.

> Formations de cavités sous les massifs de fondation :

Les écoulements d'eau au travers des enrochements, les vortex dus aux turbulences des lignes d'eau perturbées par la présence de l'ouvrage entraînent des particules du sol et du massif de fondation. Ces écoulements se propagent à l'interface entre le sol et le massif en béton de chaux, où ils créent des cavités par arrachement des sédiments.

Les affouillements locaux, lorsqu'il y a disparition des enrochements, provoquent également des cavités dans les sols au pourtour de l'appui.

> Formations de cavités dans les massifs de fondation :

Les eaux, toujours renouvelées, au contact des massifs, se chargent de chaux. Ces dissolutions se produisent dans les zones soumises directement aux actions de l'eau et au niveau des horizons les moins compacts, comme les interfaces entre les différentes gâchées lors de la mise en œuvre du béton de chaux ou au niveau du sol de fondation. C'est dans ces zones que se développent les cavités.

> Réparations mal conduites :

Il y a plusieurs dizaines d'années, une réparation courante consistait à réaliser un voile en béton peu ou pas armé coffré et coulé autour du massif de fondation. Ces voiles réduisent la section d'écoulement et provoquent une érosion du lit et ce, d'autant que des massifs d'enrochements sont disposés à leur pourtour. L'eau, plus ou moins chargée en sédiments arrachés au fond du lit, circule le long du voile et entraîne les sols et les alluvions situés sous les bordures de celui-ci. Le voile se retrouve in fine littéralement suspendu et il surcharge la fondation sans empêcher l'eau de venir éroder les sols porteurs et créer des désordres au niveau de fondation.

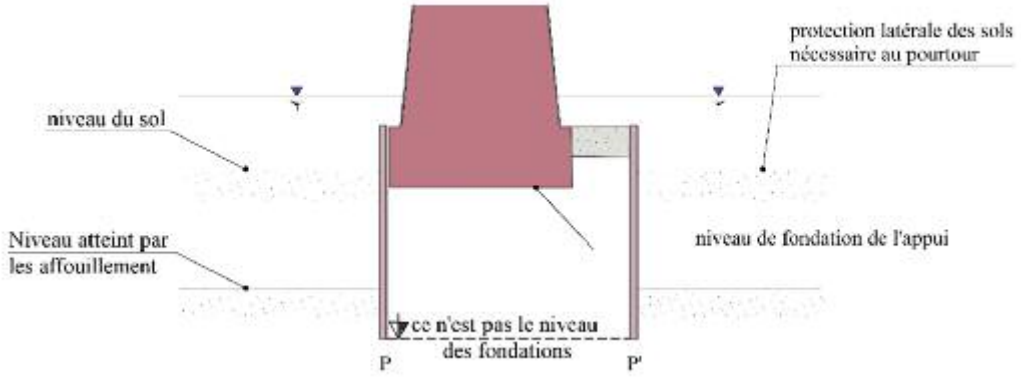


Figure n°27 : voile en béton au pourtour d'une fondation et érosion en sous-face

> Abrasions et érosions des matériaux :

Un cours d'eau charrie des sédiments qui, par frottement et chocs, participent à l'abrasion des pièces et éléments les plus tendres des parties immergées (massif de fondation, protections…).

Les matériaux les plus sensibles à l'abrasion sont les pièces en bois, comme le haut des palplanches, les moises des rideaux de vannage, les pièces du platelage et les têtes des pieux… tout particulièrement lorsqu'ils ne sont pas protégés par des enrochements. À titre indicatif, une pièce de bois, selon la nature du bois, comme un pieu de cintre ou de platelage émergeant du fond du lit, peut être totalement détruite au bout de 20 à 30 ans, voire de 50 à 90 ans.

Photo n°43 : dégradation par abrasion d'une pièce de bois de fondation *(crédit photo J. P. Levillain)*

Dans les cours d'eau, comme les torrents où le charriage est important, tous les matériaux (pierres, béton, mortier, métal…) sont soumis à une usure plus ou moins rapide et importante qui peut entraîner, à terme, la disparition totale des éléments soumis au courant.

4.3.11.6.2 Désordres dans les fondations « profondes » sur pieux bois

> Les pieux bois et leur durabilité :

Les pieux bois ont été utilisés par les hommes préhistoriques pour construire des cités lacustres. Les romains battaient des pilotis avec un art bien établi. Au moyen-âge, la technique des pilotis battus était utilisée pour établir des ponts, des quais, des édifices publics ou privés…. Dans le monde entier, les pieux en bois ont été utilisés jusqu'à leur remplacement, relativement récent, par des pieux métalliques ou en béton armé…

Un pieu en bois de 30 à 35 cm de diamètre peut reprendre des charges unitaires de 30 à 50 tonnes, voire de 60 à 80 tonnes. Ces éléments sont donc très résistants.

Les pieux en bois de fondation de nombreux ouvrages (quai, ponts, estacades…) sont souvent soumis à des immersions suivies d'une mise à l'air libre. **Faut-il craindre leur pourrissement ou d'autres agressions ?**

> Pour pourrir, un bois doit être soumis aux trois agressions combinées suivantes :

- un champignon,
- de l'air (oxygène),
- de l'humidité avec un certain taux.[7]

Les champignons sont présents naturellement dans les bois mais meurent au bout de quelques années si les conditions de leur développement ne sont pas requises.

L'air est présent lorsque une partie d'un élément en bois est hors d'eau ou faiblement encastrée dans le sol (encastrement inférieur à 1,50 m ou 2 m dans des sables et graviers et encastrement inférieur à 0,50 m ou 0,70 m dans les argiles).

Le taux d'humidité doit se situer entre 20 à 30% pour que le pourrissement se produise. Ce taux d'humidité se rencontre dans les milieux clos et humides, comme les caves, ou dans les parties supérieures des sols pulvérulents et humides, par remontées capillaires. **Dans ces conditions particulières que l'on rencontre en site terrestre,** le bois peut effectivement perdre toutes ses caractéristiques mécaniques et devenir spongieux.

Le bois situé dans des eaux de mer ou saumâtres peut être soumis aux **attaques d'animaux dits térébrants,** capables de creuser, percer le bois, voire la roche. Il s'agit des tarets (mollusque bivalves à corps très allongé) ou de petits crustacés amphipodes (chelura térébrants) ou isopodes (limnoria lignorum). Ces prédateurs se développent surtout dans les eaux chaudes et tempérées. Au contact, pendant de longues périodes, d'eaux froides, le bois se trouve protégé. Dans le cas contraire, des protections et des traitements sont nécessaires pour contrer toute attaque.

En règle générale, les pieux en bois toujours immergés ont un excellent comportement. Leurs caractéristiques se trouvent même améliorées par un phénomène de fossilisation dû aux sels dissous dans l'eau qui se déposent dans les pores du bois.

> Les conséquences de l'abaissement des fonds au pourtour d'une fondation :

L'abaissement des sols alluvionnaires au pourtour d'une fondation sur pieux dont le platelage a normalement été établi au-dessus du fond du lit à proximité de l'étiage, peut entraîner la disparition des sols situés entre les pieux, rendant ceux-ci libres sur une hauteur importante. En effet, la présence de souilles à proximité d'une fondation sur pieux bois provoque la **chute des enrochements de protection qui font partie de la fondation et sont indispensables à sa stabilité.** Les sols entre les pieux se trouvent alors directement soumis aux effets du courant qui entraîne les éléments fins au travers des blocs d'enrochement restants.

[7] Voir le guide technique : Ponts en bois - Comment assurer leur durabilité (SETRA 01/11/2006).

Une telle fondation, lorsque les pieux reposent sur un substratum rocheux, devient alors très sensible au **déversement latéral.** Ce phénomène a été à l'origine de l'effondrement du pont Wilson à Tours en 1978.

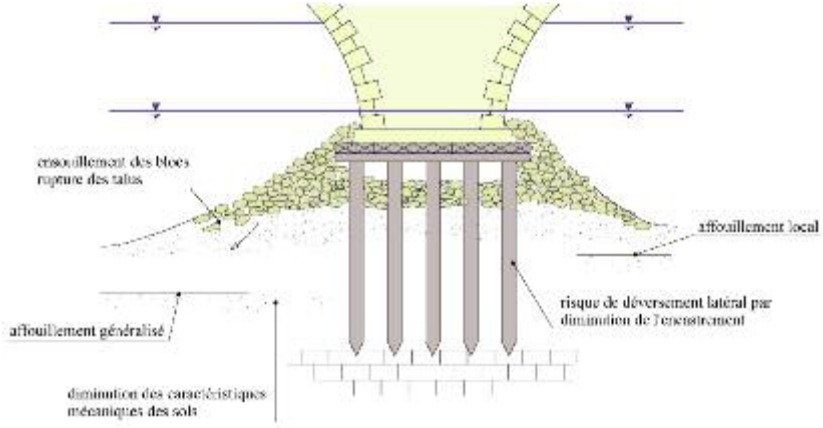


Figure n° 28 : désordres dans une fondation profonde

Cet exemple montre l'importance du frettage latéral des pieux, qui est indispensable à la stabilité des fondations sur pieux bois.

L'affouillement général ou local des alluvions provoque aussi une **réduction de la force portante des pieux** par diminution du frottement latéral.

> Les conséquences de la réalisation de crèches :

La réalisation de crèches au pourtour des fondations sur pieux, voire de fondations superficielles, occasionne des désordres dans les ouvrages par le fait que cette **«fausse protection»** réduit considérablement le débouché du cours d'eau. Pour retrouver son débouché, le cours d'eau va creuser son lit, tout particulièrement le long des encagements et en dessous de ceux-ci, entraînant les matériaux de comblement et le sol de fondation des appuis.

Photo n° 44 : pont de Thouaré sur la Loire : désordres dans une crèche *(crédit photo JP. Levillain)*

De tels désordres sont insidieux dans la mesure où ils sont masqués à la vue des gestionnaires, car ils se produisent derrière le rideau et sous la dalle de couverture de la crèche. L'ampleur des enlèvements de matériaux peut conduire à la ruine de l'appui concerné et de tout ou partie du tablier.

> Autres désordres affectant les fondations sur pieux bois :

Comme pour les fondations superficielles, les fondations sur pieux bois sont soumises au courant du cours d'eau qui charrie des sédiments et qui, par frottement et chocs, abrasent les pièces et éléments les plus tendres des parties immergées (massif de fondation, protections…). Sont particulièrement sensibles à cette abrasion les platelages et les pieux lorsqu'ils se trouvent au dessus du fond du lit du cours d'eau et non protégés par un massif d'enrochements ou un rideau.

4.3.11.7 Principaux désordres pouvant survenir à court terme sur les ouvrages et leurs fondations dus à des modifications sur l'ouvrage

Des modifications apportées à un ouvrage ancien ou à son environnement immédiat peuvent entraîner des désordres à court terme. Les murs de quai, voire de soutènement y sont particulièrement sensibles. En effet, l'aménagement d'un ouvrage existant n'est pas toujours optimisé, car les archives de ces structures anciennes sont, le plus souvent, inexistantes.

> Modification de la poussée hydrostatique derrière l'ouvrage :

Des travaux divers et, plus simplement, un fonctionnement défectueux des barbacanes et des dispositifs de drainage peuvent augmenter la poussée hydrostatique et donc mettre en jeu la stabilité de la structure.

> Augmentation de la poussée sur l'ouvrage due à un remblaiement défectueux :

Le matériau de remblaiement, comme celui d'une tranchée, doit être frottant et perméable, c'est-à-dire respectant les conditions de filtre.

> Modification des charges d'exploitation :

La circulation d'engins très lourds, comme des grues, juste derrière un quai, va augmenter la poussée sur l'ouvrage et peut mettre en jeu sa stabilité. Il est préférable de placer l'engin directement sur l'ouvrage ou bien à l'arrière, mais à une bonne distance de celui-ci.

Si l'ouvrage n'est pas fondé sur pieux, une étude du sol support permet d'évaluer les risques encourus avec une marge d'erreur raisonnable. Si l'ouvrage est fondé sur pieux, les moyens d'investigation actuels ne permettent pas d'évaluer l'état des pieux ni même leur position et leur nombre. L'estimation du risque est donc très difficile.

> Augmentation des charges sur les terre-pleins à l'arrière d'un ouvrage :

La mise en place de remblais permanents, voire le stockage anarchique de matériaux pondéreux augmente la poussée sur l'ouvrage et peut entraîner un risque de rupture par glissement du remblai avec cisaillement des pieux éventuels. Avant de tels travaux, il faut réaliser une étude géotechnique complète sur la stabilité de l'ouvrage, mais aussi de l'ensemble de la zone susceptible de glisser.

> Enlèvement de matériaux devant l'ouvrage :

L'enlèvement de matériaux devant un ouvrage, à l'occasion de travaux de dragage ou dus à l'action du jet des hélices, diminue la contre-poussée ou la butée favorables à la stabilité de la structure. Un risque de glissement avec cisaillement des éventuels pieux est également possible.

> Réalisation de travaux au voisinage d'un ouvrage :

La réalisation de travaux et, en particulier, de fondation à proximité d'un ouvrage nécessite d'imposer des procédures d'exécution pour limiter les risques.

Il est préférable de mettre en place des pieux ouverts plutôt que d'avoir recours à des pieux munis de sabots. Il faut préférer le battage au mouton à chute libre ou le marteau à cadence lente au vibrofonçage tout particulièrement si les sols sont susceptibles de se liquéfier (cas des sables lâches).

4.3.11.8 Principaux désordres pouvant survenir à long terme sur les ouvrages et leurs fondations

> Il est possible de distinguer :

- les tassements de l'ouvrage dus à la consolidation ou au fluage d'une couche de sol sous-jacente. Il s'agit le plus souvent d'une couche de matériaux argileux soumise à un niveau de sollicitation excessif ;
- l'altération du matériau support d'un ouvrage, comme un remblai immergé mis en place comme assise d'une digue. Ce matériau peut aussi être agressé par des travaux de dragage mal conduits ;
- l'altération des mortiers par action chimique ou dissolution, qui peut conduire à un affaiblissement de leurs caractéristiques mécaniques ou à des désorganisations, voire à des ruptures des maçonneries sous l'action des gonflements par action de chlorures ou de sulfates sur les chaux ou les ciments ;
- les effets de la houle ou du marnage sur des matériaux sableux peu compacts, saturés et faiblement confinés situés, par exemple, sous le pied d'un talus immergé. Il s'agit de phénomène de type liquéfaction demandant des études géotechniques complexes ;
- la diminution de la portance des fondations due à l'enlèvement des sols par érosion, affouillement… devant les ouvrages. Cette réduction résulte, le plus souvent, d'une diminution de l'encastrement de la fondation dans le terrain.

4.3.11.9 Investigations

4.3.11.9.1 Généralités

Lorsque les fondations d'un ouvrage en maçonnerie présentent des désordres, un certain nombre d'étapes doivent être parcourues afin d'aboutir au **diagnostic** recherchant la ou les causes des désordres, les éléments pathologiques lourds, la capacité portante des différents éléments constitutifs et les risques encourus par l'ouvrage. Ce diagnostic est à compléter par un **pronostic** sur le devenir de la structure. Ces actions sont indispensables pour prendre, si nécessaire, **les mesures qui s'imposent** (limitation du trafic, fermeture de l'ouvrage, mise en place d'un franchissement provisoire, suppression de certaines causes d'agression, confortement provisoire…) puis ensuite mettre au point le **projet de réparation ou de renforcement.**

> ***Rappel :*** *la solution de démolition reconstruction fait partie des options à étudier.*

4.3.11.9.2 Les différentes étapes

1. Identification de l'ouvrage :

En l'absence du **DOSSIER D'UN OUVRAGE,** il faut pouvoir répondre aux deux questions suivantes : quel est le type de fondation et quel a été son mode de réalisation ? L'ouvrage a été construit à une période donnée pour répondre à un besoin précis. Son constructeur l'a réalisé en tenant compte des contraintes locales et des connaissances techniques de l'époque. Retrouver la date ou la période de construction permet d'obtenir une première réponse aux interrogations susvisées (cf. l'article 4.3.11.1 ci-dessus sur l'historique) et d'en déduire les investigations à effectuer pour les confirmer.

2. Étude du comportement global et du comportement local de l'ouvrage :

Cette étude doit permettre, sur la base de caractéristiques et de propriétés mécaniques fiables, d'établir les diverses sécurités que présente l'ouvrage en matière de fondations : stabilité au poinçonnement, tassements susceptibles de se produire compte tenu de l'état des différents éléments constitutifs et des matériaux, de l'importance des actions exercées par les remblais… Cette étude porte aussi sur l'analyse des déformations, la position et l'ouverture des fissures et fractures (celles des voûtes en particulier).

Cette étude requièrt la réalisation progressive d'investigations à choisir parmi les possibilités suivantes, qui se rattachent à des moyens externes et internes. Ces auscultations et essais sont à fixer avec l'ordre de réalisation dans **«le programme des investigations» :**

> Moyens externes[8] :

- inspection détaillée de la superstructure de l'ouvrage avec relevé des désordres,
- levé topographique de l'ouvrage et de son environnement immédiat pour mettre en lumière les tassements différentiels et absolus et les déformations,

[8] *Se reporter aux fascicules de la seconde partie de l'instruction technique sur la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEOA) de l'ex-ministère de l'équipement (fascicule 10 : fondations en site aquatique, et fascicule 11 : fondations en site terrestre…*

- examen de la zone d'influence (accès et abords) pour détecter les éventuelles modifications pouvant interférer avec l'ouvrage (dragages, modifications de la largeur du lit, changement dans les orientations du courant, érosion des berges à proximité de l'ouvrage, existence sur les berges de pompages dans la nappe[9]…),
- inspection subaquatique détaillée avec ou sans dégarnissage localisé d'un appui, ce qui permet d'identifier le type de fondation, ses protections et leurs états apparents (des relevés doivent être effectués lors de l'inspection),
- levé bathymétrique de la rivière tout autour des appuis, en amont et en aval de l'ouvrage, qui permet de mettre en évidence les affouillements et de situer le niveau des sols au pourtour des appuis (il ne permet pas d'évaluer l'importance de l'affouillement généralisé),
- mise à sec des différents appuis, qui permet une identification apparente mais précise des matériaux constitutifs de la fondation, de la position et de la géométrie de la base des appuis. Pour ce faire, la réalisation d'un trou avec une pelle mécanique est nécessaire, ce qui permet, en outre, de préciser le profil géotechnique superficiel.

ATTENTION : *comme pour les inspections des structures en élévation,* ***les inspections subaquatiques*** *doivent être réalisées par des inspecteurs et agents d'inspection qualifiés. Il s'agit, pour les inspections subaquatiques, du* ***«certificat de qualification professionnelle scaphandrier inspecteur».***

> Moyens internes :

- sondages carottés à la couronne diamantée et en gros diamètre à travers un appui, complétés par des essais adaptés dans les maçonneries et poursuivis par forage dans les sols de fondation en fonction des objectifs recherchés (les sondages sont des sondages avec prélèvement d'échantillons intacts, sachant que les sondages destructifs, dans la maçonnerie, sont à éviter, voire à exclure). Leur implantation doit se faire en fonction d'une première analyse de comportement de l'ouvrage et de l'objectif de rechercher les désordres.

ATTENTION : *il faut prendre certaines précautions lors de la mise en œuvre des moyens pour éviter de réduire la stabilité des appuis et provoquer ainsi une aggravation des désordres.*

4.3.11.9.3 Recommandations sur la réalisation et l'exploitation des reconnaissances externes

> Cas du dégarnissage de la base d'un appui :

Ce procédé est utilisé pour observer et reconnaître une fondation en vue de son identification et de la recherche du niveau d'assise. **Cette opération doit être mise en œuvre avec prudence et sous surveillance précise de l'ouvrage** pour détecter l'apparition de désordres, signes d'un mouvement de la fondation concernée (déformations, fissures…).

[9] *Des pompages dans la nappe peuvent entraîner des tassements accélérés des sols donc des fondations.*

La fouille doit être étroite, localisée de préférence en zone courante hors des zones de concentration de contraintes, comme une chaîne d'angle, un avant ou arrière-bec, surtout si ce dernier a été ajouté ultérieurement à la construction de l'ouvrage ou supporte un élargissement…

L'ouverture de la fouille doit être immédiatement suivie d'une observation la plus complète possible (prise de cotes et de niveau, relevé de la nature et de l'état des matériaux de l'ouvrage mais aussi des sols rencontrés…). La fouille doit ensuite être refermée avec les matériaux extraits ou de substitution et remis en place avec soin pour éviter leur dégradation par l'eau. La reconstitution de la protection de la surface des sols et des parements de la fondation fait partie de l'opération.

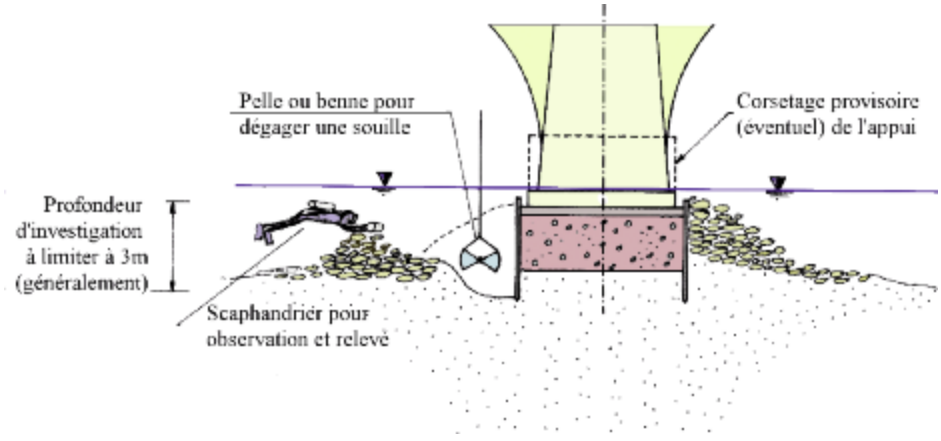


Figure n° 29 : observations sur la base d'un appui par ouverture d'une fouille

> Cas de la mise à sec de la base des appuis :

La décision de mettre à sec un appui ou ceux de la totalité de l'ouvrage (cas des ouvrages de faible portée et de longueur modeste) n'est prise qu'à la suite d'autres investigations qui ont permis de connaître les désordres, leur importance et de mettre au point un projet de réparation. En effet, il faut profiter de cette mise à sec pour réaliser les travaux d'entretien et de réparation[10].

Ce procédé consiste à isoler un appui ou la totalité des appuis à l'abri de deux barrages établis l'un à l'amont, l'autre à l'aval, le cours d'eau étant dévié provisoirement, soit à côté de l'ouvrage, soit sous l'ouvrage dans une buse, sous les autres arches (cas où un seul appui est isolé).

L'intérêt majeur de ce procédé réside dans une observation directe et aisée de tous les éléments hors sol des fondations, ce qui permet un relevé exhaustif et précis de la géométrie, de l'état des matériaux et de la nature et importance des désordres (cavités, fractures…). Ce procédé permet d'affiner les résultats des autres méthodes d'investigation mises en œuvre.

[10] ***Le marché*** *doit être rédigé de façon à pouvoir intégrer les éventuels dépassements de quantités qui peuvent être détectées lors d'une telle mise à sec des appuis.*

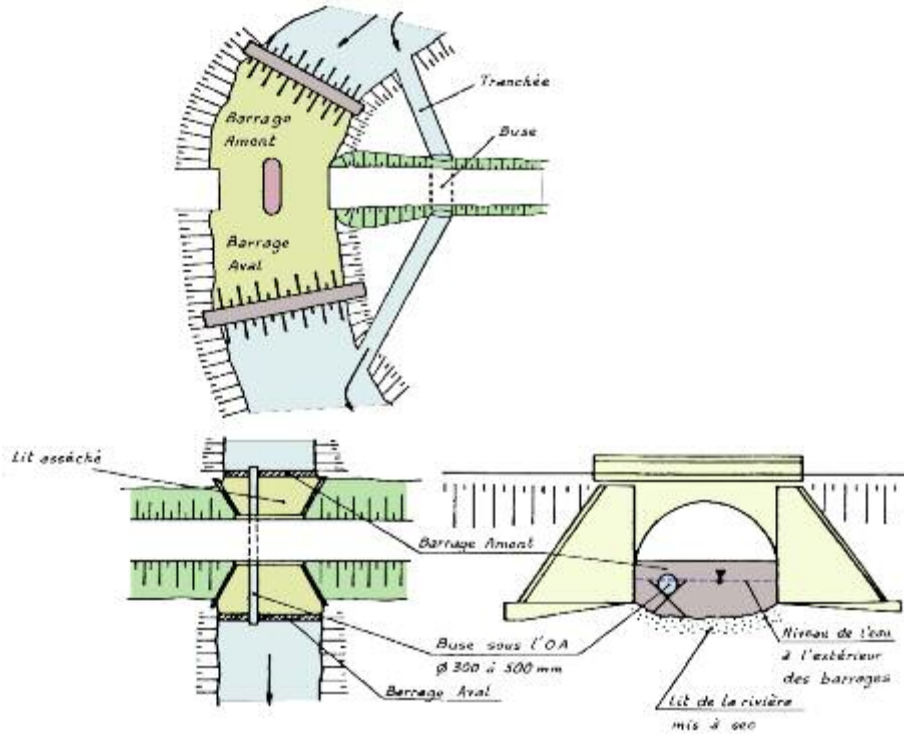


Figure n° 30 : exemples de mises à sec des appuis d'un ouvrage

> Des précautions spécifiques sont à mettre en œuvre lors d'une telle opération :

- l'abaissement du plan d'eau sous l'ouvrage batardé en amont et en aval doit être progressif. En effet, une culée ou un mur constituent un barrage à l'écoulement des eaux en charge dans les sols derrière ces obstacles. Il faut donc que les gradients d'écoulement restent très inférieurs au **«gradient critique»** pouvant entrainer les éléments des sols et créer **«des renards»** lesquels réduisent, voire annulent la force portante des sols,

- une pile ne peut pas être utilisée pour servir d'appui à un batardeau de mise à sec. En effet, le chemin d'écoulement de l'eau sous la base de l'appui est relativement court et, si la charge hydraulique est suffisamment élevée, le gradient d'écoulement peut devenir critique, ce qui va produire l'entraînement des sols d'appui et la possible formation de renards. La poussée des eaux sur un parement rejointoyé et ainsi rendu étanche peut provoquer son effondrement,

- la fermeture d'une arche à l'écoulement des eaux transfère le débit du cours d'eau, soit vers l'arche ou les arches adjacentes, soit vers des canalisations provisoires disposées sous l'ouvrage ou dans les terrains avoisinants. Il faut s'assurer que cet écoulement forcé ne risque pas d'agresser les appuis adjacents, les murs en aile, les berges, les murs de quai en aval… en effet, la réduction de section ainsi créée peut provoquer des affouillements locaux.

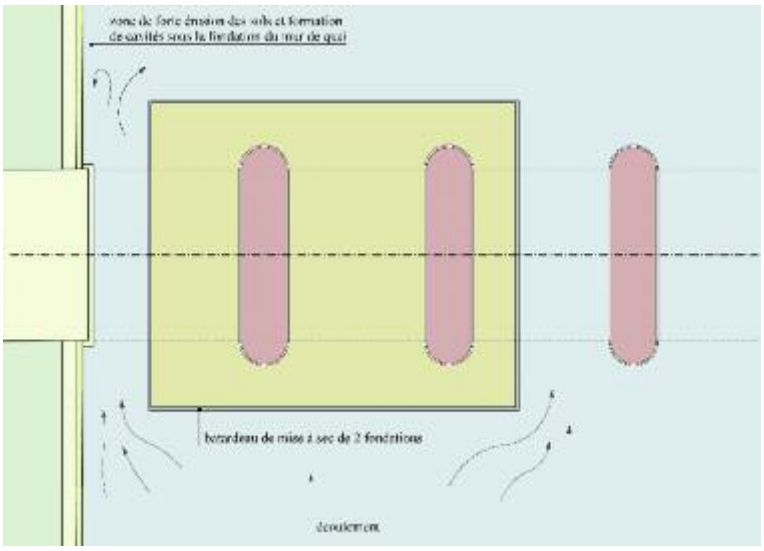


Figure n° 31 : désordres pouvant survenir lors d'une réduction du débouché

4.3.11.9.4 Recommandations sur la réalisation et l'exploitation des reconnaissances internes

> L'implantation des sondages doit être murement réfléchie :

- cette implantation ne doit pas résulter de la facilité d'accès et de mise en action de la machine de forage. Elle doit viser à mettre en évidence les désordres et leur importance. La machine doit donc être implantée pour pouvoir forer directement en arrière du parement d'un appui et non dans l'axe de celui-ci. En effet, le disjointoiement est plus prononcé juste en arrière du parement qu'au cœur de l'appui,
- les forages doivent être effectués dans les zones où les sols risquent d'être décomprimés par les affouillements, comme les zones des avant et arrières becs. Faire les sondages dans la zone centrale des appuis conduit à donner une fausse image de la sécurité,
- la reconnaissance des fondations reste toujours fragmentaire. Par exemple, la détermination précise du nombre des pieux en bois et de leurs fiches reste très difficile, voire impossible.

> La reconnaissance par sondages carottés impose de mettre en œuvre des moyens bien adaptés pour cette opération :

- Il convient d'adopter des carottiers à couronne diamantée de grand diamètre (Ø 131 mm et Ø 116 mm), en excluant les autres diamètres inférieur à Ø 101 mm. En effet, le matériau maçonnerie est difficile à prélever, aussi intact que possible, sans altérer son état apparent, à cause de sa nature hétérogène de moellons durs et de mortier de hourdage, qui peut être tendre, de mauvaise qualité d'origine ou altéré et décomposé,

- l'expérience et la professionnalisation du sondeur[11] sont également des facteurs prépondérants pour la qualité du carottage et, par la suite, dans l'appréciation de qualité que le bureau d'étude attribuera à l'état des maçonneries sur la base des résultats du carottage,
- le dossier fourni par le sondeur doit décrire avec grande précision le sondage avec identification des matériaux rencontrés (sols, pierre, mortier, pieux, bois, béton…). Il devra fournir les paramètres et caractéristiques descriptives propres au métier de sondeur,
- dans la maçonnerie, des essais d'eau du type «Lugeon à pression limitée ou Lefranc adaptés» peuvent être prévus pour contrôler la fissuration éventuelle de la maçonnerie et la perméabilité du mortier de hourdage (se reporter à la partie du présent guide consacrée aux injections),
- dans le sol de fondation, les sondages carottés sont à compléter par des essais de type pressiométrique ou pénétrométrique pour caractériser les propriétés mécaniques des sols de fondation et, éventuellement, par des essais d'eau pour rechercher des écoulements anormaux ou des cavités,

> L'utilisation d'outils de forage destructifs est à limiter au maximum, voire à interdire :

Le recours à des outils destructifs, comme des marteaux hors-trou ou fond de trou (outils, qui permettent, à moindre coût, d'atteindre rapidement un horizon profond), est à réserver aux cas suivants :

- campagne de reconnaissance prévoyant de nombreux forages, dont un nombre suffisant de sondages carottés nécessaire à l'étalonnage des paramètres de forage,
- maçonnerie résistante où le mortier de hourdage n'est que peu dégradé.

ATTENTION : *les sondages destructifs sont à exclure totalement dans une maçonnerie dont les moellons sont en plaquettes disposées subhorizontalement, ce qui est le cas des schistes, des briques… De même, dans un massif de béton de chaux où le mortier est important et les granulats gros et durs, un forage destructif a tendance à détruire totalement des liaisons des éléments, ce qui rend erronée l'appréciation sur l'état de cette maçonnerie. Elle parait en très mauvais état de conservation alors que l'ensemble peut être monolithique, cohérent et suffisamment portant, bien que tendre et fragile.*

> Une reconnaissance sérieuse de l'interface entre la maçonnerie et des sols de fondation est indispensable :

- bien reconnaître cette interface ainsi que les caractéristiques mécaniques des sols est une opération délicate. En effet, à l'interface, il y a un changement brutal de nature et de propriétés des matériaux, ce qui impose de modifier les paramètres de carottage ou les autres outils utilisés. Le sondeur doit être particulièrement vigilant pour arrêter rapidement les avances de l'outil et les injections de fluide de forage lorsque la base de la maçonnerie est atteinte,

[11] *Il est indispensable de s'assurer que le sondeur soit couvert par une police d'assurance en responsabilité professionnelle : tous risques chantier (TRC) au cas où le sondage provoquerait des désordres structuraux.*

- un essai pressiométrique ne pouvant être renouvelé s'il est manqué, il est indispensable de respecter scrupuleusement les recommandations de la norme relative à cet essai.

> La force portante des sols doit être évaluée correctement :

Le géotechnicien qui interprète les essais doit tenir compte de la géométrie réelle de la base d'appui, de son encastrement dans les sols, de l'amélioration éventuelle des résultats des essais avec la profondeur pour évaluer la contrainte de référence sous la base de l'appui et surtout ne pas donner une valeur évaluée sommairement pouvant faire craindre pour la sécurité de la fondation.

4.3.12 ACTION DE LA VÉGÉTATION SUR OU AU VOISINAGE IMMÉDIAT DES OUVRAGES

4.3.12.1 Constatations

Au cours de leur vieillissement, les ouvrages se couvrent de petits végétaux (mousses et lichens) créant un biotope favorable à l'implantation de végétaux de taille plus importante. La croissance de ces végétaux, par l'importance de leur développement racinaire, peut avoir des conséquences catastrophiques sur la structure de l'ouvrage.

Photo n° 45: désorganisation de la maçonnerie par la végétation *(crédit photo J. M. Michotey)*

Par ailleurs, on ne peut omettre de mentionner les dégâts importants occasionnés par les embâcles bloqués par les ouvrages lors des crues. Chocs de troncs, formations de barrages naturels mettant en charge l'ouvrage dans une configuration de contraintes peu conforme aux sollicitations envisagées lors de sa conception.

La couverture végétale, surtout à feuillage persistant comme le lierre, a aussi pour inconvénient de masquer des défauts graves que peut présenter un ouvrage et donc retarder les opérations urgentes d'entretien nécessaires.

4.3.12.2 Investigations

La présence de la végétation doit être repérée lors de la visite annuelle et enlevée dans le cadre de l'entretien annuel si l'accès à la partie d'ouvrage concernée est possible. Dans le cas contraire, il faut organiser une campagne de dévégétalisation.

4.3.13 RÉPARATIONS ET/OU RENFORCEMENTS MAL CONDUITS

4.3.13.1 Constatations

Un diagnostic erroné, une mauvaise connaissance des règles de l'art, un étaiement de sécurité non mis en place, un mauvais choix de matériaux, des travaux mal exécutés peuvent conduire à des **EFFONDREMENTS PENDANT LA PHASE DES TRAVAUX.** Le plus souvent, **les problèmes ne vont se manifester que quelques années plus tard** avec l'apparition des divers désordres qui viennent d'être évoqués dans les paragraphes précédents.

> Voici quelques exemples pour illustrer ces travaux mal conduits :

- **rejointoiement d'une maçonnerie hourdée à la chaux avec un mortier à base de ciment :**

Le mortier de ciment ayant des caractéristiques mécaniques élevées, le tassement différentiel des deux qualités de joints provoque un effet de coin qui entraîne l'éclatement des pierres en bordure de joint.

- **enduit à base de ciment sur une maçonnerie calcaire :**

La mise en place d'un mortier de ciment sur des pierres altérées en profondeur créé un barrage étanche au niveau du parement qui maintient un taux d'humidité élevé propice à une accélération de l'altération de surface déjà constatée.

Photo n° 46 : désorganisation de l'enduit ciment et du mur de soutènement en maçonnerie *(crédit photo D. Poineau)*

Photo n° 47 : exemple de travaux d'enduisage inadaptés à la maçonnerie (crédit photo D. Poineau)

La photo suivante montre les traces anciennes de remontées d'humidité dans un mur dont la base avait été revêtue d'un enduit sans création d'une barrière étanche. L'enduit a dû être supprimé, ce qui a permis d'assécher le mur.

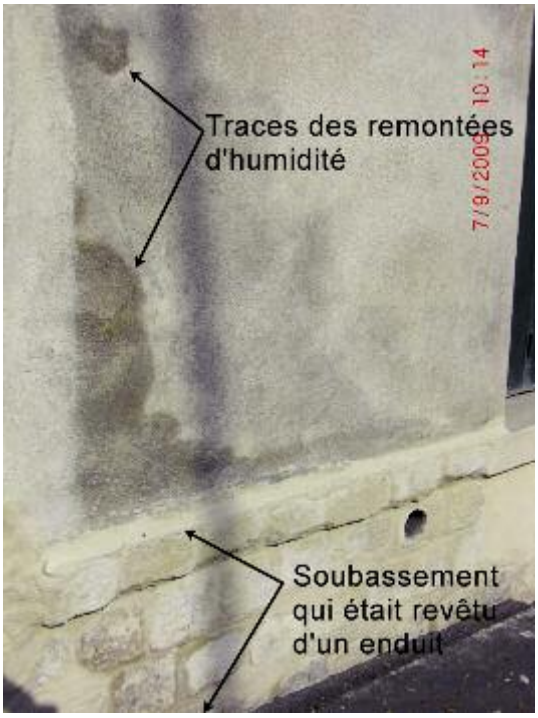


Photo n° 48 : traces des remontées d'humidité (crédit photo D. Poineau)

■ **réalisation d'un enduit rendant étanche un mur en pierres sèches :**

De tels travaux, sans évaluation de la stabilité du mur et sans la réalisation d'un drainage efficace de son arrière, est un exemple **d'opération très dangereuse.** En effet, il peut se produire une mise en charge du mur par l'accumulation des eaux en arrière de celui-ci. Cela peut conduire à un renversement brutal de l'ouvrage avec des conséquences qui peuvent être dramatiques pour les personnes qui se trouveraient à proximité…

■ **ancrages et clouage mal conçus :**

La figure ci-après montre la mise en place d'épingles destinées à renforcer transversalement une voûte. Toutes les épingles ont la même longueur. Cette mauvaise disposition modifie brutalement la rigidité de la maçonnerie et provoque des zones de concentration de contraintes, ce qui va produire une fissuration longitudinale de la voûte dans le plan de l'extrémité des ancrages.

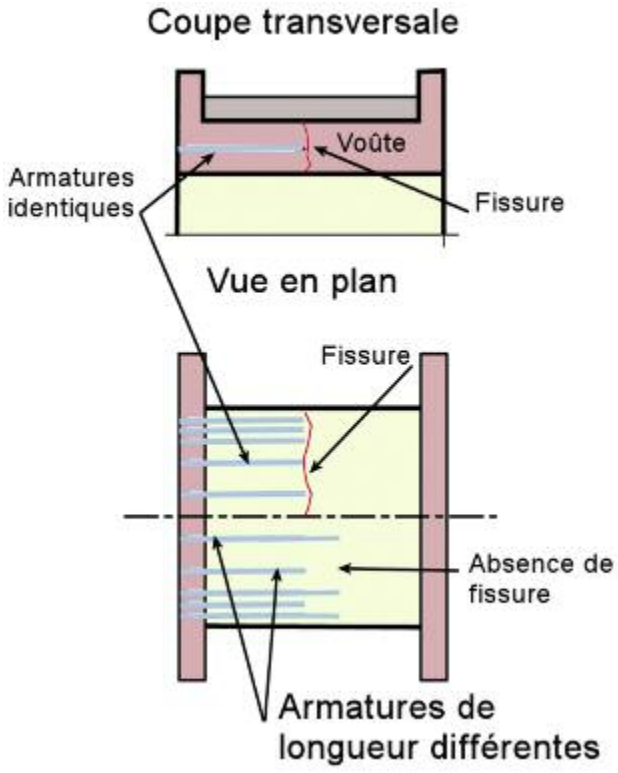


Figure n° 32 : cloutage dissymétrique

■ **rejointoiement des maçonneries d'un pont-voûte sans réfection du drainage :**

Cette erreur peut se produire aussi lors de la réalisation d'une contre-voûte en béton projeté et d'un enduisage des parements des tympans et murs par le même procédé.

Dans les deux cas, l'ouvrage peut devenir une «piscine» avec mise en charge et déformation des maçonneries. Le gel accentue les désordres.

Il faut y ajouter les ponts partiellement endommagés ou détruits par faits de guerre et qui ont été réparés ou reconstruits avec des matériaux de mauvaise qualité à cause de ces périodes de restriction.

4.3.13.2 Investigations

La surveillance continue et/ou périodique permet de constater la présence des désordres. Ensuite, en fonction des désordres constatés, il faut effectuer les investigations adaptées pour en déterminer les causes. Se reporter aux différents paragraphes ci-devant et ci-après.

4.3.14 ACTIONS ACCIDENTELLES

> **Comme toutes les autres structures, les ouvrages en maçonnerie peuvent être soumis à des actions accidentelles. Il est possible de citer :**

- les effets des séismes très dévastateurs pour ce type d'ouvrages ;
- les chocs de véhicules et surtout de bateaux ;
- les explosions ;
- les incendies…

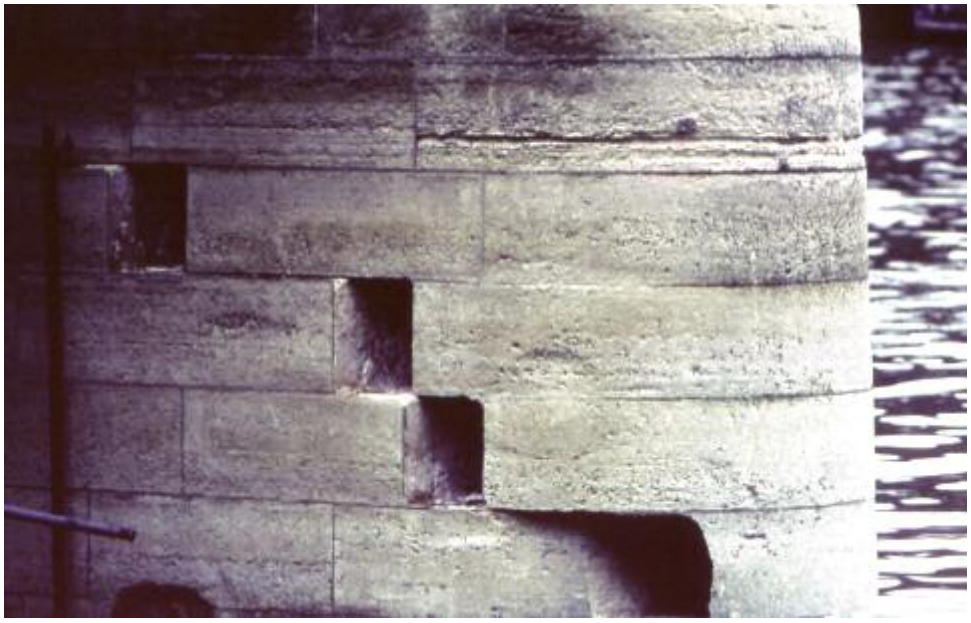


Photo n° 49 : résultat du choc d'un convoi poussé sur une pile de l'ancienne Passerelle des Arts *(crédit photo D. Poineau)*

En cas d'incendie, ce qui concerne préférentiellement les tunnels en maçonneries, le comportement de l'ouvrage va dépendre de la tenue des mortiers (se reporter au **guide STRRES FABEM 1**) et de la nature du matériau :

- les roches magmatiques (basaltes, trachytes…) ont une bonne tenue à la chaleur ;
- les roches sédimentaires siliceuses (grès, meulières…) commencent à éclater vers 575°C;
- les roches sédimentaires calcaires commencent à se décomposer vers 800°C.

5

Préparation et réalisation d'une opération de réparation et/ou renforcement

5.1 Généralités
5.2 Installations de chantier (pour mémoire)
5.3 Ouvrages provisoires (ponts et passerelles) Autres ouvrages provisoires - Moyens d'accès Étaiements provisoires
5.4 Critères applicables au choix des produits et matériaux
5.5 Conditionnement des produits et matériaux
5.6 Transport et stockage des produits et matériaux
5.7 Contrôles de réception des produits et matériaux (pour mémoire)
5.8 Matériels à utiliser
5.9 Réalisation de travaux de réparation et/ou de renforcement – Modes opératoires
5.10 Essais et contrôles
5.11 Réception des travaux

UNE ÉDITION DU SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES (STRRES) / FÉVRIER 2016

Ce paragraphe traite de la **trame générale** d'une opération de réparation et/ou renforcement d'un ouvrage en maçonnerie, des tâches et des responsabilités des différents acteurs **(maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entrepreneur et contrôleur).**

Pour la mise en œuvre d'une des **méthodes de réparation et/ou renforcement** développées dans les **guides FABEM 6.2 et FABEM 6.3,** il faut adapter cette **trame** et le **marché** aux spécificités de la méthode en s'inspirant des exigences et conseils développés dans le **présent guide** et les **guides FABEM 6.2 et FABEM 6.3.**

L'entrepreneur fait mettre en place les **dispositifs de mise en sécurité de l'ouvrage,** les **moyens d'accès,** ainsi que les **équipements d'hygiène et de sécurité** sur le lieu où la réalisation des travaux de réparation ou de renforcement est prévue, en respectant les dispositions du **marché**, la législation en vigueur et les consignes du **chargé des ouvrages provisoires (COP)** et du **coordonnateur sécurité et protection de la santé (coordinateur SPS).**

> L'entrepreneur doit prendre connaissance et disposer en permanence des documents de la liste suivante (non limitative) :

- **les normes** en vigueur et les autres documents de référence qui sont cités dans les guides «Maçonnerie» (se reporter aux tableaux des textes de référence de **l'annexe 1** [FABEM 6.4]). Les contrôles demandés doivent être adaptés, si nécessaire, à la technique de traitement retenue en l'absence de norme spécifique ;
- **les articles du marché** relatifs à l'exécution de la réparation ou du renforcement et, en particulier :
  - les résultats des investigations,
  - le rapport de diagnostic ;
- **la procédure** relative à l'exécution de la réparation ;
- **le cadre du document de suivi** de l'exécution de la réparation ;

- **la fiche technique** (ou notice d'emploi) de chacun des produits constituant le système de réparation ;
- **la fiche de données sécurité (FDS)** de chaque produit dont la présence sur le chantier est imposée par la réglementation ;
- **la fiche technique et le carnet d'entretien** des différents matériels nécessaires (par exemple, outils de mélange des produits, moyens de pesée, outils de forage, outils de taille des pierres, etc.) ;
- etc.

> L'entrepreneur doit organiser, exécuter et contrôler toutes les opérations suivantes :

- celles relatives à l'assurance de la qualité ;
- celles qui doivent précéder certaines phases de travaux, comme l'enlèvement de la végétation, la préparation des produits… ;
- celles qui doivent suivre certaines phases de travaux, comme le nettoyage des parements de maçonnerie après le remplacement de pierres endommagées… ;
- celles relatives aux interventions du **laboratoire** chargé de certaines épreuves et de certaines mesures ;
- l'amenée et la mise en place des moyens d'accès et des équipements d'hygiène et de sécurité ;
- l'approvisionnement des matériaux et produits nécessaires ;
- l'amenée et la mise en place des matériels nécessaires à l'opération ;
- la réalisation du relevé contradictoire avec le **maître d'œuvre** de l'état de tout ou partie de la structure :
  - si les réparations à effectuer concernent la réfection d'une partie de l'ouvrage nécessitant son démontage et son remontage, le relevé inclus le **repérage de toutes les pierres du parement** au moyen d'une numérotation de chaque moellon, un plan coté, des photos, de la stéréoscopie…,
  - dans le cas d'un ouvrage partiellement ou totalement effondré, le marché peut inclure la récupération des pierres et la reconstitution de l'ouvrage original (un véritable « puzzle » ! [se reporter aux articles consacrés à la reconstruction du pont de Mostar]),
  - si les réparations à effectuer concernent des désordres structuraux dont le traitement peut mettre en jeu la stabilité de la structure, le **relevé des désordres** doit être complété par les dispositions à prendre lors des travaux pour **mettre en sécurité l'ouvrage** (par exemple, le phasage des diverses opérations de démolition et de réparation, les étaiements provisoires…) ;

- la mise en œuvre des moyens de mesure destinés à contrôler l'efficacité du traitement de la dégradation mais aussi, si besoin est, les moyens de contrôle de la stabilité de l'ouvrage en cours de travaux ;
- etc.

ATTENTION, *si les ouvrages en maçonnerie s'adaptent souvent «de bonne grâce» aux sollicitations, aux tassements qu'ils subissent pendant leur existence ou lors de travaux, en revanche, ils peuvent* ***s'effondrer brutalement*** *et quasiment sans prévenir !*

Rappel : *la remise au* ***maître d'œuvre*** *des procédures et des cadres des documents de suivi relatifs à une phase de travaux conditionne la levée du* ***POINT D'ARRÊT.***

> Lorsqu'un ouvrage en maçonnerie présente des désordres, la réalisation d'ouvrages provisoires peut être nécessaire :

- en premier pour rétablir la circulation des véhicules et/ou des piétons ;
- et/ou pour mettre en sécurité l'ouvrage à réparer ou renforcer ;
- mais aussi, pour permettre l'accès à l'ouvrage pendant les travaux.

Se reporter à l'annexe 3 (guide FABEM 6.4).

Photo n° 50 : aqueduc d'Arcueil-Cachan, échafaudage volant pour des travaux de ragréage *(crédit photo D. Poineau)*

Photo n° 51 : soutènement pendant les travaux de confortement d'un pont à la Poterne des Peupliers *(crédit photo D. Poineau)*

Le choix des produits et matériaux est basé **sur deux critères principaux : d'une part la spécificité du travail à exécuter et, d'autre part le respect des règles d'hygiène et de sécurité et la protection de l'environnement.**

> La spécificité du travail à exécuter se caractérise par plusieurs sous-critères :

■ **des sous-critères généraux :**

- le contexte (bâtiment ou **ouvrage de génie civil**), qui impose des niveaux de performances plus ou moins élevés, des exigences réglementaires de tenue au feu, des durées des responsabilités et garanties différentes… ;
- **le caractère structural ou non** de la réparation, sachant qu'un **renforcement a toujours un caractère structural ;**

■ **des sous-critères particuliers liés à l'exécution et à l'environnement de l'ouvrage :**

- la quantité de produits et matériaux à utiliser (petite ou grande). Elle peut orienter, à cause des coûts, vers des produits ou matériaux qui sont, soit prêts à l'emploi, soit fabriqués sur chantier,
- l'agressivité de l'environnement,
- les conditions ambiantes prévisibles sur le site,
- la présence d'eau avec ou sans pression (travaux souterrains, travaux sous-marins…),
- l'orientation du support, qui impose un travail au plafond, sur une surface verticale, sur un plan horizontal…,
- etc.

■ **des sous-critères particuliers liés aux exigences du maître d'œuvre :**

- la période des travaux et les conditions climatiques qui en résultent, qui jouent sur le choix des produits et le déroulement des travaux (nécessité de moyens de protection, d'appareils de chauffage…),
- le maintien du trafic, surtout celui des poids lourds, qui peut provoquer des vibrations néfastes à l'adhérence des produits et matériaux de réparation, donc à la pérennité de la réparation,
- les délais imposés à la durée des travaux. Une remise en service de l'ouvrage trop rapide risque d'être incompatible avec les délais à respecter entre les phases d'application de certains produits et matériaux,
- l'aspect esthétique souhaité après traitement,
- etc.

> Le respect des règles d'hygiène et de sécurité et la protection de l'environnement imposent le respect des principes suivants :

- les produits et matériaux sont choisis en tenant compte des risques qu'ils présentent par l'intermédiaire de leur étiquetage et de leur **fiche de données de sécurité (FDS) ;**
- le procédé d'application générant le moins de nuisances est à privilégier ;
- pour la protection du personnel, **l'entrepreneur** doit s'assurer du respect de la législation du travail en matière d'hygiène et de sécurité et fournir à son personnel les **équipements de protection collectifs** et, si nécessaire, ceux de **protection individuelle (ÉPI) ;**
- pour la protection des tiers et de l'environnement, **l'entrepreneur** doit tenir compte dans le choix des produits et matériaux des exigences réglementaires lors de l'utilisation des produits et lors du traitement des déchets.

REMARQUE : *les normes de produits ne donnent, en général, aucune indication sur les précautions à prendre en matière d'hygiène et de sécurité. Il faut se reporter aux* ***fiches de données de sécurité (FDS) des produits*** *qui fixent les règles à suivre et les* ***équipements de protection individuelle (ÉPI) à utiliser. La réglementation impose la présence des fiches sur le chantier.***

Il appartient au **marché** de fixer la ou les familles de produits et matériaux, les caractéristiques et les niveaux de performance auxquelles doivent satisfaire ces produits et matériaux ainsi que les contraintes d'exécution de l'opération, lesquelles peuvent avoir une incidence sur ce choix.

L'entrepreneur propose à l'acceptation du **maître d'œuvre** les produits et matériaux capables de satisfaire les exigences du **marché. Les produits et matériaux** ne sont normalement définitivement retenus qu'au vu des résultats satisfaisants de **l'épreuve d'étude et de celle de convenance.**

L'acceptation des produits et/ou matériaux admis à une marque de certification, sauf disposition contraire du marché, ne nécessite pas de procéder à des essais d'identification rapides et/ou des essais d'efficacité[12]. Il est cependant procédé aux **prélèvements conservatoires.** Leur mise en œuvre reste conditionnée aux résultats de **l'épreuve de convenance.**

Le même principe est applicable aux produits et matériaux bénéficiant du **marquage CE** si le **système** d'attestation de conformité est au moins du niveau 2+. Pour les autres niveaux (3 et 4), le **marché**, c'est conseillé, peut imposer des essais d'identification rapide.

[12] *Dans le cas où les conditions climatiques de mise en œvre des produits sur le chantier diffèrent nettement de celles de la norme, il est nécessaire de faire des essais spécifiques lors de l'épreuve d'étude.*

5.5.1 DIFFÉRENTS PRODUITS ET MATÉRIAUX

Différents types de matériaux, produits et systèmes de produits sont nécessaires pour la réalisation d'une **réparation** ou d'un **renforcement** d'une structure en maçonnerie (pierres, briques, mortiers, coulis d'injection, armatures de béton armé et de précontrainte, boulons, tirants d'enserrement…).

A ceci s'ajoutent les produits et systèmes nécessaires au nettoyage et à la préparation des parements et parois (produits de nettoyage, biocides, solvants, abrasifs…), ceux nécessaires pour nettoyer les matériels utilisés, ceux pour assurer la protection et la cure des mortiers mis en œuvre…

5.5.2 CONDITIONNEMENT DES PRODUITS ET MATÉRIAUX PRÊTS À L'EMPLOI

5.5.2.1 Généralités

Les produits de nettoyage liquides ou sous forme de gels sont livrés en jerricans, bidons ou fûts.

Les produits de préparation des surfaces, suivant leur forme (liquide, poudre…), sont livrés en sacs, bidons, jerricans…

Les solvants sont livrés en jerricans, bidons, fûts… En général, ils sont facilement inflammables, nocifs par inhalation… Des précautions particulières s'imposent donc. Se reporter aux **fiches de sécurité (FDS).**

Les mortiers à base de liants hydrauliques modifiés **(PCC)** sont livrés en sacs ou en seaux et les produits servant au gâchage en seaux ou en bidons.

Pour les produits à plusieurs composants (deux ou trois), tels que les mortiers à base de liants organiques, les produits de collage… qui doivent être mélangés dans leur totalité avant leur emploi, les boîtes des composants doivent être réunies sous un emballage unique et avoir des capacités telles que le mélange puisse être effectué sans avoir à verser leur contenu dans un récipient additionnel.

Les produits prédosés doivent être livrés en récipients d'origine, parfaitement hermétiques. Si les produits sont en pots, ils doivent disposer de tambours à ouverture totale.

Les armatures de béton armé et de précontrainte, les armatures industrielles pour béton, le béton prêt à l'emploi, les granulats… sont livrés conformément aux **normes en vigueur** complétées par les exigences des textes de mise en œuvre, tels que les **fascicules du CCTG** et les **DTU**, et les **exigences spécifiques du marché.**

Par exemple, le marché, si besoin est, impose des **conditionnements particuliers** lorsque les matériaux, les produits et les systèmes risquent d'être soumis pendant leur transport et leur stockage à des environnements nocifs à la conservation de leur propriétés (par exemple, conditionnement des armatures de précontrainte dans le cas d'un transport maritime…).

5.5.2.2 Marquage - Étiquetage

> Il convient de superposer les exigences de la norme produit ou matériau avec celles du marquage CE lorsque celui-ci est applicable, voire d'autres documents. Ces indications doivent être rédigées au moins en langue française et donner les informations suivantes :

- le nom, l'adresse, l'appellation commerciale et tout autre moyen d'identification du fabricant ou de son représentant agréé établi dans l'EEE, ainsi que le lieu de production ;
- l'identification du produit ou matériau, c'est-à-dire la marque de fabrique, le numéro du lot ;
- le type du produit ou matériau et le numéro, la date et la partie appropriée de la norme correspondante (expérimentale, homologuée, harmonisée…) ;
- un résumé des exigences relatives au stockage, avec les exigences concernant la durée du stockage clairement marquées, par exemple : «Ce produit ou matériau ne doit plus être considéré comme conforme à la norme après la date suivante : …» ;
- des recommandations relatives à l'emploi, y compris toutes précautions particulières concernant l'utilisation et les mesures de sécurité imposées par les réglementations locales ;
- pour les produits à plusieurs composants, l'indication de l'obligation de les mélanger dans leur totalité, sauf indication contraire du producteur ;
- la masse ou le volume net du produit de type monocomposant ou, pour les produits à plusieurs composants, la masse ou le volume net total ;
- ainsi que :
  - pour les produits à base de liants hydrauliques, la quantité d'eau de gâchage prévue selon le ou les usages du produit correspondant à l'unité de conditionnement,
  - pour les produits à base de résines synthétiques, la durée pratique d'utilisation (DPU) ;

Il faut y ajouter, conformément à la législation française, les **pictogrammes réglementaires de danger** «irritant, nocif, corrosif, inflammable…» associés à **des phases de risques [R]** et à des **conseils de sécurité [S].**

> Il faut y ajouter également :

- pour les produits et systèmes visés par une ou des **normes harmonisées** et donc tributaires du **marquage CE :**
  - le numéro d'identification de **l'organisme de certification** (seulement pour les produits relevant des systèmes 1+, 1 et 2+),
  - les deux derniers chiffres de l'année d'apposition du marquage,
  - le numéro du **certificat CE de conformité** ou du **certificat de contrôle de la production en usine** (le cas échéant),
  - la référence à la norme européenne,
  - la description du produit : nom générique, matériau, dimensions… et utilisation prévue,
  - les informations sur les caractéristiques essentielles pertinentes énumérées dans le **Tableau ZA.1** qui doivent faire l'objet de la déclaration ;

- le cas échéant, le sigle de la **Marque NF** de conformité à une norme donnée (ou marque équivalente) apposé dans les conditions prévues au règlement particulier de cette marque ou de la **marque équivalente**[13] **;**

Dans le cas où l'étiquetage est incomplet, les **fiches techniques** renseignées doivent être fournies.

5.5.3 CONDITIONNEMENT DES PRODUITS ET MATÉRIAUX FABRIQUÉS SUR LE CHANTIER

Les différents composants et constituants qui servent à la fabrication foraine de produits et matériaux doivent être livrés dans des récipients ou containers adaptés aux quantités à mettre en œuvre, parfaitement nettoyés pour éviter toute pollution et suffisamment solides pour éviter tout mélange accidentel. Chaque composant doit être facilement identifiable (étiquette, marquage indélébile, etc.) de façon à éviter toute confusion. Si besoin est, le **marché** impose des exigences particulières.

L'entrepreneur propose le **conditionnement** à l'acceptation du **maître d'œuvre.**

[13] *Dans les Marchés Publics, il faut aussi admettre les marques de certification équivalentes (la preuve est du ressort du producteur).*

5.6.1 GÉNÉRALITÉS

Les produits et matériaux doivent être livrés sur le chantier suffisamment à l'avance pour permettre d'effectuer les **essais** et **contrôles** prévus par le **marché** et la **procédure** correspondant aux travaux à effectuer.

Les conditions de transport, de stockage et de manutention figurent rarement dans les **normes** et les **DTU** alors qu'elles sont traitées dans les **fascicules du CCTG.**

Les normes produits et matériaux traitent souvent dans le détail du **contrôle en usine** mais elles ne détaillent que rarement la **réception sur le chantier** (la réception se résume souvent au seul examen du bordereau de livraison).

Compte tenu de ce constat, il est donc nécessaire que le **marché** fixe des règles en faisant appel par exemple, aux clauses des **fascicules du CCTG applicables** (voir la démarche claire du fascicule 65). De plus, le **marché** doit préciser que les **contrôles de réception** prévus par les **normes applicables** comportent en sus des exigences sur les **conditions de transport** et sur celles de **stockage si elles ne sont pas visées par les normes.**

NOTA : *les exigences particulières relatives à la* ***réception d'un produit*** *ou d'un* ***matériau*** *sont développées dans les différentes parties relatives aux* ***essais et contrôles*** *des guides «Maçonnerie».*

5.6.2 CAS DES PRODUITS ET MATÉRIAUX AVEC FICHES TECHNIQUES ET DE SÉCURITÉ

Les produits et matériaux doivent être transportés puis stockés en suivant les prescriptions fixées par **la fiche technique du produit, la FDS et l'étiquette de sécurité,** en particulier vis-à-vis du point éclair. Le **marché** complète, en tant que de besoin, ces prescriptions.

Certains produits, s'ils sont transportés en ne respectant pas les conditions prescrites vis-à-vis de la température (par exemple en cas de gel), peuvent **ne pas être récupérables,** alors que d'autres produits peuvent retrouver leurs caractéristiques initiales. **L'entrepreneur** impose au **transporteur** de respecter les consignes et d'équiper le véhicule des moyens de mesure permettant de démontrer que les consignes ont été respectées.

Ces produits et matériaux sont le plus souvent à stocker à l'abri du soleil et du froid et en respectant les températures exigées (en général, entre 10 et 25°C). Le local de stockage doit être fermé mais aéré. De plus, une signalétique appropriée (par exemple, matières inflammables) doit être apposée sur le local.

5.6.3 CAS DES AUTRES PRODUITS ET MATÉRIAUX (PIERRES, GRANULATS, ARMATURES...)

Les produits et matériaux doivent être transportés puis stockés en suivant les prescriptions des textes en vigueur complétées par les prescriptions du **marché**.

5.7 Contrôles de réception des produits et matériaux (pour mémoire)

Les principes à appliquer lors des opérations de **contrôles de réception** d'un produit ou d'un matériau sont développés dans le **paragraphe 5.10 ci-dessous** relatif aux essais et contrôles.

Dans le cadre de la **procédure correspondant aux travaux à réaliser, l'entrepreneur** propose à l'acceptation du **maître d'œuvre** le matériel qu'il compte utiliser dans le respect des dispositions du **marché** et conformément aux stipulations des documents rendus contractuels (normes, fascicules du CCTG, guides techniques…) et des fiches techniques des fabricants[14].

L'état et le bon fonctionnement du matériel doivent être contrôlés par **l'entrepreneur** qui s'assure également de la présence des **fiches techniques et des carnets d'entretien,** voire des **procès-verbaux de tarage** (manomètres, dispositifs de pesage…). Il présente ces documents au **maître d'œuvre** sur sa demande ou dans les conditions prévues par le **marché** ou les documents rendus contractuels.

> Les différents matériels à utiliser concernent (liste non limitative, se reporter au Mode d'emploi des guides «Maçonnerie») :

- la réalisation des opérations connexes ;
- la préparation des produits et matériaux ;
- les travaux sur les fondations ;
- les travaux sur les parements ;
- les travaux sur les structures ;
- les travaux d'élargissement ;
- les travaux de protection contre les eaux…

Si c'est nécessaire, avant tout commencement d'une réparation et/ou d'un renforcement, **une protection** contre **le vent, le soleil** ou **la pluie** est à mettre en place. Ces exigences figurent normalement dans la **fiche technique du produit ou du système.** Dans le cas des produits fabriqués sur chantier, il faut appliquer les mêmes précautions que pour les produits prêts à l'emploi du même type (base de liants hydrauliques ou organiques).

[14] *Le marché vise en tant que de besoin les fiches techniques de fabricants, les normes, les fascicules du CCTG, les guides techniques en totalité ou en partie…*

Une réparation et/ou un renforcement se décompose en plusieurs **opérations unitaires** qui s'enchaînent sur le chantier.

5.9.1 ASSURANCE DE LA QUALITÉ - PROCÉDURES ET DOCUMENTS DE SUIVI

Chaque opération unitaire doit faire l'objet de **procédures et de documents de suivi.**

Pour une opération unitaire, le **marché** demande à **l'entrepreneur** de proposer, dans le cadre du **Plan d'Assurance de la Qualité (PAQ),** à l'acceptation du **maître d'œuvre les deux procédures et les deux cadres de documents de suivi** relatifs, d'une part, à sa **préparation** et, d'autre part, à sa **réalisation.**

Les techniques, le personnel ainsi que les moyens, les matériaux et produits à mettre en œuvre seront ensuite validés par **l'épreuve de convenance correspondante.**

Ces deux procédures sont intégrées dans la **procédure relative à l'ensemble des travaux** et **ces deux cadres de documents de suivi** sont intégrés dans le **cadre du document de suivi** de l'ensemble des travaux.

> Doivent être disponibles sur le chantier :

- **les procédures de préparation et de mise en œuvre** des différentes opérations unitaires et les **documents de suivi** correspondants ;
- **les fiches techniques** qui définissent les conditions de préparation et de mise en œuvre produits et matériaux ainsi que des matériels à utiliser ;
- **les fiches de sécurité (FDS)** qui définissent les précautions à prendre ;
- **le personnel et le matériel** nécessaires aux travaux préparatoires, à la préparation des produits et matériaux, à l'exécution de l'opération, aux travaux de finition, aux contrôles…

5.9.2 TRAVAUX PRÉPARATOIRES

Des travaux de dévégétalisation, de nettoyage, de démolition partielle, de rescindement… doivent souvent être effectués avant la mise en œuvre d'une méthode de réparation et/ou renforcement. Ces travaux préparatoires, une fois exécutés, sont acceptés par le **maître d'œuvre** qui autorise alors la réalisation de l'opération

5.9.3 PRÉPARATION DES PRODUITS ET MATÉRIAUX

Cette préparation peut porter sur des **produits prêts à l'emploi** (mortiers en sacs, pots de résines…), des **produits fabriqués sur le chantier** (mortier, coulis d'injection), sur des **matériaux en vrac** (granulats, ciment) ou sur des **matériaux prêts à l'utilisation** (pierres, briques, armatures pour béton armé).

> Il faut impérativement respecter :

- **les limites d'emploi des produits et matériaux** liées à la température et à l'hygrométrie ambiante et à la température et à l'humidité du support ;
- **le temps et les conditions de préparation ;**
- **les précautions à prendre** en fonction des risques que présentent les produits (toxicité, inflammation, explosion…) ;
- **le temps de mûrissement et la durée pratique d'utilisation** des produits de type multi composants (par exemple, base + durcisseur + charges)…

La mise en œuvre d'un produit ou d'un matériau ne peut avoir lieu que si les conditions thermiques et hygrométriques d'emploi sont respectées (se reporter aux **fiches techniques, aux procédures d'exécution**). Il peut être nécessaire de **mesurer la température du support et celle de l'atmosphère ambiante ainsi que l'hygrométrie de l'air,** avant tout début de l'opération. Ces mesures doivent être renouvelées si les conditions climatiques évoluent pendant l'opération. La mise en place d'un **abri de protection** peut permettre d'éviter des variations trop rapides de la température du support.

5.9.4 RÉALISATION DE L'OPÉRATION

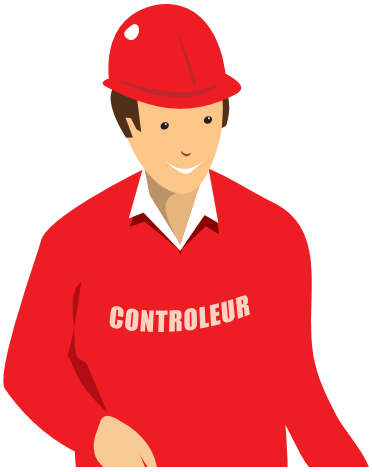
La réalisation d'une opération, sauf disposition contraire du marché, ne peut avoir lieu sans un accord formel du maître d'œuvre (POINT D'ARRÊT).

La levée du **POINT D'ARRÊT** est conditionnée à la validation par le **maître d'œuvre des épreuves de convenance et des contrôles** effectués lors de la préparation de l'opération (produits, matériaux, matériel et personnel).

L'opération est préparée et réalisée avec les essais et contrôles prévus conformément aux dispositions de la **procédure correspondante,** qui reprend les dispositions du **marché** mais, aussi, celles des fiches techniques des produits, les prescriptions des fascicules du CCTG, des normes en vigueur, des guides (tous documents rendus contractuels ou acceptés par le **maître d'œuvre**). **Le document de suivi** correspondant est rempli au fur et à mesure de l'avancement des opérations.

5.9.5 TRAVAUX DE FINITION

Des travaux de finition (reprise des petites imperfections, ravalement des pierres tendres, ragrément des pierres dures, nettoyage des surfaces…) doivent souvent être effectués après la mise en œuvre d'une méthode de réparation et/ou renforcement. Ces travaux de finition, après avoir été exécutés, sont acceptés par le **maître d'œuvre** qui autorise la poursuite des opérations suivantes.



5.10.1 GÉNÉRALITÉS

La consistance des essais, de l'épreuve d'étude, de l'épreuve de convenance et des contrôles de réception et d'exécution est fixée par le marché qui complète en tant que de besoin les dispositions des guides «Maçonnerie». Elle est reprise dans les **procédures et les cadres des documents de suivi du Plan d'Assurance de la Qualité (PAQ).**

Parmi les contrôles, la plupart relèvent du **contrôle interne,** voire du **contrôle externe** à l'entreprise et les autres du **contrôle extérieur.**

Normalement, le marché comporte un cadre de PAQ imposant une liste minimale de procédures et de cadres de documents de suivi à fournir ainsi que le nombre minimal des essais et contrôles à effectuer. L'entrepreneur complète ce cadre dans son offre, en tant que de besoin, pour constituer une partie de son **PAQ.**

Les opérations du **contrôle extérieur** relèvent des exigences du **maître d'ouvrage** en matière d'assurance de la qualité. Elles ne sont donc pas développées dans le présent guide. **Le marché doit cependant traiter de celles qui peuvent interférer avec la marche du chantier** (certaines opérations peuvent nécessiter un arrêt partiel ou total du chantier. Par exemple, pendant l'intervention d'un géomètre, il faut empêcher les chocs et les vibrations).

Les opérations de contrôle externe à l'entreprise peuvent être demandées par le **marché** ou être proposées par **l'entrepreneur** dans le cadre de sa démarche qualité. Elles ne sont pas développées dans le présent guide.

> Les essais et contrôles à effectuer par l'entrepreneur lors d'une opération réparation et/ou renforcement peuvent être rattachés aux cinq catégories suivantes :

a. **l'épreuve d'étude** (concerne normalement les produits et matériaux mais peut aussi concerner une technique innovante) ;

b. **les contrôles de réception des produits et matériaux ;**

c. **l'épreuve de convenance ;**

d. **les contrôles d'exécution ;**

e. **la réception des travaux**

Les exigences de contrôle développées dans les documents de référence (DTU, fascicules du CCTG, normes, guides…) et qui se rapportent, soit au **domaine du bâtiment,** soit à celui **du génie civil,** sont, en général, hétérogènes. Les **guides «Maçonnerie»,** en traitant des différentes méthodes de réparation et/ou renforcement, explicitent les stipulations des différents textes à caractère normatif et les complètent, si besoin est.

5.10.2 ÉPREUVE D'ÉTUDE

> ***Rappel : l'épreuve d'étude*** *fait partie des opérations du* ***contrôle interne.*** *Elle est à la charge de* ***l'entrepreneur****. Se reporter aux principes développés dans le fascicule* ***65 du CCTG*** *pour rédiger les clauses du* ***marché*** *et la définition des prestations dues.*

Normalement, les produits et matériaux conformes à une **norme** et admis à une **marque de certification reconnue,** dans le mesure où le champ d'application de celles-ci couvre les besoins du chantier ou encore fait l'objet **d'un Avis Technique, ne font normalement pas l'objet d'une épreuve d'étude.**

> Cette épreuve est cependant requise si :

- les conditions de contrôle ne sont pas adaptées ;
- les conditions de mise en œuvre du produit, en particulier la géométrie et l'orientation du support, les sollicitations imposées, les conditions climatiques et hygrométriques… ne correspondent pas à celles fixées par la norme ;
- ces produits, une fois mis en œuvre, seront soumis à des sollicitations mécaniques spécifiques ou en contact avec un milieu agressif particulier…

Les produits et matériaux non normalisés ou fabriqués sur le chantier doivent faire l'objet d'une **épreuve d'étude en laboratoire** pour s'assurer qu'ils satisfont bien aux **exigences du marché** dans les conditions de mise en œuvre prévues (température et hygrométrie en particulier).

Les résultats d'une épreuve d'étude récente (quelques mois) effectuée sur un **chantier identique** peuvent servir de référence si le **marché** l'autorise.

Dans le cas où une **épreuve d'étude** doit avoir lieu, elle est fixée par le **marché**. Sa consistance s'inspire des essais visés par les normes en vigueur et des conditions de mise en œuvre des produits.

L'acceptation de **l'épreuve d'étude** par le **maître d'œuvre** fait l'objet d'un **POINT D'ARRÊT.**

5.10.3 CONTRÔLES DE RÉCEPTION DES PRODUITS ET MATÉRIAUX

> Les contrôles à la réception d'un produit ou d'un matériau portent sur les points suivants :

- les conditions de transport (conditions de protection des produits contre la chaleur et/ou le froid) ;
- l'état des emballages (tout récipient présentant des fuites, ouvert, sans étiquette doit être refusé et immédiatement évacué du chantier) ;
- le poids des produits prédosés ;
- la comparaison entre le bon de commande et le bordereau de livraison. La concordance porte également sur les étiquettes, emballages, containers, etc., le tout en conformité avec les documents techniques et contractuels ;
- la remise d'un document attestant que le produit bénéficie bien du droit d'usage d'une marque pour les produits certifiés et, en particulier, pour le marquage CE ;
- la conformité du marquage et, en particulier, les dates de péremption des produits et les classes ou catégories des produits (niveaux de performance) ;
- l'exécution de **prélèvements conservatoires ;**
- l'exécution des **essais d'identification et/ou des essais d'efficacité** prévus au **marché** ;
- les conditions de stockage (par exemple, le local doit être équipé d'un thermomètre à maxima et minima. Dans un tel cas, la mesure de la température est à renouveler pendant la durée du chantier en fonction de l'évolution des conditions météorologiques) ;

ATTENTION : *au respect du point éclair pour certains produits.*

- etc.

Cette réception fait l'objet d'un POINT D'ARRÊT.

5.10.4 ÉPREUVE DE CONVENANCE

> ***Rappel : l'épreuve de convenance*** *relève pour partie du* ***contrôle interne*** *(personnel, matériels, matériaux, réalisation) et pour partie du* ***contrôle extérieur*** *(mesures et essais).*

Une épreuve de convenance a pour but de vérifier la conformité de l'exécution d'une opération par **l'entrepreneur** et, en particulier, la conformité de la mise en œuvre des produits et matériaux dans les conditions de réalisation des travaux. Les essais prévus au **marché** sont réalisés sur le site.

> Le marché détaille la consistance de l'épreuve de convenance de chaque méthode de réparation et/ou renforcement et fixe ce qui relève des différents contrôles (interne et extérieur voire externe). Pour une méthode donnée, l'épreuve de convenance porte sur les quatre phases suivantes :

1. la préparation de l'opération ;
2. la préparation des produits ;
3. la réalisation de l'opération ;
4. l'après réalisation de l'opération.

Les stipulations du **marché** sont reprises et complétées, si nécessaire, dans le **Plan d'Assurance de la Qualité (PAQ), les procédures et les documents de suivi.**

La réalisation des travaux ne peut commencer tant que les **épreuves de convenance** ne sont pas jugées satisfaisantes. Elles font partie du **POINT D'ARRÊT** dont la levée conditionne l'exécution des travaux.

Pour une méthode de réparation et/ou renforcement donnée, il peut y avoir **plusieurs épreuves de convenance** à réaliser. Suivant le cas, elles sont nettement séparées dans le temps ou enchaînées. Les résultats de l'ensemble de ces épreuves doivent être positifs ce qui permet au **maître d'œuvre** de prendre la décision de **lever le POINT D'ARRÊT** qui permet la réalisation des travaux.

Toute épreuve de convenance se déroule en présence du **maître d'œuvre** et/ou de son représentant qui assurent la part des opérations liées au **contrôle extérieur. L'entrepreneur** effectue son **contrôle interne** défini par **le PAQ** et les stipulations du **marché**.

L'ensemble des constatations effectuées lors des **épreuves de convenance** doit faire l'objet d'une **synthèse**, qui doit permettre de conclure sur la validité ou non des épreuves et sur les modifications éventuelles à apporter au **Plan d'Assurance de la Qualité** (procédures et document de suivi). Il appartient à **l'entrepreneur** de rédiger cette synthèse et de la remettre au **maître d'œuvre** qui, après examen, lève ou non le **POINT D'ARRÊT** relatif à l'exécution des travaux.

Les essais qui sont effectués au cours d'une ***épreuve de convenance*** sont en général identiques à ceux effectués lors des contrôles ; aussi, les guides «Maçonnerie» font les renvois nécessaires sans développer dans le détail l'épreuve de convenance relative à chaque méthode de réparation et/ou renforcement.

5.10.5 CONTRÔLES D'EXÉCUTION

Rappel : les contrôles d'exécution *relèvent pour partie du* ***contrôle interne*** *(application du PAQ, et les épreuves d'information) et pour partie du* ***contrôle extérieur*** *(surveillance de l'application du PAQ et les épreuves de conformité).*

NOTA : *les normes ne précisent que très rarement le nombre des contrôles à effectuer ni qui en est chargé. Il est donc indispensable que le* ***marché*** *précise ce qui relève du* ***contrôle interne*** *et ce qui relève du* ***contrôle extérieur.***

5.10.5.1 Généralités

Les contrôles d'exécution des travaux ont pour but de vérifier, qu'à tout instant du chantier, l'exécution des travaux est conforme aux spécifications du **marché**, complétées par les enseignements tirés des épreuves de convenance.

La consistance de ces **contrôles d'exécution** est normalement fixée par le **marché**, qui complète, si nécessaire, les dispositions du présent **guide.** Cette consistance est, en final, mise au point dans la **procédure** relative à l'opération et en tenant compte des enseignements tirés de **l'épreuve de convenance.** Sont fixés, en particulier, les types et le nombre des essais à effectuer.

> Pour une méthode de réparation et/ou renforcement donnée, les différents contrôles portent normalement sur les phases suivantes :

1. la préparation de l'opération ;
2. la préparation du support si besoin est ;
3. la préparation des produits ;
4. la réalisation de l'opération ;
5. l'après réalisation de l'opération.

Les résultats des contrôles effectués lors de l'exécution d'une opération et/ou après l'exécution de cette opération sont validés par le **maître d'œuvre.** Dans le cas où les résultats ne correspondent aux performances prescrites, les **non-conformités** détectées doivent faire l'objet d'un traitement. **L'entrepreneur** procède à la mise en conformité et propose à l'acceptation du **maître d'œuvre** les mesures correctives qu'il compte appliquer.

La levée du **POINT D'ARRÊT** avant **RÉCEPTION DES TRAVAUX** est liée à l'acceptation des résultats des différents contrôles effectués avant, pendant et après l'exécution des travaux.

NOTA : *dans la suite du présent paragraphe sont développés les **principes** à appliquer pour rédiger les clauses relatives aux **contrôles d'exécution** d'une opération de préparation d'un support en maçonnerie, aux **contrôles d'exécution** de la préparation des produits et/ou matériaux, aux **contrôles d'exécution** d'une opération de réparation et/ou renforcement d'un ouvrage en maçonnerie et aux **contrôles d'exécution** à effectuer après l'opération..*

5.10.5.2 Contrôles d'exécution relatifs à une opération de préparation du support

> Les contrôles d'exécution relatifs à la préparation de l'opération de traitement du support portent sur les points suivants :

- la validation par le **maître d'œuvre de l'épreuve de convenance** de préparation du support,
- l'acceptation par le **maître d'œuvre de la procédure et des cadres des documents de suivi** relatifs à l'opération,
- l'existence des documents donnant de **l'état de surface du support relevé contradictoirement** (avec les résultats des essais effectués à cette occasion) et de l'état de surface à obtenir. Ces documents sont à annexer à **la procédure,**
- la mise en place des moyens d'accès et leur contrôle, suivant leur importance et si nécessaire, par les organismes habilités et en particulier le **coordonnateur SPS,**
- la mise en place des dispositifs de protection pour assurer la préservation de l'environnement, la sécurité et la santé des usagers et des tiers,
- la mise en place des dispositifs de protection pour éviter la pollution par la poussière, les salissures… des surfaces déjà traitées,
- l'approvisionnement, la mise en place et la vérification du bon état, du bon fonctionnement et de l'étalonnage (si besoin est) du matériel nécessaire à l'opération,
- l'approvisionnement des matériaux et produits et la validation des contrôles de leur réception,
- la présence des **fiches techniques** et des **fiches de données de sécurité** des produits à utiliser ;

- la présence d'un **personnel qualifié et informé des travaux à effectuer,** ainsi que des consignes à respecter conformément à la **procédure,**
- la présence des équipements d'hygiène et de sécurité collectifs ou individuels,
- la présence des instruments nécessaires aux mesures, contrôles et essais à effectuer,
- la présence, si besoin est, du **laboratoire** chargé des contrôles et des essais,
- le constat que les conditions climatiques permettent d'effectuer l'opération,
- etc.

> Les contrôles de réception du support après sa préparation portent sur les ponts suivants :

- pour la réception du support, le contrôle porte sur l'aspect visuel de la surface traitée et sur le son franc que rend le support à un sondage sonique au marteau. Ces deux tests subjectifs peuvent être complétés par des essais in situ ou en laboratoire en fonction de l'origine des désordres et de la méthode de réparation à mettre en œuvre,
- le contrôle s'assure également que la méthode de nettoyage (brossage, aspiration, soufflage, lavage, et.), après la préparation du support est compatible avec l'état du support sec ou humide imposé par la notice technique du produit ou système à appliquer, ainsi que par les normes ou les documents à caractère normatif. Ce contrôle comporte donc aussi un examen visuel des surfaces nettoyées…

ATTENTION, *il peut y avoir besoin* ***de contrôler une première fois le support*** *avant la réparation puis, une* ***seconde fois,*** *après réparation, celle-ci nécessitant un second nettoyage.*

5.10.5.3 Contrôles d'exécution lors de la préparation des produits et matériaux

> Cas de la préparation de produits prêts à l'emploi à base de résines de synthèse ou de liants hydrauliques modifiés par des résines de synthèse :

- les exigences en matière de température et d'hygrométrie,
- le respect des règles de sécurité liées aux fiches techniques,
- l'étiquetage des pots ou des bidons pour vérifier que le produit est bien celui à mettre en œuvre (nature et couleurs) et que la date de péremption n'est pas dépassée,
- la présence des composants nécessaire à l'élaboration du produit ou système de protection ([base + durcisseur] ou [résine en émulsion + charges] pour les bicomposants, [base + durcisseur + charges] pour les tricomposants…),

- la qualité apparente des différents composants à l'ouverture des récipients,
- le transvasement de la totalité des composants dans le récipient réservé au mélange (en général celui qui contient la base), dans **l'ordre fixé par la fiche technique.** Toute erreur à ce niveau risque d'entraîner un défaut de durcissement du produit et la perte de ses performances,
- l'outil de mélange des composants, qui doit être identique ou le même que celui utilisé durant l'épreuve de convenance (même puissance, même vitesse…) afin de minimiser l'inclusion de bulles d'air, l'échauffement du mélange,
- le temps de mélange,
- l'homogénéité du produit (absence de grumeaux) et de sa teinte à la fin du mélange,
- le temps de mûrissement avant utilisation,
- la réalisation des prélèvements qui peuvent être nécessaires pour effectuer les essais liés aux usages des produits (injection, collage, ragréage…),
- etc.

> Cas de la préparation des produits à base de liants hydrauliques prêts à l'emploi :

- le respect des règles de sécurité liées aux fiches techniques,
- l'étiquetage des sacs pour vérifier que le produit est bien celui à mettre en œuvre (nature et couleur) et que la date de péremption n'est pas dépassée,
- la qualité apparente du produit à l'ouverture du sac (absence de mottes…),
- la machine de malaxage des composants, qui doit être identique ou la même que celle utilisée durant l'épreuve de convenance (même capacité, même puissance, même vitesse…) afin d'obtenir le malaxage requis,
- la vérification que tous les composants nécessaires ont été introduits dans l'auge (malaxage ou avec un mélangeur à hélice) ou la cuve (malaxage mécanique) affectée au mélange, dans l'ordre et en respectant les quantités conformément à la **procédure d'exécution** (normalement, les produits prêts à l'emploi sont prédosés et la totalité de la charge du sac ou du récipient doit être utilisée conformément à la fiche technique),
- la quantité d'eau ajoutée, qui doit être celle prévue dans la fiche technique (la température de l'eau est à vérifier, si nécessaire),
- le temps de malaxage,
- l'homogénéité du produit (absence de grumeaux) et de sa teinte à la fin du mélange,
- la réalisation des prélèvements qui peuvent être nécessaires pour effectuer les essais liés aux usages des produits (injection, collage, ragréage…),
- etc.

> Cas de la préparation des produits fabriqués sur le chantier (il faut ajouter à la liste ci-devant) :

- l'état et l'étalonnage des moyens de pesée,
- la vérification que les adjuvants nécessaires ont été introduits en respectant les quantités fixées dans la **procédure d'exécution,**
- etc.

5.10.5.4 Contrôles d'exécution d'une opération de réparation et/ou de renforcement

> Les contrôles d'exécution relatifs à la préparation de l'opération portent sur les points suivants :

- la présence et la prise de connaissance de tous les documents nécessaires (procédure d'exécution, documents de suivi, fiches techniques et de sécurité des produits et systèmes, modes d'emploi et d'entretien des matériels…),
- le constat de la réalisation des opérations préalables : **l'épreuve de convenance** de préparation du support et la préparation du support…,
- l'acceptation par le **maître d'œuvre** du support après sa préparation et des contrôles correspondants,
- l'acceptation par le **maître d'œuvre** de la **procédure** et des **cadres des documents de suivi** relatifs à l'opération,
- la mise en place des moyens d'accès et leur contrôle, suivant leur importance et si nécessaire, par les organismes habilités et, en particulier, le **coordonnateur SPS,** voire le **chargé des ouvrages provisoires (COP),**
- la mise en place des dispositifs de protection pour assurer la préservation de l'environnement, la sécurité et la santé des usagers et des tiers,
- la mise en place des dispositifs de protection pour éviter la pollution par la poussière, les salissures… des parties en cours de traitement ou déjà traitées,
- l'approvisionnement, la mise en place et la vérification du bon état, du bon fonctionnement et de l'étalonnage (si besoin est) du matériel nécessaire à l'opération,
- l'approvisionnement des matériaux et produits,
- la présence des **fiches techniques** et des **fiches de données de sécurité** des produits à utiliser ;
- la présence d'un **personnel qualifié** et i**nformé des travaux à effectuer** ainsi que des consignes à respecter conformément à la **procédure**,

- la présence des équipements d'hygiène et de sécurité collectifs ou individuels,
- la présence des instruments nécessaires aux mesures, contrôles et essais à effectuer,
- la présence, si besoin est, du **laboratoire** chargé des contrôles et des essais,
- la vérification que toutes les personnes pouvant se trouver dans l'environnement du chantier ont été informées des consignes de sécurité à respecter,
- la constatation du respect des exigences en matière de température et d'hygrométrie de l'atmosphère et du support. Ces mesures sont, si nécessaire, à renouveler durant les travaux en cas de changement climatique. Les moyens de protection contre les précipitations, l'ensoleillement direct… doivent être disponibles sur le chantier et mis en œuvre, si nécessaire,
- etc.

> Les contrôles d'exécution relatifs à l'exécution de l'opération portent sur les points suivants :

Quelle que soit la méthode de réparation ou de renforcement mise en œuvre, les points suivants doivent faire l'objet de contrôles :

NOTA : **les contrôles sont à adapter à la technique mise en œuvre** *(reconstruction de maçonnerie, pose de tirants d'enserrement, rejointoiement…).*

- le respect des règles de sécurité,
- le respect des dispositions de la **procédure d'exécution (PAQ),** des **fiches techniques** et des **fiches de données de sécurité (FDS),**
- l'humidification préalable du support si besoin est,
- le respect des délais minimaux entre certaines phases de travaux (temps de mûrissement ou de durcissement de produits et/ou matériaux),
- le suivi de l'évolution des conditions thermiques et hygrométriques de l'atmosphère et du support (zone d'application soumise à un ensoleillement direct, arrivée de la pluie et/ou du vent, baisse de la température…) et les dispositions prises pour en réduire les effets (mise en place de protection, arrêt de chantier…),
- la protection contre la poussière, les salissures en provenance de la préparation de surface d'une autre zone,
- l'arrêt de l'exploitation de l'ouvrage si les vibrations sont incompatibles avec l'application des produits et/ou matériaux,
- les dispositions appliquées en cas d'incident de chantier (panne de matériel, mauvaise mise en œuvre…),
- la gestion des **documents de suivi.** Les défauts d'exécution doivent faire l'objet d'un relevé sur plans,

- les précautions prises, en particulier pour éviter les reprises visibles lors des interruptions de mise en œuvre (pause déjeuner, fin de journée…),
- les essais et prélèvements à effectuer,
- les quantités de produits et/ou matériaux utilisés,
- la durée des différentes phases d'une opération,
- le personnel affecté à l'opération,
- le rendement obtenu (par exemple, au m^2),
- etc.

5.10.5.5 Contrôles après l'exécution d'une opération de réparation et/ou de renforcement

> Les contrôles relatifs à la phase postérieure à l'exécution de l'opération de réparation et/ou renforcement portent sur les points suivants :

- l'exploitation des prélèvements et essais de performance effectués,
- l'exploitation des documents de suivi,
- les travaux de reprise des imperfections,
- la réalisation des travaux de finition,
- etc.

À la fin de l'opération, le **maître d'œuvre** valide ou non les travaux effectués, validation nécessaire à la réception de l'ensemble des travaux.

5.11 Réception des travaux

La réception des travaux, dans le cadre de la législation en vigueur, obéit aux exigences du maître d'ouvrage, qui en fixe la consistance et le calendrier dans le **marché.**

À la fin des travaux, **l'entrepreneur** remet au **maître d'œuvre** l'ensemble des essais réalisés ainsi que l'ensemble du documents **du PAQ,** même si le **marché** a prévu qu'une photocopie de ces documents soit remise au **maître d'œuvre** au fur et à mesure de l'exécution (facilité d'organisation du **contrôle extérieur** et sauvegarde de sécurité des documents).

Parmi les documents, doivent figurer les plans sur lesquels toutes les réparations doivent avoir été reportées, ainsi que les résultats des essais effectués et interprétés.

Si les travaux concernent une **réparation structurale** ou un **renforcement structural,** la **réception des travaux** nécessite de vérifier que la reprise des efforts est assurée par la structure. **Le marché** doit donc spécifier les essais à effectuer pour en apporter la preuve.

6

Opérations connexes aux travaux de réparation et/ou renforcement

6.1 Conception des étaiements nécessaires aux travaux
6.2 Choix des produits et matériaux : pierres, briques, mortiers et composants
6.3 Dévégétalisation
6.4 Les méthodes de nettoyage et de préparation des parements et parois en pierre naturelle et brique
6.5 Nettoyage final

6.1 Conception des étaiements nécessaires aux travaux

Se reporter à **l'annexe 3** (FABEM 6.4) qui détaille la réalisation des étaiements et cintres provisoires.

> Il y a lieu de distinguer :

- les matériaux de base (pierres, briques, mortiers…) ;
- les autres produits et matériaux.

Ce paragraphe porte uniquement sur les **matériaux de base constitutifs de la maçonnerie** (pierres, briques, mortiers et ses composants).

Les autres produits et matériaux utilisés lors de la mise en œuvre d'une technique de réparation et/ou renforcement donnée sont traités dans le paragraphe correspondant à cette technique.

6.2.1 MATÉRIAUX DE BASE

6.2.1.1 Pierre naturelle

6.2.1.1.1 Documents de référence (pour mémoire)

- la normalisation européenne comportant un certain nombre de normes harmonisées relatives aux produits qui servent de base au **marquage CE** auquel s'ajoutent un grand nombre de **normes d'essai ;**
- quelques **normes françaises** destinées à expliciter l'emploi des normes européennes relatives aux produits ;
- **les documents techniques unifiés** (DTU 20.1 et DTU 26.1) ;
- **les fascicules du CCTG** (29, 31, 32 et 64).

> Principales normes d'essai relatives à la durabilité des pierres naturelles :

- **NF B 10-601 :** Produits de carrière – Pierres naturelles – Prescriptions générales d'emploi des pierres naturelles ;
- **NF EN 1925 :** Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité ;
- **NF EN 1936 :** Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination des masses volumiques réelles et apparentes et des porosités ouvertes et totales ;
- **NF EN 12370 :** Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la résistance par un essai de cristallisation des sels ;
- **NF EN 12371 :** Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la résistance au gel ;
- **NF EN 13755 :** Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de l'absorption d'eau à la pression atmosphérique ;

- **NF EN 13919 :** Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la résistance au vieillissement accéléré au SO2 en présence d'humidité ;
- **NF EN 14147 :** Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la résistance au vieillissement accéléré au brouillard salin ;
- **NF EN 14579 :** Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la vitesse de propagation du son ;

Note du rédacteur : *il n'est pas facile de se retrouver dans* ***le maquis de la normalisation européenne,*** *dont* ***la logique de numérotation*** *est loin d'être évidente (on trouve des méthodes d'essai relatives aux pierres naturelles dans la série des normes* ***772-**** *mais aussi dans la série 19** *et encore dans la série* ***123**,*** *etc.). De plus, certaines normes semblent jouer les doublons (par exemple : la norme* ***NF EN 772-1 :*** *Méthodes d'essai pour éléments de maçonnerie - Partie 1 : Détermination de la résistance à la compression et la norme* ***NF EN 1926 :*** *Méthodes d'essai pour éléments de maçonnerie – Détermination de la résistance à la compression !).*

Pour y voir plus clair, *il est possible de télécharger sur* ***le site du CTMNC*** *un document intitulé :* ***Principales exigences techniques applicables aux produits de construction en pierre naturelle.***

6.2.1.1.2 Différentes origines

Roche magmatique

Roche formée par le refroidissement et la solidification du magma (roches en fusion), comme par exemple le granite, le basalte, la diorite, le porphyre, etc.

Roche sédimentaire

Roche formée par le dépôt et la solidification de sédiments d'origine organique ou minérale, comme par exemple le calcaire, le grès, le travertin, etc.

Roche métamorphique

Roche provenant de masses de roches préexistantes transformées par l'action de la température et de la pression, comme par exemple le schiste, le gneiss, le quartzite, le marbre, etc.

6.2.1.1.3 Critères de qualité

La normalisation européenne dans le domaine des pierres naturelles a conduit à l'élaboration de plusieurs normes de produits dites **harmonisées** - car elles permettent l'apposition du **marquage CE** sur ces produits – à savoir, par exemple : pour les pierres massives la norme **NF EN 771-6 :** Spécifications pour éléments de maçonnerie – Partie 6 : éléments de maçonnerie en pierre naturelle.

Le marquage CE indique la conformité du produit aux seules exigences essentielles définies dans **l'annexe ZA** de ces normes harmonisées pour une utilisation donnée (il est rappelé qu'il ne s'agit pas d'une marque de qualité et que les **niveaux de performance requis** pour un usage donné doivent être fixés par le **marché**).

La norme française NF B 10-601 vient à l'appui de ces différentes normes européennes en précisant les prescriptions générales d'emploi des pierres naturelles et les conditions de réception applicables aux fournitures.

ATTENTION, la norme NF B 10-601 *n'impose pour* ***l'aptitude à l'emploi*** *des pierres naturelles massives d'épaisseur > 80 mm qu'un nombre réduit d'exigences qui portent sur la résistance à la compression, la capillarité, la gélivité. Des exigences supplémentaires, comme la résistance à la flexion, sont à exiger pour les revêtements de sols usuels ou de voirie.*

Il appartient au ***marché,*** *en fonction de la* ***destination de l'ouvrage*** *et de sa* ***localisation géographique,*** *de fixer, si besoin est, des* ***exigences complémentaires.*** *Il est possible de citer, comme exemple, le vieillissement vis-à-vis d'un brouillard salin ou de l'anhydride sulfureux [SO_2])*

> De plus, il faut noter les documents de mise en œuvre :

- dans le domaine du bâtiment : la norme **NF P 10-202** (référence DTU 20.1) : Travaux de bâtiment - Ouvrages en maçonnerie de petits éléments – parois ;
- dans le domaine du génie civil le **fascicule 64 du CCTG :** Travaux de maçonnerie d'ouvrages de génie civil.

A titre indicatif, est donné, ci-après, le tableau des **prescriptions générales d'emploi des pierres naturelles massives d'épaisseur ≥ 80 mm** (les autres tableaux de la norme traitent des revêtements minces attachés…).

Destination dans l'ouvrage	Essais d'aptitude à l'emploi	Référence de la norme correspondante	Prescriptions applicables
Élévation en partie courante, sans possibilité de rejaillissement	Capillarité	NF EN 772-11	$C_{w.s}$ (parallèle au lit) a)
	Gélivité	NF EN 12371	A, B et C aucune - D ≥ 12 cycles
	Compression	NF EN 772-1	Dimensionnement b)
Assise de rejaillissement c) **Appui de fenêtre d)**	Gélivité	NF EN 12371	A ≥ 12 cycles
			B ≥ 12 cycles
			C ≥ 24 cycles
			D ≥ 48 cycles

Destination dans l'ouvrage	Essais d'aptitude à l'emploi	Référence de la norme correspondante	Prescriptions applicables
Console c)	Compression	NF EN 772-1	Dimensionnement b)
	Gélivité	NF EN 12371	A ≥ 12 cycles
			B ≥ 12 cycles
			C ≥ 24 cycles
			D ≥ 48 cycles
Corniche d) **Couronnement d)**	Gélivité	NF EN 12371	A ≥ 36 cycles
			B ≥ 48 cycles
			C ≥ 96 cycles
			D ≥ 96 cycles
Main courante d) **Bandeau d)**	Gélivité	NF EN 12371	A ≥ 12 cycles
			B ≥ 24 cycles
			C ≥ 48 cycles
			D ≥ 96 cycles
Soubassement e)	Capillarité	NF EN 772-11	$C_{w.s}$ (perpendiculaire et parallèle au lit) ≤ 130 g/m².s ^{0,5}
	Gélivité	NF EN 12371	A ≥ 36 cycles
			B ≥ 36 cycles
			C ≥ 48 cycles
			D ≥ 96 cycles
	Compression	NF EN 772-1	Dimensionnement b)
Dalle massive de balcon d) f) g)	Gélivité	NF EN 12371	A ≥ 96 cycles
			B ≥ 96 cycles
			C ≥ 96 cycles
			D ≥ 144 cycles
Pile de pont g)	Gélivité	NF EN 12371	A, B, C, D ≥ 144 cycles
Gargouille g)	Gélivité	NF EN 12371	A, B, C, D ≥ 144 cycles

a) Pour calculer l'épaisseur d'un mur selon le critère de capillarité Cws (parallèle au lit), se reporter à la norme NF P 10-202 (référence DTU 20.1

b) Selon la norme NF P 10-202-2 (référence DTU 20.1).

c) Assise de rejaillissement : toute pierre dont le chant inférieur est à moins de 15 cm au-dessus d'une surface en saillie (autre que le sol).

d) S'il est prévu une protection métallique réalisée selon les normes appropriées de la sous-classe P 34, il n'y a pas d'exigence de gélivité.

e) Soubassement : toute pierre dont le chant inférieur est à moins de 15 cm du sol fini.

f) Les dalles porteuses font l'objet d'une justification particulière lors de leur conception.

g) Un cahier des charges doit préciser les essais mécaniques nécessaires.

Tableau n° 5 : prescriptions générales d'emploi pour les pierres naturelles massives d'épaisseur ≥ 80 mm

> **Les lettres A, B, C et D correspondent aux zones de gel suivant la localisation géographique de l'ouvrage. L'annexe A de la norme liste les cantons de tous les départements français avec le niveau de gel :**

- A gel très faible (pas plus de 2 jours en dessous de –5°C) ;
- B gel faible (pas plus de 4 jours en dessous de –6°C) ;
- C gel modéré (pas plus de 10 jours en dessous de –10°C) ;
- D gel sévère (plus de 10 jours en dessous de –10°C).

ATTENTION, *en carrière, les* ***pierres sont saturées d'eau.*** *Si elles ne sont pas* ***stockées à l'abri de la pluie un certain temps avant emploi*** *de façon à ce que leur* ***teneur en eau descende en dessous de leur teneur en eau critique*** *(comprise entre 65% et 100% de leur teneur en eau de saturation), elles peuvent être sensibles au gel.*

Dans le domaine du bâtiment, le DTU 20.1 indique les valeurs des contraintes limites de compression sous les charges centrées ou excentrées ainsi que dans les zones de concentration de contraintes (appui d'une poutre).

Dans le domaine du génie civil, il appartient au **marché** de fixer les exigences, comme la résistance en compression… Pour les ponts et murs de soutènement très exposés à l'environnement et à l'eau, il est préférable de fixer les exigences les plus sévères en matière de gélivité.

6.2.1.1.4 Compatibilité entre le mortier de scellement ou produit de rejointoiement à base de ciment et la pierre naturelle

> **Cette compatibilité peut être mesurée par un essai dit de «Venuat» décrit ci-après :**

ESSAI DE COMPATIBILITE ENTRE MORTIER DE SCELLEMENT OU PRODUIT DE JOINTOIEMENT A BASE CIMENT ET PIERRE NATURELLE

A.1 OBJET

Apprécier le risque de tachage entre les pierres naturelles et mortier (ou le produit de jointoiement) destiné à leur pose.

NOTE : *il est reconnu, en effet, que les alcalins actifs éventuellement contenus dans le mortier ou le produit de jointoiement peuvent, par capillarité à l'intérieur de ces pierres naturelles, réagir avec les matières organiques contenues dans ces pierres en formant des taches d'intensité variable.*

A.2 PRINCIPE DE L'ESSAI

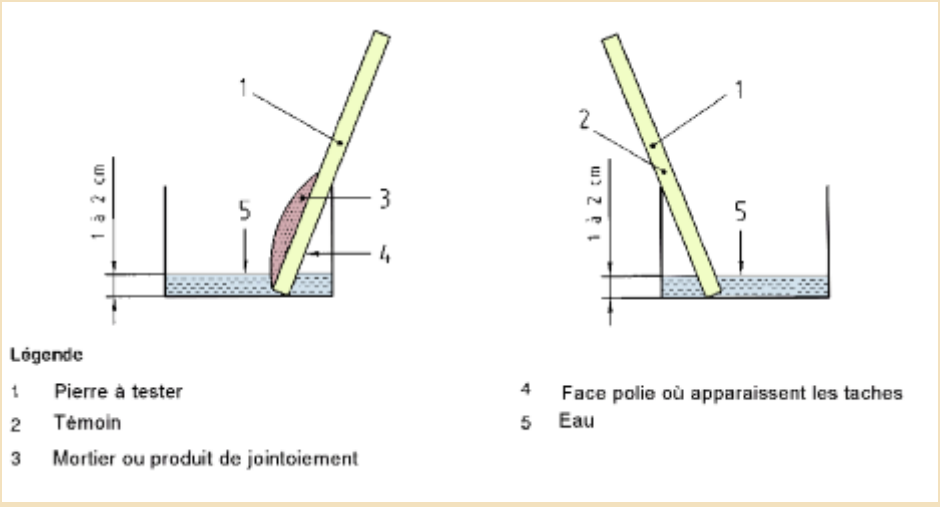
Accélérer le processus de migration des alcalis solubles en soumettant les éprouvettes d'essai à une remontée d'humidité capillaire suivie d'un conditionnement à la chaleur.

A.3 CONFECTION DE L'ÉPROUVETTE D'ESSAI

L'éprouvette d'essai est constituée par la dalle au dos de laquelle le mortier ou le produit de jointoiement est appliqué en épaisseur de 8 à 10 mm. Le mortier ou le produit de jointoiement est réparti sur la demi-surface inférieure de l'éprouvette.

A.4 MODE OPÉRATOIRE

L'éprouvette d'essai est trempée conformément au schéma ci-après dans un bac, puis l'ensemble du bac et de l'éprouvette est disposé dans une étuve ventilée à 60 °C pendant 15 jours au plus.



Légende

1 Pierre à tester
2 Témoin
3 Mortier ou produit de jointoiement
4 Face polie où apparaissent les taches
5 Eau

Figure n° 33 : schéma de principe de l'essai de tachabilité

Une éprouvette témoin de la même pierre, sans mortier ou produit de jointoiement, subit le même cycle d'essai dans un autre bac placé en étuve dans les mêmes conditions.

A.5 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Si après 15 jours d'un tel conditionnement aucune tache (en comparaison avec l'éprouvette témoin) n'apparaît, le mortier ou le produit de jointoiement peut être considéré comme ne réagissant pas avec le type de pierre expérimenté.

6.2.1.1.5 Caractéristiques d'aspect - échantillon contractuel

Remarque importante : *le* ***CTMNC*** *a pour projet une* ***«lithothèque»*** *rassemblant, pour la France entière, toutes les roches ornementales avec leur couleur, leur texture ainsi que leurs caractéristiques physiques, techniques et leur domaine d'utilisation.*

Pour éviter les litiges sur les problèmes d'aspect, sachant que la pierre, matériau naturel, peut présenter des variations de couleur, de veinage ou de texture, la norme **NF B 10-601** définit les caractéristiques générales d'aspect au moyen d'un **échantillon contractuel.**

«**Cet échantillon contractuel** doit comprendre un nombre suffisant, au moins trois, d'éléments en pierre indiquant les principales variations d'aspect du produit fini. Ces variations concernent notamment la couleur, le veinage, la structure, la texture, la finition, etc.

La surface de chacun de ces éléments doit être comprise entre 200 cm^2 et 2 000 cm^2. L'échantillon contractuel doit être fourni au **client (l'entrepreneur)** pour montrer les principales caractéristiques d'aspect propres au matériau proposé, telles que trous, géodes, crapauds, mouchetures, flammes, fossiles, verriers, taches de rouille, veines, etc.».

Le marché fixe le nombre et les caractéristiques des éléments constitutifs de l'échantillon contractuel en fonction de la **destination de l'ouvrage** (emplacement des éléments de maçonnerie dans la structure) et de sa **localisation géographique** (risque de gel).

REMARQUE : *la présence de milieux agressifs (bord de mer, eaux séléniteuses…), imposent des exigences supplémentaires.*

> L'échantillon contractuel doit être accompagné d'une fiche de caractérisation qui doit être mise sur demande à disposition du client (l'entrepreneur) (un modèle figure dans l'annexe E de la norme). Cette fiche porte sur les points suivants :

- l'origine de la pierre (voir l'article 4.2.1 de la norme) ;
- les valeurs des essais d'identité d'une validité de 2 ans :
  - résistance à la flexion sous charge centrée ;
  - masse volumique apparente et porosité ouverte moyenne ;
- les essais d'aptitude à l'emploi d'une validité de 10 ans (article 4.2.4 et tableaux de la norme) :
  - résistance à la compression :
  - capillarité ;
  - gélivité ;
  - etc.

> De plus, sur chaque élément doivent être indiqués :

- le nom du fournisseur ;
- le nom commercial de la pierre ;
- la signature des parties contractantes ;
- la date de cette signature.

6.2.1.1.6 Travail et traitement de la pierre

La norme NF B 10-101 Pierres naturelles-Vocabulaire donne les définitions des finitions de parement. À titre indicatif voici ci-dessous (liste non exhaustive) des définitions de traitements de surface de la pierre.

Finition	Aspect
Adoucie	Surface unie, très finement rayée, rayures non visibles à l'œil nu.
Bossagée	Gros éclats formant une saillie bombée. Gros éclats de formes et de saillies diverses semés irrégulièrement de quelques traces de percussion allongées. Profondeur des traces : quelconque. Espacement des points : 5 à 15 cm. L'aspect final est grossièrement bombé.
Bouchardée (points de meurtrissures) : a) à 16 dents b) à 25 dents c) à 64 dents d) à 100 dents	Nombreux points ronds de meurtrissures disposés en quadrillage empiétant l'un sur l'autre. Ces point ont une largueur de 1 à 3 mm. Ces points ont une profondeur entre creux et bosses de 1 à 3 mm. Espacement à 16 dents (a) : 3 à 12 mm. Espacement à 25 dents (b) : 2 à 9 mm. Espacement à 64 dents (c) : 2 à 5.5 mm. Espacement à 100 dents (d) : 1 à 4 mm. Les points de meurtrissures sont sommairement alignés en des directions approximativement parallèles aux arêtes ou légèrement en courbe.
Brochée (longues traces creuses parallèles)	Longs sillons parallèles séparés par des bandes en relief de cassures d'éclatement très grossières. Ces sillons ont : Une largeur : 5 à 10 mm. Une longueur : indéfinie. Une profondeur entre creux et bosses : 15 à 20 mm. Un espacement : 4 à 8 cm. Chaque sillon est constitué de traces profondes pouvant être discontinues et dont le dessin général est droit ou légèrement courbe. Ces sillons sont grossièrement parallèles et vont d'un bord à l'autre de la face dans une direction sensiblement à 45° des arêtes.
Ciselée	Bande plus ou moins rugueuse, taillée au ciseau éventuellement pour former un bord de face. Les fonds des creux d'une ciselure sont sensiblement à la cote spécifiée pour la face dont elle fait partie. Toutes les tailles précédentes peuvent être exécutées avec ciselure en complément.
Eclatée : gros éclats	Gros éclats, bosses et creux de formes diverses.
Egrisée ou Egresée : surface unie, finement rayée	Surface unie, couverte cependant de fines rayures de direction quelconque et d'une profondeur de 0.1 à 0.2 mm.
Pointée : a) par traits b) par points (aussi clouée) (gros traits ou points de percussion isolés)	Gros creux de percussion semés irrégulièrement parmi des cassures d'éclatement en relief et grossières. Ces creux de forme un peu allongée (a) ou ronde (b) ont : Une largeur : 3 à 8 mm. Une longueur : 3 à 30 mm Une profondeur entre creux et bosses : 2 à 20 mm. Un espacement entre creux et bosses : 10 à 50 mm. Lorsque les creux sont allongés, ils peuvent être de même direction ou de direction diverses.

Finition	Aspect
Polie (surface brillante)	Surface unie brillante, sans rayures apparentes, formant miroir.
Ravalée (surface unie, un peu rayée) : a) à dents b) sans dents	Surface unie couverte de petits creux et de rayures de direction quelconque et d'une profondeur de 0.5 à 1 mm. Si le rabot est à dents, la surface présente, de plus, des raies parallèles de longueur et direction quelconques espacées de 3 à 4 mm et d'une profondeur d'environ 1 mm.
Sciée (surface relativement plane, éventuellement striée) : a) à lames b) au fil c) à dents d) au disque	Surface relativement plane couverte de très petits creux et pouvant comporter de petites ondulations ou décrochements. Profondeur des creux : 0.5 à1.5 mm. Ondulations ou décrochements ne s'écartant pas du plan général du parement de plus de : - Sciée à lames (a) : 2 mm. - Sciée au fil (b) : 5 mm. - Sciée à dents (c) : 5 mm. - Sciée au disque (d) : 2 mm. La surface peut avoir un gauche allant jusqu'à 8 mm en plus ou en moins suivant ses dimensions plus ou moins grandes.
Smillée (courtes traces parellèles obliques)	Traces courtes, nombreuses, parallèles, séparées par de petites cassures d'éclatement. Ces traces ont : Une largeur : 1 à 5 mm. Une longueur : 5 à 25 mm. Une profondeur entre creux et bossese : 2 à 7 mm. Un espacement entre creux et bosses : 5 à 20 mm. Le dessin général de ces traces discontinues est droit ou légèrement courbe et va d'un bord à l'autre de la face dans une direction sensiblement à 45° des arêtes.
Talotée (gros points de meurtrissures)	Groupes en nombes variés de gros points ronds de meurtrissures diversement espacées entre cassures d'éclats. Ces points ont : Une largeur : 2 à 4 mm. Une profondeur entre creux et bosses : 1 à 4 mm. Un espacement entre creux et bosses : 3 à 20 mm.

Tableau n° 6 : traitements de surface des pierres

Photo n° 52 : pierre clivée *(crédit photo Anjougranitimport)*

Photo n° 53 : finition smillée *(crédit photo D. Poineau)*

Photo n° 54 : finition bossagée *(crédit photo D. Poineau)*

Photo n° 55 : finition sciée *(crédit photo D. Poineau)*

Photo n° 56 : finition brochée *(crédit photo D. Poineau)*

6.2.1.1.7 Réception des produits en pierre naturelle

Les conditions de réception des produits en pierre naturelle et du marquage CE relèvent de la norme française homologuée **NF B 10-601 :** Produits de carrières – Pierres naturelles – Prescriptions générales d'emploi des pierres naturelles et de la norme **NF EN 771-6 :** Spécifications pour éléments de maçonnerie- Partie 6 : éléments de maçonnerie en pierre naturelle.

«Au moment de la réception, le client (l'entrepreneur) doit être en possession des deux essais d'identité datant de moins de deux ans et portant sur la nature de la pierre correspondant à la fourniture.

Si ces deux essais sont identiques, aux écarts admissibles près, à ceux de la **fiche de caractérisation,** les essais d'aptitude à l'emploi sont validés.

Si ces deux essais d'identité ne sont pas conformes à la fiche de caractérisation, **le fournisseur** doit refaire les essais d'aptitude à l'emploi.

En cas de non-conformité de ces essais d'aptitude à l'emploi, **le fournisseur** doit reprendre à ses frais la totalité du lot contrôlé non-conforme ou convenir d'une réfection».

> Les conditions de réception portent sur les points suivants :

- le bon de livraison ;
- l'état de l'emballage ;
- le marquage CE ;
- l'aspect du matériau (comparaison visuelle de **l'échantillon contractuel** avec **l'échantillon prélevé** sur la fourniture (fonction du nombre d'unités de conditionnement et du nombre d'éléments par unité) ;
- l'évaluation de la quantité livrée ;
- la nature du matériau (en cas de doute, le contrôle de l'origine ou de la nature de la pierre fournie peut être réalisé en comparant **l'examen pétrographique** conformément à la norme **NF EN 12407** effectué sur l'échantillon témoin contractuel et celui effectué sur la fourniture) ;
- les caractéristiques géométriques.

> Sauf convention expresse, la réception se fait :

- sur le lieu de livraison lorsque le transport est à la charge du fournisseur ;
- chez le fournisseur lorsque le transport est à la charge **du client (l'entrepreneur) ;**
- **le fournisseur** informe **l'entrepreneur** de la mise à disposition de la marchandise. La date de la **réception** est alors fixée d'un commun accord dans un délai maximal de 12 jours ouvrables. Au-delà de ce délai, la fourniture sera réputée conforme.

La norme ne connaît que le fournisseur et ***le client (l'entrepreneur),*** *elle ignore le rôle du* ***maître d'œuvre*** *et du* **maître d'ouvrage. Le marché** *se doit d'imposer que* ***la réception*** *soit faite en présence du* ***maître d'œuvre*** *comme celle de tous les produits et matériaux (se reporter au paragraphe 5.10.3 ci-dessus).* ***Un POINT D'ARRÊT*** *est lié à la réception des produits en pierre naturelle.* ***Le marché*** *peut imposer des prélèvements conservatoires et des essais complémentaires.*

6.2.1.1.8 Maçonneries existantes

La classification des éléments de maçonnerie (pierres de taille, moellons d'appareils, moellons d'assise) s'effectue en fonction de leurs dimensions et du traitement de taille qu'ils subissent. En l'absence d'une normalisation, **les divers auteurs d'ouvrages sur la maçonnerie** qui se sont succédés au fil du temps ne sont pas toujours concordant sur les dimensions. Ils le sont davantage sur la taille, car les tailleurs de pierre utilisaient quasiment les mêmes outils.

Les «initiés», par le compagnonnage, savaient utiliser la pierre qu'il fallait en fonction de sa position dans la construction et du lieu géographique. Cela faisait partie **«des règles de l'art».**

Dans la réalité, les effets parfois pervers de l'adjudication, les irrégularités du financement à cause de durée des chantiers… ont parfois conduit à ériger des ouvrages qu'il a fallu rapidement réparer à cause de la mise en œuvre de pierres de qualité médiocre. Le Pont-Neuf de Paris en est un exemple célèbre.

La photo ci-après montre l'état de dégradation avancé du mortier de hourdage et des joints d'un mur en maçonnerie monté avec des **matériaux disponibles sur place :** pierre meulière faiblement caverneuse[15], sable argileux et chaux aérienne. Le mortier n'a quasiment plus de consistance et tombe en poussières alors que la pierre ne présente aucune dégradation apparente.

Photo n° 57 : mur en matériaux locaux *(crédit photo D. Poineau)*

[15] *Les pierres meulières (roche sédimentaires silico-calcaire) étaient utilisées pour la fabrication de meules. En région parisienne, la variété très décalcifiée dite « pierre meulière caverneuse » a été très couramment utilisée dans la construction de ponts, tunnels, égouts, bâtiments…*

> Avec l'arrivée de la normalisation, les règles de l'art ont été rassemblées, ce qui a permis de définir les dimensions des pierres ainsi que leur emploi préférentiel, mais aussi de les caractériser (surtout les pierres calcaires) par un certains nombre d'essais physiques :

- densité apparente ;
- porosité ;
- gélivité ;
- capillarité ;
- dureté (pierres calcaire classées de très tendres à froides).

La normalisation française a évolué et, depuis quelques années, la **normalisation européenne** s'est substituée, en partie, à la normalisation nationale.

En cas d'intervention sur un ouvrage existant, en l'absence d'un **dossier d'ouvrage** et de **plans de recollement** (c'est très souvent le cas), il est bien difficile de connaître les dimensions réelles et les caractéristiques des pierres utilisées.

Il faut donc rechercher des renseignements dans les bibliothèques en consultant les ouvrages sur la maçonnerie (se reporter à **l'annexe 1 (FABEM 6.4)**, les normes obsolètes et surtout, faire des **investigations in situ et en laboratoire.**

Pour une reconnaissance rapide, il est possible de faire quelques tests simples qui permettent d'évaluer la porosité du matériau en place avec l'aide, d'une part, d'une pointe métallique pour tester la résistance à la rayure et, d'autre part, d'un compte-goutte rempli d'eau pour tester la vitesse d'absorption de l'eau. Le tableau ci-après résume comment interpréter les résultats (ces tests sont issus d'une brochure de la société Weber et Broutin).

Dureté	Absorption de l'eau	Classification de la pierre	Porosité
La pointe crée facilement un sillon	Rapide en moins d'une seconde	Tendre	> 32%
La pointe crée une rayure	Plus lente et en quelques secondes	Semi-ferme à ferme	15 à 31%
La rayure est très fine	Limitée mais de l'eau est absorbée en quelques secondes	Dure	6 à 14%
Pas de rayure	Nulle, l'eau coule à la surface	Froide	0 à 5%

Tableau n° 7 : tests rapides d'identification des pierres

> La reconnaissance de la grosseur du grain d'une pierre peut se faire visuellement :

Classement du grain	Dimensions des grains
Gros	>1,5 mm
Moyen	0,5 à 1,5 mm
Fin	< 0,5 mm
Très fin	Non détectable (cas des pierres froides)

Tableau n° 8 : identification de la grosseur du grain d'une pierre

6.2.1.2 Brique pleine

6.2.1.2.1 Principe de fabrication

C'est un matériau céramique obtenu par la cuisson de silicate d'alumine hydraté (appelé Kaolin) contenant des impuretés et, en particulier, de l'oxyde de fer (d'où la coloration rouge). Ce Kaolin est contenu dans les argiles.

Ce matériau peut ensuite être corrigé par addition de produits divers (sables siliceux, cendres, marnes, etc.).

6.2.1.2.2 Fabrication

- triage (argile rouge, environ 90% et argile verte, environ 10% et additions) ;
- broyage ;
- humidification ;
- malaxage ;
- façonnage au moule :
  - moulage,
  - pressage,
  - démoulage,
- façonnage par extrusion :
  - filage,
  - coupe au fil ;
- séchage entre 20 et 50 heures ;
- cuisson à 900°C pendant 30 heures.

NOTA : *sur* ***le site du CTMNC*** *(Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction) il est possible de consulter un document qui détaille la fabrication de la terre cuite.*

6.2.1.2.3 Critères de qualité de la brique pleine

La normalisation européenne dans le domaine de la terre cuite a conduit à l'élaboration de plusieurs normes de produits dites harmonisées – car elles permettent l'apposition du **marquage CE** sur ces produits – à savoir, par exemple : pour les briques de terre cuite la norme **NF EN 771-1** intitulée : Spécifications pour éléments de maçonnerie Partie 1 : Briques de terre cuite.

La série des normes EN 771-* qui traite jusqu'aux pierres naturelles comporte 6 parties distinctes.

La norme NF EN 771-1 ne traite pas des formats standard des briques ni de certaines autres caractéristiques géométriques.

> **Dans le cas où des briques doivent être utilisées pour une réparation ou un renforcement, il s'agit normalement de briques de type HD : briques de masse volumique élevée conçues pour rester apparentes (non protégées), voire protégées par un enduit... Le marché, à partir des exigences de la norme européenne et du complément national (CN), doit définir les caractéristiques et performances adaptées à l'ouvrage et à son environnement à savoir :**

Clauses de la norme et/ou du CN	Clauses du marché
Type de brique LD ou HD	Imposer le type HD apparentes ou pas
Tolérances dimensionnelles – Planéité – Rectitude des arêtes	Dimensions des briques existantes relevées sur l'ouvrage
Masse volumique	Valeur à connaitre
Sans objet	Teinte (échantillons prélevés sur l'ouvrage ; prévoir des échantillons secs et d'autres saturés)
Résistance à la compression RC (voir le tableau ci-après)	À fixer en fonction des charges appliquées
Résistance aux chocs durs (CN)	Valeur à vérifier
Résistance à l'arrachement de la brique : trois catégories R_{t1} à R_{t3} (CN)	À fixer si la brique doit être enduite (consulter le **DTU26.1**)
Éclatements (CN)	Valeurs à vérifier suivant que la brique doit être enduite ou non
Propriétés thermiques	Normalement sans objet en génie civil
Durabilité : trois classes d'exposition sont proposées F_0 (exposition passive), F_1 (exposition modérée) et F_2 (exposition sévère)	Une brique destinée à rester apparente est, normalement, en classe d'exposition F_2. **Se reporter au document national CN** (la norme européenne ne fixe pas d'essai de gel-dégel)
Absorption d'eau	Valeurs à connaître pour choisir entre plusieurs produits : valeur déclarée pour la face de la brique exposée vers l'extérieur ou pour la brique qui joue le rôle de coupure capillaire
Taux initial d'absorption d'eau	Valeur à vérifier
Teneurs en sels solubles actifs (Na^+, K^+ et Mg^{2+}) : trois catégories S_0, S_1 et S_2	Fixer la catégorie en fonction de l'exposition à l'eau et choisir le **ciment** du mortier pour éviter la formation d'ettringite
Dilatation due à l'humidité	Valeur à vérifier
Durabilité vis-à-vis de la résistance du gel-dégel (CN)	Fixer la classe d'exposition (F_0 à F_2)
Réaction au feu	Si besoin est
Perméabilité à la vapeur d'eau	Valeur à vérifier si la brique est utilisée dans une construction extérieure
Efflorescences (CN)	Imposer les essais des annexes F (efflorescences à l'eau) et G (efflorescence avec le mortier de pose)

Tableau n° 9 : caractéristiques des briques

NOTA : *les exigences du complément national à la norme européenne sont suivies de (CN) dans le tableau ci-devant.*

> Teneurs en sels solubles actifs :

Si la brique n'est pas exposée aux venues d'eau (brique protégée par un enduit épais), la catégorie **S_0** peut être retenue. Dans le cas contraire, la réaction entre le sulfate en solution et le C3A du ciment entraîne la formation d'ettringite contenu en quantité dans les ciments Portland CEM. Pour éviter tout problème, il est recommandé d'utiliser un **ciment à faible teneur en C3A** (par exemple, ciment Portland résistant aux sulfates conforme à la norme **NF P 15-319**).

> Les trois classes d'exposition : F_0 (exposition passive), F_1 (exposition modérée) et F_2 (exposition sévère). Le choix de la classe se fait en fonction des conditions d'emploi de la brique :

- brique destinée à rester apparente : classe F_2, la brique doit satisfaire à l'essai de gel-dégel de l'annexe D ;
- brique destinée à être enduite : classe F_0, la brique doit satisfaire à l'essai de gel-dégel de l'annexe C ;
- brique enterrée enduite : la brique doit satisfaire à l'essai de gel-dégel de l'annexe C ;
- brique enterrée enduite ou non : la brique doit satisfaire à l'essai de gel-dégel de l'annexe D.

Classe de résistance à la compression (RC)	Résistance moyenne (MPa)
RC 100	10
RC de 10 en 10 jusqu'à RC 200	10 à 20
RC 200	20
RC 250	25
RC 300	30
RC 350	30
RC 400	40

Tableau n° 10 : classes de résistance des briques supérieures ou égales à 10MPa

6.2.1.2.4 Réception des briques en terre cuite

Il appartient au **marché** à fixer les conditions de réception des briques sur le chantier, les prélèvements conservatoires, les essais d'identification et de performance. Il est possible de s'appuyer sur **l'annexe A** normative de la norme **NF EN 771-1** qui traite de l'échantillonnage pour les essais de lots indépendants.

6.2.1.2.5 Fabrications anciennes

Les briques anciennes étaient pressées et non filées comme de nos jours. Elles pouvaient être crues ou plus ou moins cuites et de diverses couleurs en fonctions des terres et oxydes utilisées. Elles étaient, suivant leur qualité, soit apparentes, soit revêtues par un enduit indispensable pour les protéger de l'eau de pluie.

Cette fabrication artisanale explique pourquoi leur durabilité n'est pas homogène. En effet, sur un ouvrage, certaines briques se comportent parfaitement alors que d'autres deviennent friables et se creusent.

Les restaurations du patrimoine entreprises à partir des années 70 et qui ont consisté à ôter les enduits pour rendre la brique apparentes, ce pourquoi elle n'était pas fabriquée, ont rendu les murs perméables à l'eau avec nombre de pathologies dans les habitations concernées.

> Les briques qu'on peut qualifier de «foraines» étaient fabriquées au plus près de leur lieu d'emploi sans le souci d'une normalisation nationale. Ceci explique pourquoi on trouve des briques de dimensions très différentes suivant les régions de production (dimensions exprimées en centimètres) :

- briques de Toulouse : 32 x 25 x 6 et même 40 x 25 x 6 ;
- briques de Bourgogne : 22 x 11 x 6 ;
- briques de Paris : 21,5 x 10,3 x 6,5 ;
- briques du Nord : 22 x 11 x 5 ou 22 x 11 x 5,5 ;
- briques de Leers (ville du Nord de la France) : 22 x 10,5 x 4, 5 ou 6…

Le remplacement des briques d'un ouvrage ancien peut donc poser des problèmes, même si il subsiste des tuileries locales encore capables de réaliser des briques à la demande. Des investigations sont à effectuer pour connaître leurs caractéristiques géométriques, mécaniques… (se reporter au paragraphe 4.3.4).

6.2.1.3 Liants pour mortiers

6.2.1.3.1 Généralités sur le choix des liants pour mortiers

Le choix du liant doit assurer la compatibilité de couleurs et d'aspect des parements avec ceux de la maçonnerie existante, mais aussi éviter toute incompatibilité entre les matériaux existants et le mortier. Normalement, le liant à utiliser est un mélange de chaux et de ciment qui permet d'obtenir un mortier bâtard bien adapté. Les fabricants de ciments proposent des mélanges de ciment et chaux prêts à l'emploi.

Dans le domaine du bâtiment, le **DTU 20.1** autorise les ciments Portland (CEM I et CEM II), les ciments à maçonner, les ciments naturels et les chaux hydrauliques.

ATTENTION : *les ciments (CEM II) contenant des additions comme les cendres risquent d'être incompatibles avec les pierres ou les briques.*

Pour éviter toute incompatibilité avec les briques et pour ne pas risquer l'apparition d'efflorescences sur les parements, il faut se reporter aux exigences de la norme ***NF EN 771-1*** *et du complément national (CN). Il est vivement recommandé d'utiliser des ciments à faible teneur en C3A (par exemple, conformes à la norme* ***NF P 15-319****)*

RAPPEL : *en présence d'eau de mer, d'eau séléniteuse, le type de liant doit être adapté à l'agressivité du milieu ambiant (se reporter à la suite de ce paragraphe sur les liants).*

6.2.1.3.2 Liants pour mortiers de chaux

La chaux aérienne et la chaux hydraulique sont définies sous le vocable «chaux de construction» et spécifiées par la norme **NF EN 459-1** intitulée : Chaux de construction - Partie 1 : Définitions, spécifications et critères de conformité. Voir également les normes **NF EN 459-2** et **NF EN 459-3** qui traitent des essais.

6.2.1.3.2.1 La chaux aérienne

La chaux aérienne, qui ne durcit qu'à l'air, est le liant le plus ancien, utilisé dès le VI^{e} siècle avant JC. La chaux aérienne est obtenue par calcination du calcaire (carbonate de calcium CO3Ca) à 850°C. La **«chaux vive»** (OCa) ainsi obtenue est ensuite éteinte dans des bacs remplis d'eau où elle est stockée plusieurs jours (une part d'eau pour une part de chaux vive). La pâte qui se forme appelée **«chaux grasse»** (Ca (OH) $_2$) est mise ensuite dans des sacs étanches à l'air (un excès d'eau conduit à obtenir un **lait de chaux**).

La chaux aérienne fabriquée à base de calcaires coquilliers donne une chaux dite **«calcique ou CL».** Dans les autres cas, la chaux est dite **«dolomitique ou DL».**

Mélangée à du sable, la chaux grasse constitue un mortier qui peut être utilisé pour le hourdage ou la réalisation d'enduits aériens. Sous l'action du gaz carbonique, la chaux se transforme en carbonate de chaux. Ce phénomène de carbonatation dure plusieurs mois, pendant lesquels le mortier atteint progressivement sa résistance. Une maçonnerie hourdée avec un mortier à base de chaux aérienne reste donc sensible aux déformations pendant plusieurs mois.

Le terme **«fleur de chaux»** correspond à une chaux vive partiellement éteinte qui se présente sous la forme d'une poudre.

ATTENTION, *pour pouvoir utiliser ce produit en poudre, il faut le placer pendant 2 à 3 jours dans un bac rempli d'eau pour terminer l'extinction. Ne pas prendre cette précaution peut entraîner la formation de «pétards de chaux» cause de gonflements et de désordres.*

La chaux aérienne se dissout dans les eaux pures et acides. De plus, elle ne durcit que très lentement. **Elle n'est donc que rarement utilisée pour les réparations des ouvrages de génie civil en maçonnerie** (murs et ponts).

Si les romains avaient découvert «le ciment» en ajoutant à la chaux des tuileaux broyés ou des pouzzolanes broyées, la recette avait été perdue jusqu'à ce que le **Français VICAT** la redécouvre (1817) et la perfectionne au cours du XIX^{e} siècle. Cependant, lorsque les pierres

calcaires utilisées pour la fabrication de la chaux contiennent un peu d'argile, le produit qui se forme présente un caractère hydraulique. Les chaux étant fabriquées le plus près possible de leur lieu d'emploi, ceci explique que, localement, des maçonneries aient pu être hourdées avec des mortiers à caractère plus ou moins hydraulique.

6.2.1.3.2.2 Chaux hydraulique

Il est possible de distinguer trois sortes de chaux hydrauliques : **les chaux hydrauliques naturelles (NHL), les chaux hydrauliques naturelles avec matériaux ajoutés (Z) et les chaux hydrauliques (HL).**

La présence d'argile (de 8 à 22%) dans le mélange donne aux chaux hydrauliques des propriétés proches de celles du ciment.

- **Les chaux hydrauliques naturelle (NHL)** ont une fabrication est semblable à celle de la chaux aérienne ; seul le mélange initial change car il contient de l'argile. Ce sont des chaux produites par la calcination de calcaires plus ou moins argileux ou siliceux avec réduction en poudre par extinction, avec ou sans broyage. Toutes les **chaux NHL** ont la propriété de faire prise et de durcir en présence d'eau. Le dioxyde de carbone présent dans l'air contribue également au processus de durcissement
- **Les chaux hydrauliques naturelles avec matériaux ajoutés (Z).** Ce sont des produits spéciaux, qui peuvent contenir des matériaux hydrauliques ou pouzzolaniques adaptés ajoutés, jusqu'à 20% en masse. Ils sont désignés par la lettre «Z». Par exemple : **NHL 3,5-Z.**
- **Les chaux hydrauliques (HL).** Ce sont des «petits» ciments Portland artificiels, auxquels on ajoute des fillers calcaires inertes.

> Ces chaux sont principalement constituées d'hydroxydes de calcium, de silicates de calcium et d'aluminates de calcium ; elles sont produites par mélange des constituants appropriés. Elles ont la propriété de faire prise et de durcir en présence d'eau. Le dioxyde de carbone présent dans l'air contribue également au processus de durcissement (carbonatation) :

- leur prise est rapide (quelques heures) dans l'air ou dans l'eau ;
- elles possèdent une bonne résistance mécanique ;
- elles présentent une bonne résistance à l'humidité.

REMARQUE : *la fabrication de la chaux hydraulique diffère de celle du ciment par la température de cuisson. La température des fours pour la chaux est de l'ordre de 850°C. Elle atteint 1350°C pour le ciment.*

6.2.1.3.3 Liants pour mortiers de ciment

6.2.1.3.3.1 Ciment :

Comme la chaux hydraulique, le ciment artificiel (matériau moderne, inventé par **Louis VICAT** au XIX^{e} siècle) est un liant hydraulique fabriqué par cuisson d'un mélange broyé (clinker) composé de calcaire (80%) et d'argile (20%). Il contient environ 60% de C_3S, 20% de C_2S, moins de 10% de C_3A et moins de 10% de C_4AF. Il fait prise sous l'action de l'eau.

La norme NF EN 197-1 : Ciment – Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, définit le ciment comme suit :

«le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau finement minéral moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité».

Le fascicule de documentation FD P 15-010 précise le choix des ciments en fonction de l'agressivité du milieu environnant. Par exemple : eaux séléniteuses (présence de sulfates), l'eau de mer…

> Pour de tels milieux, aux ciments courants de la norme NF EN 197-1, il faut substituer les ciments relevant des normes :

- **NF P 15-302 :** ciments à usage tropical ;
- **NF P 15-317 :** ciments pour travaux à la mer (PM) ;
- **NF P 15-319 :** ciments pour travaux en eau à haute teneur en sulfates (ES).

Même dans le cas où des ciments courants peuvent être utilisés pour la fabrication des mortiers, certains types de ciments doivent être préférés. Par exemple, avec les briques, il est recommandé d'utiliser des ciments à faible teneur en C_3A.

Le tableau ci-après donne la liste des ciments Portland normalisés :

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)		Composition (pourcentage en masse) [a]										Constituants secondaires
			Constituants principaux										
			Clinker	Laitier de haut-fourneau	Fumée de silice [b]	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire		
						Naturelle	Naturelle calcinée	Siliceuse	Calcique				
			K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL	
CEMI	Ciment Portland	CEMI	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland au laitier	CEMI/ A-S	80-94	1-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEMI/ B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEMI/ A-D	90-94	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)		Composition (pourcentage en masse) [a]										Constituants secondaires
			Constituants principaux										
			Clinker	Laitier de haut-fourneau	Fumée de silice b)	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire		
						Naturelle	Naturelle calcinée	Siliceuse	Calcique				
			K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL	
CEMI	Ciment Portland à la pouzzolane	CEMI/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEMI/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEMI/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEMI/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
CEMII	Ciment Portland aux cendres volantes	CEMII/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEMII/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEMII/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEMII/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEMII/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEMII/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEMII/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEMII/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEMII/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEMII/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Ciment Portland composé e)	CEMII/A-M	80-94	6-20									0-5
		CEMII/B-M	65-79	21-35									0-5
CEMIII	Ciments de haut-fourneau c)	CEMIII/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEMIII/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEMIII/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEMIV	Ciments pouzzolaniques c)	CEMIV/A	65-89	-	11-35					-	-	-	0-5
		CEMIV/B	45-64	-	36-55					-	-	-	0-5
CEMV	Ciments composés c)	CEMV/A	40-64	18-30	-	18-30			-	-	-	-	0-5
		CEMV/B	20-38	31-40	-	31-40			-	-	-	-	0-5

a) les valeurs marquées se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires.
b) la proportion de fumée de silice est limitée à 10%.
c) dans le cas des ciments composés CEMIV/A-M et CEMIV/B-M, des ciments pouzzolaniques CEMIV/A et CEMIV/B et des ciments composés CEMV/A et CEMV/B, les constituants principaux, autres que le clinker, doivent être déclarés dans la désignation du ciment (voir un exemple à l'article 8).

Tableau n° 11 : extrait de la norme NF EN 197-1

6.2.1.3.4 Liants pour mortiers bâtard

Les liants pour mortiers bâtards sont obtenus en mélangeant de la chaux aérienne ou hydraulique et du ciment. Généralement 2/3 de chaux vive pour 1/3 de ciment. Les fabricants proposent des mélanges prêts à l'emploi.

6.2.1.4 Autres constituants des mortiers

Se reporter au **fascicule 65 du CCTG,** aux documents visés par ce texte ainsi qu'au **CCTP-type du SETRA** qui donnent des conseils sur le choix des différents matériaux, les problèmes de compatibilité et la résistance aux agents agressifs… Tous ces textes traitent surtout des bétons et sont à adapter aux mortiers.

6.2.1.4.1 Granulats pour mortiers

Les granulats pour mortiers sont des sables, des fillers d'apport et des sablons. Les granulats doivent être conformes aux normes **NF EN 12620 :** Granulats pour béton (norme très générale), **NF EN 13139 :** Granulats pour mortiers et **XP P 18-545 :** Granulats – éléments de définition, conformité et codification (cette dernière norme donne des indications sur l'usage des granulats en fonction de leurs performances et conditions d'environnement) et bénéficier d'une certification de conformité émanant d'un organisme certificateur officiel (par exemple, la **marque NF-Granulats** [règlement de la marque 041] ou une marque équivalente).

Le marché précise, dans le cadre de la norme **XP P 18-545,** de quel code (A ou B, voire C pour certaines propriétés, mais dans ce cas, des essais spécifiques sont à prévoir) les granulats doivent bénéficier (le choix est fonction de la résistance du mortier, de l'agressivité de l'environnement…).

La granularité des sables est fixée par le **marché** en fonction de la destination du mortier (hourdage, jointoiement ou rejointoiement).

6.2.1.4.2 Additions pour mortiers

Il s'agit ici de matériaux utilisés comme correcteurs granulométriques. Ces additions doivent être conformes aux normes en vigueur et, si possible, bénéficier d'une certification de conformité émanant d'un organisme certificateur officiel.

La compatibilité des additions avec les pierres ou les briques doit être assurée. Par exemple, les ciments à base de cendres volantes… sont, normalement, à éviter.

> Normes en vigueur :

- **NF P 18-501** pour les fillers ;
- **XP P 18-545** pour certaines additions ;
- **NF EN 450-1** et **NF EN 450-2** pour les cendres volantes ;

- **NF P 18-508** pour les additions calcaires ;
- **NF P 18-509** pour les additions siliceuses.

6.2.1.4.3 Eau de gâchage pour mortiers

L'eau de gâchage doit être conforme à la norme **NF EN 1008** en vigueur. L'eau en provenance d'un service public d'eau potable est présumée conforme à la norme. Les eaux de récupération ne doivent pas être utilisées pour des raisons d'aspect et de résistance aux agents agressifs.

6.2.1.4.4 Adjuvants pour mortiers

Les adjuvants (accélérateurs/retardateurs de prise, plastifiants entraîneurs d'air) doivent être conformes à la série des normes **NF EN 934-*** et bénéficier d'une certification de conformité émanant d'un organisme certificateur officiel (par exemple, la **marque NF-Adjuvants** ou une marque équivalente).

- **NF EN 934-1 :** Adjuvants pour béton, mortier et coulis – Partie 1 : exigences communes;
- **NF EN 934-2 :** Adjuvants pour béton, mortier et coulis – Partie 2 : adjuvants pour bétons – définition, exigences, conformité et étiquetage ;
- **NF EN 934-3 :** Adjuvants pour béton, mortier et coulis – Partie 3 : adjuvants pour mortier de montage – définition, exigences, conformité et étiquetage ;
- **NF EN 934-4 :** Adjuvants pour béton, mortier et coulis – Partie 4 : adjuvants pour coulis de câble de précontrainte – définition, exigences, conformité et étiquetage ;
- **NF EN 934-5 :** Adjuvants pour béton, mortier et coulis – Partie 5 : adjuvants pour bétons projetés – définition, exigences, conformité et étiquetage ;
- **NF EN 934-6 :** Adjuvants pour béton, mortier et coulis – Partie 6 : échantillonnage, contrôle et évaluation de la conformité.

6.2.1.5 Composition et fabrication des mortiers

6.2.1.5.1 Compatibilité des matériaux - Prise en compte de l'agressivité de l'environnement

Il y a lieu de s'assurer de la **compatibilité des matériaux** (granulats, additions et ciments) afin d'éviter l'apparition de désordres comme l'alcali-réaction, des réactions sulfatiques externes (présence de sulfates dans les eaux et les sols) et, en particulier, d'efflorescences. Ce dernier point est traité dans les paragraphes traitant des pierres naturelles (essai dit de «Venuat») et des briques (essais des annexes F et G de la norme) ci-devant.

Il faut se reporter à l'annexe nationale de la norme **NF EN 206-1** qui fixe les teneurs maximales en ions chlore (le **fascicule 65 du CCTG** renvoie à cette norme). Les teneurs en sulfates (ions soufre) sont fixées par la norme **XP P 18-545 susvisée.** Enfin, en fonction du niveau de prévention vis-à-vis de **l'alcali-réaction,** fixé au **marché**, il convient d'appliquer les **recommandations du LCPC de 1994.**

Les mortiers peuvent se trouver soumis aux **effets du gel, d'eaux** ou de **sols contenant des sulfates…** Le choix des matériaux et la composition des mortiers doivent être adaptés en conséquence.

Pour la fabrication des **mortiers bâtards,** il faut éviter les ciments contenant des additions, comme les cendres qui risquent de provoquer des phénomènes d'incompatibilité avec les pierres ou les briques.

6.2.1.5.2 Dosage des mortiers de hourdage

Les dosages en liants visés ci-après concernent la réalisation **d'ouvrages neufs** et l'exécution de certains **travaux de reconstruction** portant sur l'ensemble de parties d'ouvrages en maçonnerie. Dans le cas de **réparations partielles** d'ouvrages existants, il faut adapter le dosage aux caractéristiques du mortier existant mesurées lors des investigations préalables aux travaux.

ATTENTION : des exigences particulières sur les mortiers (constituants, dosages…) figurent aussi dans les paragraphes des guides FABEM 6.2 et FABEM 6.3 consacrés aux travaux de rejointoiement, de réalisation d'enduits…

> Le dosage des mortiers de hourdage varie suivant :

- la nature des matériaux à assembler ;
- l'exposition vis-à-vis de l'environnement ;
- l'usage ;
- le temps de mise en œuvre.

ATTENTION :
- au risque de retrait souvent très important pour des dosages élevés ;
- à la propreté du sable ;
- au pH de l'eau de gâchage ;
- à la ségrégation.

Le dosage en eau est très important, il agit notamment sur l'ouvrabilité, sur le retrait et le risque de gel.

UNE EDITION DU SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES (STRRES) / FÉVRIER 2016

Les dosages en liants recommandés pour le montage des pierres naturelles (mortiers de hourdage) sont donnés dans les tableaux ci-après extraits du **DTU 20.1** en fonction de la résistance à la compression normalisée.

Par contre, pour les pierres tendres (f_b ≤ à 10MPa), il est recommandé d'utiliser des mortiers de la classe M5.

	Ciment CEM I ou CEM II au calcaire	Ciment prompt naturel	Chaux hydraulique NHL NHL-Z HL* classe 5 ou 3,5	Chaux aérienne CL ou DL	Chaux à maçonner MC 12,5 à 22,5	Sable	Mortier G Classe M
Mortier de liant pur	250 à 350		250 à 400		250 à 350	0/2 ou 0/4 mm ≤ 5% de fines	M 5
Mortier Bâtard ** Dosage global 250 à 350 kg/m³	50 à 100		200 à 250				
	150 à 200			100 à 200			
		50 à 100	200 à 250				
		50 à 100		250 à 300			

* Les chaux HL ne sont pas bâtardées
** Les dosages bâtards ne pourront être réalisés qu'à partir de ciments CEM I et CEM II
Les dosages en liants sont donnés en kg par m³ de sable sec

Tableau n° 12 : tableau 7 extrait du DTU 20.1 relatif au dosage des mortiers pour le montage de pierres naturelles fermes 10 < fb (MPa) ≤ 40

	Ciment CEM I ou CEM II au calcaire	Ciment prompt naturel	Chaux hydraulique NHL NHL-Z HL* classe 5 ou 3,5	Chaux aérienne CL ou DL	Chaux à maçonner MC 12,5 à 22,5	Sable	Mortier G Classe M
Mortier de liant pur	300 à 400		350 à 450		350 à 450	0/2 ou 0/4 mm ≤ 5% de fines	M 10
Mortier Bâtard ** Dosage global 250 à 350 kg/m³	100 à 150		250 à 300				
	150 à 250			150 à 250			
		150 à 250					

* Les chaux HL ne sont pas bâtardées
** Les dosages bâtards ne pourront être réalisés qu'à partir de ciments CEM I et CEM II
Les dosages en liants sont donnés en kg par m³ de sable sec

Tableau n° 13 : tableau 6 extrait du DTU 20.1 relatif au dosage des mortiers pour le montage de pierres naturelles dures fb > 40 MPa

Le DTU 20.1 donne également les dosages en liants des mortiers pour le montage et les joints **d'ouvrages en maçonnerie de briques.**

Le mortier de hourdage doit avoir un coefficient de capillarité au moins égal à celui du matériau à mettre en œuvre.

> Dans le domaine du génie civil, les dosages en liants varient comme suit :

- mortiers à base de chaux hydraulique : au moins 250 kg/m³ pour des ouvrages en élévation, jusqu'à 600 kg/m³ pour des ouvrages immergés ;
- mortiers à base de ciments : au moins 250 kg/m³ pour des ouvrages en élévation, jusqu'à 600 kg/m³, voire 800kg/m³ exceptionnellement.

6.2.1.6 Mortiers prêts à l'emploi

Les mortiers prêts à l'emploi proposés par les fabricants ne sont pas normalisés.

ATTENTION : *les mortiers prêts à l'emploi à base de liants hydrauliques modifiés et conformes à la norme* ***NF EN 1504-3*** *sont trop performants vis-à-vis des mortiers de hourdage existants. Ils ne doivent pas être utilisés, ni en hourdage, ni en rejointoiement.*

6.2.2 AUTRES PRODUITS ET MATÉRIAUX

Rappel : *les autres produits et matériaux utilisés lors de la mise en œuvre d'une technique de réparation et/ou renforcement donnée sont traités dans le paragraphe correspondant à cette technique.*

6.3.1 DOMAINE D'APPLICATION

Photo n° 58 : pont en maçonnerie envahi par la végétation *(crédit photo Cofex-Littoral)*

La végétation (mousses, fougères, plantes grimpantes, arbustes et même arbres) a tendance à envahir les ponts, les murs de soutènement en maçonnerie… mais aussi les abords des ouvrages.

Cette végétation, pour certains, présente un charme écolo-romantique mais, pour la structure, il s'agit d'un **ENNEMI** qui, par ses acides humiques, ronge les joints et, par ses racines, désorganise la maçonnerie, ce qui peut aller jusqu'à un effondrement de la zone envahie. Il est donc nécessaire de procéder à la dévégétalisation des abords et des ouvrages et ce, au fur et à mesure que les végétaux apparaissent, afin qu'ils ne puissent pas développer leur système radiculaire dans le cœur de la maçonnerie.

Photo n° 59 : désorganisation de la maçonnerie par des arbustes *(crédit photo CDOA 78)*

> ***Rappel :*** *les encombrants de bois flottants qui, lors d'une crue, s'accrochent aux piles doivent également être évacués après celle-ci.*

Normalement, la dévégétalisation des ouvrages et de leurs abords fait partie des **opérations courantes d'entretien.** Elle est d'autant plus facile à réaliser qu'elle est faite fréquemment. Elle doit avoir lieu lors des **travaux d'entretien courant annuels,** après ou pendant le **contrôle annuel,** sauf lorsque qu'elle nécessite des moyens d'accès spécifiques : elle relève alors de **l'entretien spécialisé.** Se reporter **au guide du SETRA : entretien des ouvrages d'art à l'usage des subdivisions du 1er janvier 2000.**

Il faut, en premier, **dégager les abords** de l'ouvrage à traiter pour permettre la mise en place des ouvrages provisoires d'accès qui permettent de procéder au traitement de la structure. L'accès au différentes parties d'un ouvrage nécessite très souvent des moyens lourds, comme des embarcations, barges, des échafaudages, des nacelles élévatrices ou négatives, voire le recours à des entreprises de travaux sur cordes. Aussi, la dévégétalisation de la structure n'est pas toujours effectuée en temps utile.

Sur un ouvrage couvert par la végétation, le **relevé des désordres** préalable à tous travaux est quasiment impossible. Il faut donc commencer par programmer, dans une phase préalable, l'enlèvement de la végétation qu'il est possible d'ôter manuellement ou par des moyens mécaniques, voire chimiques.

> *Cependant, pour l'enlèvement des* ***racines profondes,*** *il est souvent préférable d'attendre que des* ***travaux de reconstitution partielle de la maçonnerie*** *soient programmés pour intervenir.*

> Il appartient au maître d'œuvre, si besoin est en liaison avec un professionnel, de fixer dans le marché comment doivent être détruites les souches et racines :

1. si la destruction des souches doit se faire au moyen de produits phytocides, il faut les traiter **en période de sève descendante** et **plusieurs mois avant le début des travaux**[16], car les produits agissent lentement ;

2. si la destruction des souches doit se faire par extraction, un **démontage partiel de la maçonnerie est nécessaire.** Dans ce cas, il faut lier cette opération aux travaux de reconstitution de la maçonnerie (la suite du présent paragraphe sur la dévégétalisation ne traite pas du démontage de la maçonnerie). Les éventuelles radicelles restantes devront être dévitalisées pour éviter toute repousse.

> ***ATTENTION,*** *quel que soit le procédé de destruction, l'opération est délicate et peut nécessiter la mise en place d'étais et de calages provisoires pour éviter un effondrement de la partie de maçonnerie concernée, les maçonneries constituées de petits éléments (briques…) étant les plus fragiles. Dans les deux cas, les vides laissés par la destruction de la souche et de ses racines doivent être comblés.*

[16] *Le délai de destruction dépend du type de végétal et de sa taille : il peut atteindre 6 mois, voire d'avantage.*

6.3.2 ACCÈS À L'OUVRAGE - CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE CAS DES TRAVAUX SUR CORDES

Les techniques d'accès et de positionnement au moyen de cordes sont souvent utilisées pour les travaux temporaires de dévégétalisation. Les spécificités de ces techniques et les dispositions et contraintes en matière d'hygiène et de sécurité à appliquer figurent dans le **guide O.**

Photo n° 60 : dévégétalisation sur le pont Fabricio à Rome *(crédit photo D. Poineau)*

6.3.3 PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Un pont en maçonnerie surplombant, le plus souvent, un cours d'eau, les techniques utilisées pour le dévégétaliser ne doivent pas exposer le cours d'eau à une pollution ; elles doivent donc respecter **«la loi sur l'eau».**

ATTENTION, *respecter cette loi ce n'est pas forcément «ne rien faire», car un cours d'eau a besoin d'être entretenu, par exemple pour permettre l'écoulement des crues (enlèvement des encombrants de bois, suppression de la végétation ligneuse (arbres) buissonnante et herbacée sur des atterrissements végétalisés qui gênent l'écoulement des eaux…) ou pour préserver la qualité des paysages…*

À ce propos, la **DIREN Centre** (Direction Régionale de l'environnement) a édité un **guide méthodologique d'entretien du lit de la Loire** en deux parties qui peut être téléchargé sur le site www.centre.ecologie.gouv.fr.

La seconde partie de ce guide traite de la restauration du lit du fleuve, mais aussi du **traitement, voire de la suppression de la végétation ligneuse, buissonnante ou herbacée** sur les ouvrages tels que les digues, les épis… et donne de précieuses indications sur **les techniques de dévégétalisation manuelle, mécanique, l'utilisation des différents produits phytocides, l'élimination des résidus de chantier** et, même, des conseils de prévention et de sécurité et les moyens d'intervention par voie d'eau.

Ce guide peut donc servir de support pour mettre au point une méthodologie de dévégétalisation d'un ouvrage donné qui respecte l'environnement.

L'acceptation de l'utilisation de produits phytocides pour dévitaliser tout ou partie de la végétation relève de l'autorisation du **maître d'œuvre.**

La préparation d'une solution d'un produit phytocide doit être effectuée dans un emplacement étanché éloigné du cours d'eau et où, en cas d'un déversement accidentel, il est possible de récupérer le produit sans dommage pour l'environnement. À la fin du traitement, le nettoyage de la cuve doit être effectué sur l'emplacement susvisé et l'eau de lavage doit être traitée et ne pas être déversée dans la nature.

6.3.4 DIFFÉRENTES MÉTHODES DE DÉVÉGÉTALISATION

Le but de l'opération est d'enlever la végétation superficielle non enracinée sans abîmer la maçonnerie. Lorsque la végétation est enracinée, les tiges et troncs sont coupés au ras des parements (une coupe horizontale facilite la dévitalisation ultérieure), puis les souches doivent être détruites.

6.3.4.1 Dévégétalisation manuelle

> Pour cette opération sont utilisés les matériels suivants :

- brosse métallique ;
- grattoir ;
- sécateur de taille ;
- sécateur à deux mains ;
- serpe ;

- scie ;
- tronçonneuse ;
- débroussailleuse ;
- treuil à main…

6.3.4.2 Dévégétalisation mécanique

L'utilisation d'engins lourds ne peut concerner que l'enlèvement des résidus du chantier et, aussi, la dévégétalisation des abords de l'ouvrage lorsque la surface à traiter est importante et que de grosses souches sont à extraire…

> Pour ces diverses opérations peuvent être utilisés, outre les outils de bûcheronnage classiques déjà cités, les matériels suivants :

- pelle mécanique équipée d'un gyrobroyeur forestier ;
- pelle munie d'une pince forestière…

6.3.4.3 Dévitalisation et destruction des souches par produits phytocides

Le traitement doit avoir lieu en période de sève descendante et moins de 48 h après la coupe, de façon que le produit puisse se diffuser jusqu'aux racines, sinon il faudra rafraîchir la coupe. Il faut éviter de traiter par temps de pluie ou si la température dépasse 25°C et s'il y a trop de vent. Deux solutions sont envisageables : **la dévégétalisation et la dévégétalisation suivie d'une destruction par le feu.**

La dévitalisation peut se faire en badigeonnant au pinceau la coupe avec un phytocide dilué adapté et au dosage recommandé. Si les racines sont de forte taille, il faut faire une saignée à leur épaulement et badigeonner également les saignées. L'utilisation d'un pulvérisateur est déconseillée à cause de la dispersion dans l'environnement du brouillard de pulvérisation plus ou moins polluant, voire même toxique. Il faut protéger la surface par un film empêchant l'évaporation des produits. Pour accélérer l'action des produits, il est possible de forer des trous à la périphérie de la souche comme dans la seconde solution.

Le tableau de la page 76 du **guide de la DIREN Centre** susvisé propose l'utilisation du **sulfamate d'ammonium** ou du **glyphosate**[17] qui ne sont pas actuellement classés comme toxiques en milieu aquatique. Ce tableau donne les dosages des solutions à utiliser.

L'inconvénient de cette solution est de ne pas permettre une destruction rapide des racines, qui vont se décomposer lentement, même si elle stoppe le développement des rejets. Elle est donc à réserver aux ligneux de petit développement, dont la disparition des racines ne risque pas d'avoir d'incidence sur la stabilité de la maçonnerie.

[17] Ce produit, qui est utilisé comme désherbant non sélectif et considéré comme biodégradable, fait l'objet d'une polémique sur son éventuelle toxicité. Dans le cas présent il ne s'agit pas d'une utilisation comme herbicide.

La dévitalisation suivie d'une destruction par le feu peut se faire en forant sur la souche des trous d'environ 8 mm de diamètres espacés de 4 à 5 cm et profonds de 7 à 8 cm, inclinés à environ 30°. Ces trous sont ensuite remplis par la solution du produit phytocide, puis les trous sont, soit fermés par un bouchon d'argile, soit recouverts par film pour empêcher l'évaporation. Il convient de compléter les niveaux plusieurs fois.

ATTENTION, *il faut s'assurer que le feu risque pas d'endommager les pierres de l'ouvrage (transformation par exemple d'une pierre calcaire en chaux). Cette opération doit être suivie par une régénération de la maçonnerie pour combler les vides.*

> Les produits utilisables sont :

- le nitrate de potassium (salpêtre) à renouveler au bout de 3 mois et attendre 6 mois pour mettre le feu à la souche ;
- le chlorate de soude au dosage de 1g par centimètre de diamètre de la souche ;
- le nitrate de soude auquel il faut, après l'évaporation de l'eau, ajouter du pétrole désaromatisé pour permettre la mise à feu de la souche.

6.3.5 PRÉPARATION ET EXÉCUTION DES TRAVAUX

La procédure de dévégétalisation (moyens d'accès, matériel, personnel, prévention et sécurité, produits phytocides, technique à utiliser par type de végétal, contrôles, élimination des résidus de chantier…), dans le respect des prescriptions du **marché**, est proposée par **l'entrepreneur** à l'acceptation du **maître d'œuvre.**

Le marché impose sur le chantier, avant toute intervention, un **relevé contradictoire de l'état de l'ouvrage** (présence et importance des défauts ainsi que végétaux existants à supprimer), qui complète **le relevé** qui, normalement, figure dans les pièces du **marché.**

6.3.6 CONTRÔLES DE L'OPÉRATION DE DÉVÉGÉTALISATION

6.3.6.1 Épreuve de convenance

Une ou plusieurs parties de l'ouvrage sont choisies par le **maître d'œuvre** pour servir de tests pour **l'épreuve de convenance.** Sur cette ou ces parties, **l'entrepreneur** réalise la dévégétalisation conformément à la **procédure** (dévégétalisation manuelle, mécanique ou par produits phytocides). Dans le cas où des produits phytocides sont utilisés, l'épreuve porte aussi sur la préparation des produits et les opérations de nettoyage du matériel. Cette épreuve est ensuite validée par le maître d'œuvre si les résultats sont conformes aux exigences du **marché** complétées par celles de la **procédure. L'absence de désorganisation de la maçonnerie** fait partie des critères de validation.

NOTA : *si la dévégétalisation comporte la destruction de souches, l'efficacité du traitement ne pouvant être validée immédiatement, cette opération est exclue de l'épreuve de convenance et fait l'objet d'un contrôle d'exécution spécifique.*

6.3.6.2 Contrôles d'exécution

Les contrôles d'exécution des travaux de dévégétalisation ont pour but de vérifier, qu'à tout instant du chantier, l'exécution des travaux est conforme aux spécifications du **marché** et de la **procédure d'exécution,** complétées par les enseignements tirés de **l'épreuve de convenance.**

Tout au long des travaux ou à la fin de ceux-ci, suivant la nécessité ou non de disposer de moyens d'accès pour y procéder, un **relevé contradictoire de l'état de l'ouvrage** est effectué pour servir à la réception des travaux.

Si la dévégétalisation comporte la destruction de souches, le **marché** prévoit un contrôle spécifique d'exécution qui peut être **décalé dans le temps** par rapport à la fin des travaux.

6.3.7 RÉCEPTION DES TRAVAUX (pour mémoire)

Se reporter au paragraphe 5.11 ci-dessus.

6.4.1 DOMAINE D'APPLICATION

Avant la réalisation de certains travaux de réparation et/ou renforcement, il faut, après l'enlèvement de la végétation éventuellement présente, procéder à un **nettoyage des surfaces,** voire à une **véritable préparation de surface.**

6.4.2.1 Domaine du bâtiment

- outre de l'obligation légale dont l'origine remonte au décret de 1852 de Louis Napoléon Bonaparte, qui impose de ravaler les façades sur rues et avenues, les lois Malraux de 1960 ont donné un nouvel essor au ravalement des façades ;
- de plus, tout récemment, des protocoles de certaines villes incitent les propriétaires à nettoyer les façades ;
- enfin, les graffiti nécessitent des nettoyages fréquents.

Un bon nettoyage doit permettre de restituer à la façade un aspect proche de l'originel. Outre cet impératif d'aspect, les parements retrouvent leurs performances initiales.

Dans certains cas, il s'agit **d'une véritable préparation de surface** qui peut parfois aller jusqu'à la **retaille de la maçonnerie** à l'aide des outils du tailleur de pierres que sont le chemin de fer, la boucharde…

6.4.2.1 Domaine du génie civil

Le nettoyage permet d'enlever les graffiti, les salissures, les coulures…

Photo n° 61 : pont de Villeneuve-Loubet avant travaux *(crédit photo CG 06)*

Après des réparations lourdes telles que démontage et reconstitution de murs (tympans, murs en retour…), mise en place de tirants d'enserrement avec création de niches pour les têtes d'ancrage, reconstitution de pierres endommagées…, les parements (surfaces vues) présentent un aspect «peau de léopard» inesthétique. Dans un tel cas, un **second nettoyage des parements s'impose.**

Lorsque les réparations ne concernent que quelques pierres, il est préférable de **«patiner»** les parties neuves pour leur donner une couleur voisine des parties existantes en attendant que le temps fasse son œuvre d'uniformiser la teinte des pierres et/ou des briques.

En cas de dépôts très adhérents comme ceux de calcite, des hors profils, il s'agit d'une **véritable préparation de surface** qui peut parfois aller jusqu'à la **retaille de la maçonnerie** à l'aide des outils du tailleur de pierres que sont le chemin de fer, la boucharde…

Photo n° 62 : pont de Villeneuve-Loubet le jour de l'inauguration après travaux d'élargissement *(crédit photo CG 06)*

6.4.2 ÉTUDES PRÉALABLES

Pour retrouver cette qualité de surface, il faut que le **nettoyage, voire la préparation de surface,** assure une bonne élimination des concrétions, des sels ainsi que des salissures végétales sans, normalement, endommager la pierre ou la brique.

> Il est donc nécessaire :

- en premier de caractériser le couple support/salissures (état du support et identification des salissures) ;
- en second de tester l'efficacité de la ou des méthodes de nettoyage ou de préparation de surface avant de lancer l'opération.

Il est conseillé de faire procéder aux **investigations** pendant la période des **études préalables.** Pour ce faire, des prélèvements et des essais sont à réaliser afin de déterminer la caractérisation du couple support/salissures.

6.4.2.1 Croûtes noires en milieu urbain

Ce noircissement est constitué en grande partie de sulfate de calcium hydraté ou gypse ($CaSO_4$, $2H_2O$), cimentant les autres poussières telles que les cendres volantes et les suies.

> Il est à noter que l'épaisseur de la croûte noire peut atteindre 1 cm, voire plus sur certains sites :

- les croûtes se forment dans les zones abritées des pluies battantes ou ruisselantes ;
- les cendres volantes contiennent entre autres des particules métalliques (fer, nickel, vanadium, cobalt…) qui vont favoriser l'oxydation du dioxyde de soufre (SO_2) en SO_3 et ensuite en acide sulfurique (H_2SO_4) ;
- Les micro-suies sont émises par la combustion du fuel de chauffage, des moteurs diesels et du bois.

La composition chimique de la croûte reflète l'histoire de la pollution environnementale de la façade, de l'œuvre ou du monument. En général, celle-ci est composée de strates (sédimentation de sulfate de calcium, de cendres volantes et de suie).

6.4.2.2 Dépôts de calcite

La chaux du mortier des joints se carbonate avec le temps et ce carbonate est dissous par l'eau chargée en gaz carbonique qui percole au travers des joints (chape d'étanchéité en mauvais état, joints plus ou moins fissurés…). Ensuite, ce carbonate se redépose sous forme de coulures de calcites. C'est la raison pour laquelle les tympans et, surtout, l'intrados des ponts en maçonnerie sont très souvent recouverts de coulures de calcite.

Photo n° 63 : coulures d'eau et de calcite *(crédit photo CDOA Corse)*

Cette croûte très adhérente relève des techniques de préparation de surface agressives (eau sous haute pression, repiquage…) qui sont des moyens pouvant endommager la maçonnerie et les joints : les pierres calcaires dures et froides, les granits, certains grès… peuvent résister au nettoyage, mais les **pierres calcaires tendres peuvent être abimées et les briques perdre leur glacis protecteur. Une épreuve de convenance** avec essais et mesures s'impose.

Photo n° 64 : décapage de coulure à THP (2500 bars) au pont des Abarines *(crédit photo Cofex Littoral)*

6.4.2.3 Graffiti

6.4.2.3.1 Produits de protection contre les graffiti

6.4.2.3.1.1 Choix des produits

La lutte contre les graffiti passe par la prévention, qui consiste à appliquer sur les zones à risque des revêtements protecteurs, lesquels empêchent les peintures de pénétrer dans les matériaux et facilitent le nettoyage à l'aide de produits de nettoyage anti-graffiti adaptés.

> Deux natures de produits de protection anti-graffiti existent sur le marché, à savoir :

- **les produits sacrificiels** nécessitant un retraitement après chaque opération de nettoyage;
- **les produits de type permanent,** qui permettent de recevoir plusieurs séries de graffiti/nettoyage.

> Nature du support :

Tous les supports ne se prêtent pas aussi bien à l'application d'une protection anti-graffiti ou bien celle-ci n'est pas judicieuse. Il est indispensable de faire des **essais de convenance.**

Par exemple, pour les maçonneries de briques apparentes, il a été constaté que, sur les briques contenant des quantités notoires de sels, ceux-ci viennent cristalliser sur la face extérieure, empêchant l'accrochage correct et la pénétration capillaire des produits à base de solvants. La majorité des produits permanents provoque un phénomène de décollement du film. Par contre, il ne semble pas y avoir incompatibilité avec les émulsions aqueuses.

> Nature du produit anti-graffiti :

■ **Les produits de type sacrificiel :**

Ils présentent une grande facilité de mise en œuvre : l'élimination des graffiti est très facile et, en général, l'aspect du support redevient semblable à l'original (le traitement est réversible). Par contre, la protection doit être immédiatement renouvelée après le nettoyage.

■ **Les produits de type permanent :**

Ils ne nécessitent pas un retraitement immédiat comme les produits sacrificiels, mais leur efficacité semble décroître rapidement dès le second, voire le troisième nettoyage.

> Perméabilité à la vapeur :

Outre l'efficacité du nettoyage, il faut également examiner la perméance des supports après traitement. Si la «respiration» du support n'est pas essentielle pour les maçonneries en béton, il en est tout autrement pour les maçonneries enduites, de brique apparente ou de pierre naturelle.

D'une manière générale les produits sacrificiels n'ont quasiment pas amené de modification d'aspect du support, contrairement aux produits permanents.

En matière de protection il faut noter que les produits «mats» contiennent moins de liants et sont donc moins performants.

> Conclusions et conseils :

Il est déconseillé d'appliquer un anti-graffiti permanent sur une maçonnerie de brique apparente. En effet il se produit un blanchiment important de la surface traitée quelques jours seulement après le traitement. Seuls les produits réversibles semblent convenir pour les briques.

Le choix final des produits anti-graffiti dépend de la valeur du support à protéger. En effet, pour certains supports où l'effet de réversibilité du traitement est imposé (cas des façades classées ou inscrites à l'inventaire des monuments historiques….), il sera nécessaire d'utiliser les produits sacrificiels.

Pour les façades ou parements courants, le choix est plus ouvert et pourra dépendre d'une étude comparative faisant intervenir le rapport qualité/prix des traitements et de l'entretien de la façade traitée.

Photo n° 65 : revêtement anti-graffiti permanent sur un mur à Paris *(crédit photo D. Poineau)*

Les fiches techniques des fabricants donnent les limites d'emploi de ces produits en fonction de la température, des précipitations… Par exemple, les **remontées d'humidité** sont une contre-indication au traitement. Ces fiches donnent également les précautions d'emploi à respecter (respect des règles d'hygiène et de sécurité).

Dans tous les cas, il y aura lieu de réaliser une **épreuve de convenance,** selon la nature du produit, afin de s'assurer de l'aspect du parement après traitement. La photo précédente montre que le revêtement anti-graffiti modifie nettement la couleur initiale du parement.

6.4.2.3.1.2 Matériels d'application :

Ces produits sont applicables au rouleau, voire au pulvérisateur basse-pression. Se reporte au **guide STRRES FABEM 4** qui traite des matériels de mise en œuvre des différents revêtements de protection, dont les produits anti-graffiti.

6.4.2.3.1.3 Préparation des surfaces d'application :

Ces produits s'appliquant sur des surfaces **propres et sèches,** un nettoyage préalable peut donc être nécessaire. Les techniques de nettoyage figurent dans la suite du présent paragraphe.

6.4.2.3.1.4 Mode opératoire – Mise en œuvre :

Se reporte au **guide STRRES FABEM 4** qui traite de la mise en œuvre des différents revêtements de protection, dont les produits anti-graffiti.

6.4.2.3.1.5 Essais et contrôles :

Se reporte au **guide FABEM 4** qui traite des essais et contrôles à effectuer lors de la mise en œuvre des différents revêtements de protection, dont les produits anti-graffiti.

6.4.2.3.2 Produits de nettoyage des graffiti

> Il existe des produits pour nettoyer les graffiti sur les supports protégés par les produits anti-graffiti susvisés :

- **sur les supports protégés par un produit de type sacrificiel,** le nettoyage s'effectue avec l'une des deux sortes de produits de nettoyage à choisir en fonction de la porosité et de la texture du support ;
- **sur les supports protégés par un produit de type permanent,** le nettoyage s'effectue avec les produits pour support lisse.

Par contre, pour **nettoyer les graffiti** sur les **supports non protégés** et obtenir le **maximum d'efficacité,** il faut **agir le plus vite possible** et il faut rechercher le **solvant du graffiti.** On applique le traitement, en général à l'aide d'une poudre (terre de Sommières, argile naturelle…) imbibée du solvant, ce qui permet à la tache ou au graffiti de migrer par capillarité dans la poudre (les produits de détachage en aérosols du commerce sont basés sur les mêmes principes).

> Ces essais peuvent être effectués avec les divers produits de nettoyage disponibles sur le marché à savoir :

- **pour les supports non protégés poreux et à texture rugueuse :** ces produits se présentent sous forme de gels à passer à la taloche ou au pinceau. Après séchage complet, ils sont enlevés par grattage. Il faut terminer l'opération par un rinçage soigné à l'eau claire. Ce sont des produits à action lente ;
- **pour les supports non protégés peu poreux et à texture lisse :** ces produits sont liquides et s'appliquent au pinceau ou avec un chiffon. Ensuite, il faut essuyer et si nécessaire appliquer une nouvelle couche de produit. Il faut terminer l'opération par un rinçage soigné à l'eau claire. Se sont des produits à action rapide.

6.4.2.4 Investigations et mesures

> Outre l'examen visuel, des essais non destructifs sont utilisés in situ, par exemple :

- la mesure de la vitesse du son ;
- l'examen à l'aide de macro-caméra ;
- la mesure colorimétrique ;
- la mesure de la perméabilité (pipe de Karsten ou boîte de perméabilité).

> Des prélèvements sur des grattages de surface vont permettre de caractériser les salissures :

- l'analyse chimique élémentaire, avec dosage des divers sels (SO_4Ca, ClNa, ...) ;
- l'examen de constitution par diffraction des rayons X pour les salissures urbaines ;
- l'examen par spectrométrie infrarouge pour les salissures organiques (anciens traitements ou peintures)
- l'examen au microscope électronique à balayage couplé à un analyseur à sélection d'énergie lorsqu'une caractérisation approfondie est nécessaire.

> Sur des micro-carottages, l'identification du support peut être obtenue par les mesures suivantes :

- la porosité et de capillarité ;
- la profondeur d'altération ;
- la perméabilité à la vapeur d'eau.

6.4.3 DIVERSES FAMILLES DE PROCÉDÉS DE NETTOYAGE ET DE PRÉPARATION DE SURFACE

> Il est possible de distinguer plusieurs familles de procédés de nettoyage et de préparation de surface :

- les procédés par voie humide ;
- les procédés par voie sèche ;
- les procédés par voie chimique ;
- les traitements bactéricides.

Il est mentionné ci-après quand les procédés de nettoyage sont principalement employés pour le **bâtiment (B), les monuments historiques (MH) ou le génie civil (GC).**

6.4.3.1 Les procédés par voie humide

NOTA : *la réalisation de ce type de nettoyage est à éviter en hiver.*

- ruissellement d'eau : détrempage (B) (MH) (GC) ;
- nébulisation : détrempage (B) (MH) (GC) ;
- eau froide basse pression (B) (MH) (GC) ;
- eau froide haute pression (B) (GC) ;
- eau chaude haute pression (GC) ;
- vapeur (pression 0,1 à 1 MPa et température de 100°C à 250°C) (GC) ;
- hydro-micro-sablage basse pression (B) (MH) (GC) ;
- projection à vitesse ultrasonique de billes de glace à très basse température **(NON RECOMMANDÉE)** ;
- sablage hydropneumatique (GC) ;
- pulpe de papier, coton ou laine de roche humidifiée (B) (MH).

6.4.3.2 Les procédés par voie sèche

- micro-sablage (B) (MH) (GC) ;
- meulage, ponçage, brossage (B) (MH) (GC) ;
- retaille (chemin de fer, boucharde, ciseau, taillant,...) : la taille des parements s'est développée à partir du XVI^{e} siècle (B) (MH) (GC) ;
- pâte à poncer à base d'amidon de maïs (« épilation ») (B) (MH) ;
- laser (B) (MH).

6.4.3.3 Les procédés par voie chimique

- acides (bi-fluorure d'ammonium) **(NON RECOMMANDÉS)** ;
- alcalins (soude, potasse, hydroxydes...) **(NON RECOMMANDÉS)** ;
- les tensio-actifs **(NON RECOMMANDÉS)**.

6.4.3.4 Les traitements bactéricides

- les anticryptogamiques (B) (MH) (GC) ;
- les bactéricides à base d'ammonium quaternaire (mousses, lichens, algues…) (B) (MH) (GC).

6.4.3.5 Conclusions et conseils

NOTA : *lorsque des travaux de réparation et ou renforcement nécessitent une* ***préparation de surface,*** *sa consistance figure, normalement, dans la partie des guides consacrée à ces travaux. En fonction des constatations effectuées au cours des études préalables, le* ***marché*** *peut imposer une préparation de surface spécifique.*

ATTENTION : *lorsque* ***des briques sont recouvertes d'un enduit,*** *il s'agit, normalement,* ***de briques porteuses*** *qui ne doivent pas être laissées sans protection sous peine de désorganisation du matériau sous les effets des intempéries. Si l'enlèvement de l'enduit, en mauvais état, est à entreprendre, il doit être suivi de la réalisation d'un nouvel enduit*[18]*;*

- un traitement trop appuyé des **briques de parement** (par exemple, un sablage intensif) va détruire le glacis de protection et permettre à l'humidité de pénétrer dans la brique et la fragiliser ;
- en général, un simple détrempage d'une durée de 1 heure à 2 heures, immédiatement suivi d'un nettoyage à l'eau sous basse pression (<5 MPa), est suffisant pour nettoyer les façades;
- en présence de concrétions dures et adhérentes, l'intensité de l'opération de nettoyage doit être adaptée au type d'ouvrage et aux caractéristiques du matériau (nature et dureté des pierres) ;
- dans certains cas, il est nécessaire de prévoir, en plus, une retaille, voire un micro-sablage ou un hydro-micro-sablage basse pression pour éliminer les concrétions très adhérentes ;
- il n'est pas recommandé d'utiliser des **produits chimiques** dans les eaux de nettoyage (détrempage et nettoyage sous basse pression), car ils provoquent des efflorescences, altèrent les pierres naturelles… ;
- **le nettoyage** laser est actuellement la méthode la plus douce ; elle est basée sur un micro-choc thermomécanique sur la croûte noire qui permet de la décoller. A l'inverse de toutes les autres méthodes, elle n'engendre aucun apport extérieur (eau, micro-sablage, produits chimiques) pouvant nuire au support. **Cette méthode est actuellement réservée aux œuvres d'art.**
- le nettoyage à l'aide de pâte à poncer à base d'amidon de maïs est réservé aux nettoyages intérieurs.

Les procédés de nettoyage par voie chimique sont difficilement maîtrisables sur les chantiers et, à ce titre, ne sont pas recommandés.

18 Par exemple, l'enlèvement des enduits de protection des briques des façades à Toulouse et Montauban a été suivi de nombreux désordres dus à la pénétration de l'eau au travers des murs.

6.4.4 MATÉRIEL À UTILISER

Les **guides STRRES FABEM 1 ET FABEM 4** décrivent dans le détail la majeure partie des matériels nécessaires au nettoyage ou à la préparation de surface des maçonneries, auxquels s'ajoutent les outils du tailleur de pierre.

6.4.5 EXÉCUTION DU NETTOYAGE OU DE LA PRÉPARATION DE SURFACE

6.4.5.1 Généralités

Le marché impose sur le chantier, avant toute intervention, un **relevé contradictoire** de l'état de l'ouvrage, qui porte sur la présence et l'importance des défauts ainsi que sur parties à nettoyer ou à préparer. **Cet état complète le relevé** qui, normalement, figure dans les pièces du **marché.**

La **procédure de nettoyage ou de préparation de surface** (moyens d'accès, matériel, personnel, prévention et sécurité, dispositifs de protection de l'environnement et des tiers, produits et techniques à utiliser, contrôles, élimination des résidus de chantier…), dans le respect des prescriptions du **marché**, est proposée par **l'entrepreneur** à l'acceptation du **maître d'œuvre.**

Le marché demande à **l'entrepreneur de proposer** la ou les **méthodes de nettoyage** ou de **préparation de surface.** Il fixe les conditions de réalisation de **l'épreuve de convenance** qui permet de tester l'efficacité de la ou des méthodes de nettoyage ou de préparation de surface avant de lancer l'opération.

En particulier, il convient de s'assurer que la **méthode proposée ne provoque aucun dommage à la maçonnerie** (une préparation de surface peut être agressive mais elle ne doit cependant pas conduire à un endommagement pouvant provoquer des désordres ultérieurs des matériaux).

La levée **du POINT D'ARRÊT** est conditionnée à la validation par le **maître d'œuvre de l'épreuve de convenance** de la ou des méthodes de nettoyage ou de préparation de surface.

L'exécution du nettoyage ou de la préparation de surface est effectuée suivant le procédé retenu lors de **l'épreuve de convenance** en appliquant la **procédure** mise au point à cette occasion.

6.4.5.2 Épreuve de convenance du nettoyage ou de la préparation de surface

6.4.5.2.1 Cas du nettoyage

Les caractérisations du couple support/salissures étant connues, des tests de nettoyage dans le cadre de **l'épreuve de convenance** sont effectués.

> Après ces tests, il faut contrôler l'efficacité et la non-nocivité du nettoyage, à l'aide des essais physiques et chimiques déjà cités qui mesurent :

- la perméabilité à l'eau et à la vapeur d'eau ;
- la teneur en sels restante.

Si besoin est, l'élimination de **l'ancien traitement de protection** (hydrofuge…) doit être contrôlée.

> Enfin, il faut contrôler :

- l'absence d'érosion du support à l'aide à l'aide de la macro-caméra ;
- l'amélioration de la clarté à l'aide de la mesure colorimétrique.

6.4.5.2.2 Cas de la préparation de surface

Le **marché** fixe les conditions de réalisation de **l'épreuve de convenance** en fonction de la méthode de préparation de surface à exécuter.

6.4.5.3 Réalisation des travaux

Les travaux sont réalisés conformément aux dispositions du **marché**, complétées par les enseignements obtenus lors de **l'épreuve de convenance** du nettoyage ou de la préparation de surface.

Les parties traitées doivent être protégées (écrans, bâches…) contre les salissures issues des parties en cours de traitement et qui peuvent être projetées ou emportées par le vent.

En cas de gel ou de risque de gel, il ne faut pas commencer un nettoyage à l'eau qui risque de saturer le matériau et d'entraîner des désordres.

RAPPEL : *la réalisation de travaux importants tels qu'une injection, un rejointoiement… doit être suivie d'un* ***nettoyage des parements et parois polluées et salies.*** *Ce nettoyage doit avoir lieu pendant ces travaux et le plus rapidement possible afin d'éviter l'incrustation des salissures, projections, coulures…*

6.4.6 CONTRÔLES D'EXÉCUTION

Les contrôles d'exécution des travaux de nettoyage ou de préparation de surface ont pour but de vérifier qu'à tout instant du chantier, l'exécution des travaux est conforme aux spécifications du **marché** et de la **procédure d'exécution,** complétées par les enseignements tirés de **l'épreuve de convenance. Les documents de suivi** sont complétés et les essais fixés par le **marché** sont effectués au fur et à mesure des travaux pour servir à la **réception des travaux de nettoyage.**

6.4.7 RÉCEPTION DES TRAVAUX (pour mémoire)

Se reporter au paragraphe 5.11 ci-dessus.

6.5 Nettoyage final

> À la fin du chantier, l'entrepreneur est tenu d'effectuer le nettoyage de l'ensemble de l'ouvrage. Par exemple :

- il s'assure de l'enlèvement des détritus de diverses origines et des salissures déposées sur les parois pendant le chantier ;
- il vérifie le fonctionnement des dispositifs d'évacuation des eaux et des éventuels dispositifs de visite et d'entretien ;
- etc.

Le marché fixe en tant que de besoin la consistance du nettoyage à effectuer.

Ce nettoyage est un des **POINTS D'ARRÊT** dont la levée conditionne la réception des travaux **(se reporter au paragraphe 5.11 ci-dessus).**

7 Hygiène et sécurité

7.1 Rappel des obligations
7.2 Cas d'un chantier de réparation et/ou de renforcement d'un ouvrage en maçonnerie

UNE ÉDITION DU SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES (STRRES) / FÉVRIER 2016

L'entrepreneur doit s'assurer du respect de la législation du travail en matière d'hygiène et de sécurité.

> Le Code du Travail impose une coordination des travaux dans les deux cas suivants :

- intervention pour travaux d'une entreprise dite extérieure dans l'établissement d'une autre entreprise dite utilisatrice. C'est le chef de l'entreprise utilisatrice qui assure la coordination générale ;
- chantier temporaire ou mobile où interviennent au moins deux entreprises. Un coordonnateur de sécurité et de protection de la santé (coordonnateur SPS) est requis sur le chantier.

> Le coordonnateur SPS est au moins de niveau 2 si les travaux effectués peuvent être qualifiés de dangereux :

- utilisation de substances extrêmement ou facilement inflammables, toxiques ou nocives ;
- risques de chutes de plus de 3 m de hauteur ;
- travaux en milieu confiné ;
- travaux nécessitant l'utilisation d'équipements de travail auxquels est applicable l'article R 233-9 du Code du Travail (équipements de protection individuelle ou ÉPI) ;
- travaux exposant à un niveau d'exposition sonore quotidienne supérieure à 90 dB (A) ou à un niveau de pression acoustique de crête supérieure à 140 dB ;
- travaux de démolition ;
- etc.

la sécurité produits

Les données de sécurité

Lorsqu'un produit mentionné dans le **guide weber** est classé "dangereux", il fait l'objet d'une mention particulière dans la rubrique "**Précautions d'utilisation**".

Les fiches de données de sécurité de ces produits sont accessibles sur le serveur QUICK-FDS, par Minitel en composant le 08 36 05 10 12 ou par internet à l'adresse http://www.quickfds.com

Les symboles de danger

Les symboles de danger, régis par la réglementation du travail et des transports, figurent sur les emballages des produits.

Vous trouverez ci-dessous, la liste des produits classés "dangereux", avec leurs symboles respectifs.

SYMBOLES REQUIS PAR LA RÉGLEMENTATION DU TRAVAIL	DÉFINITION	PRODUITS CONCERNÉS
Xi. IRRITANT	**Irritant :** Produit piquant les yeux, la gorge, le nez ou la peau. Il provoque des manifestations de chaleur, de rougeur et de douleur. Précaution : Éviter les contacts avec les yeux et la peau, ne pas respirer les poussières ou les vapeurs. Consulter un médecin en cas de malaise.	[illegible], Cette liste de produits est non exhaustive
Xn. NOCIF	**Nocif :** Produit contenant des substances toxiques en faible proportion. Il peut devenir aussi dangereux qu'un produit "toxique" si la dose reçue est importante. Possibilité d'un dommage irréversible en cas d'expositions prolongées ou répétées. Précaution : Éviter tout contact. Ne pas respirer les poussières ou les vapeurs. Consulter un médecin en cas de malaise.	**Ibocide, ibo décapant, ibo effaceur SL, ibodur fixateur, motex plus HY 300, trampeint sol, trapco antigraffiti GL, trapco antigraffiti PU, trapco curing, trapco hydrofuge SW, trapco minéralisant CM, trapco rapid**
C. CORROSIF	**Corrosif :** Produit détruisant les tissus vivants en cas de contact ou de projection. Il ronge les muqueuses du nez, de la gorge et des bronches lorsqu'il est respiré. Il peut aussi attaquer les équipements. Précaution : Ne pas respirer les vapeurs et éviter tout contact avec la peau et les yeux	**arcante, ibo net rapid**
SYMBOLES REQUIS PAR LA RÉGLEMENTATION DU TRANSPORT	**DÉNOMON**	**PRODUITS CONCERNÉS**
	Classe 3 : liquide inflammable Liquide ayant un point d'éclair en creuset fermé, inférieur ou égal à 61°C.	**ibo décapant vert, ibo effaceur GR, ibo effaceur SL, ibodur fixateur, motex dry BM 560, motex plus HY 300, trampeint sol, trapco antigraffiti GL, trapco antigraffiti PU, trapco curing, trapco hydrofuge SW, trapco minéralisant CM**
	Classe 6 . 1 : matière toxique Liquide ou solide qui peut nuire à la santé ou causer la mort lorsqu'il est ingéré, inhalé ou mis en contact de la peau, en faible quantité ou par une action unique ou de faible durée.	**ibo décapant**
	Classe 8 : matière corrosive Liquide ou solide qui peut détruire les tissus humains ou causer des dommages aux matériaux, aux équipements de transport ou aux autres marchandises. Comprend les matières à caractère basique ou acide et les objets en contenant.	**arcante, motex fix CO 130**

Figure n° 34 : symboles de danger *(extrait d'un document Weber et Broutin)*

7.2 Cas d'un chantier de réparation et/ou de renforcement d'un ouvrage en maçonnerie

Le présent texte ne traite que des dispositions à mettre en œuvre pour assurer la protection des personnes lors de la réalisation des travaux. Il ne traite pas des installations de chantier ni des moyens d'accès (échafaudages, nacelles automotrices…), même si ces points sont évoqués dans le présent document. **Se reporter au guide STTRES 0 qui traite du chantier de réparation dans son ensemble et des textes de référence.**

Certains composants utilisés lors des travaux sont **toxiques** (diluants réactifs des résines époxydiques, solvants, constituants des polyuréthannes, etc.), **irritants** (liants minéraux à base de silicates, ciments, liants organiques de nature basique, etc.) ou encore **inflammables** (solvants, etc.).

La fiche technique d'un matériel ou d'un produit indique quelles sont les précautions à prendre afin d'éviter des accidents, des intoxications.

> Les précautions, à caractères général, qui suivent sont applicables quelles que soient les méthodes de réparation mises en œuvre :

- toutes les substances dangereuses doivent être munies d'un étiquetage réglementaire conformément à la réglementation en vigueur **(arrêté ministériel du 20 avril 1994 modifié par les arrêtés du 7 janvier 1997 et du 4 août 2005** [ce dernier arrêté transposant la directive européenne 2004/73/CE du 29 avril 2004, qui correspond à la 29e adaptation de la directive 67/548/CEE]) ;
- **le Plan Général de Coordination (PGC),** le chantier étant au moins de la **catégorie 2,** doit faire mention des risques liés à l'utilisation des différents produits, dont les fiches de données de sécurité **(FDS)** doivent être obligatoirement fournies ;
- les dispositifs de protection sont choisis en fonction des recommandations des fiches de données de sécurité ;
- dans les lieux confinés, la **protection est réalisée préférentiellement de façon collective** avec mise en place d'une ventilation forcée, avec arrivée d'air frais non pollué et extraction des vapeurs dangereuses. De plus, des capteurs étalonnés sont à mettre en place pour suivre dans l'atmosphère du chantier les concentrations des divers produits nocifs utilisés ;
- dans les autres lieux ou lorsque la mise en œuvre d'une protection collective s'avère impossible, les intervenants doivent être munis d'un équipement de protection individuelle adapté :
  - appareils respiratoires filtrants à ventilation assistée avec masques et demi-masques ou avec cagoules,
  - appareils isolants non autonomes à air libre ou à adduction d'air comprimé…
- à ces équipements de protection contre les vapeurs nocives, il faut ajouter des vêtements de protection jetables, des gants de protection et des lunettes contre les projections, etc.;
- en cas d'utilisation de produits inflammables, ceux-ci sont mis en œuvre en respectant scrupuleusement les précautions d'emploi pour éviter tout risque d'incendie ;
- le personnel doit être informé et sensibilisé aux risques liés à l'utilisation de certains produits et aux mesures de protection à prendre individuellement et/ou collectivement ;
- le médecin du travail doit être informé que les salariés sont exposés à certains produits afin qu'il puisse assurer une surveillance médicale renforcée (SMR) ;
- etc.

> Des précautions particulières sont à appliquer au cours de certaines opérations. Par exemple :

- le nettoyage d'un parement de maçonnerie :
  - des poussières et des projections lors d'un «sablage» à sec,
  - des projections, du bruit et du jet d'eau lors d'un décapage à l'eau sous haute pression,
  - du risque d'effondrement de la structure en cas de refouillement des joints sur une grande profondeur et sur de grande surface sans mise en place d'un cintre … ;
- la mise en œuvre d'armatures de précontrainte implique le recours à un personnel spécialisé connaissant les risques spécifiques liés à leur mise en tension…

Photo n° 66 : équipements de protection individuelle *(crédit photo D. Poineau)*

L'entrepreneur doit organiser son chantier de façon à protéger les personnes collectivement ou, si cela est impossible, individuellement.

NOTA :

- *l'Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics ou* ***OPPBTP*** *édite des fiches et des guides de sécurité et présente les bonnes pratiques de sécurité sur son site SPOTH-BTP[19]. Il peut également être consulté. Adresse : 25, avenue du Général Leclerc 92660 Boulogne-Billancourt cedex.*
- *des recommandations pour la prévention, l'hygiène et la sécurité lors de la projection des mortiers et bétons est disponible sur le site : www.asquapro.asso.fr.*

19 www.spoth-btp.fr.

8

Gestion des déchets du chantier[20]

[20] Consulter le guide de la FNTP de 2005 intitulé : les principes de gestion des déchets de chantier.

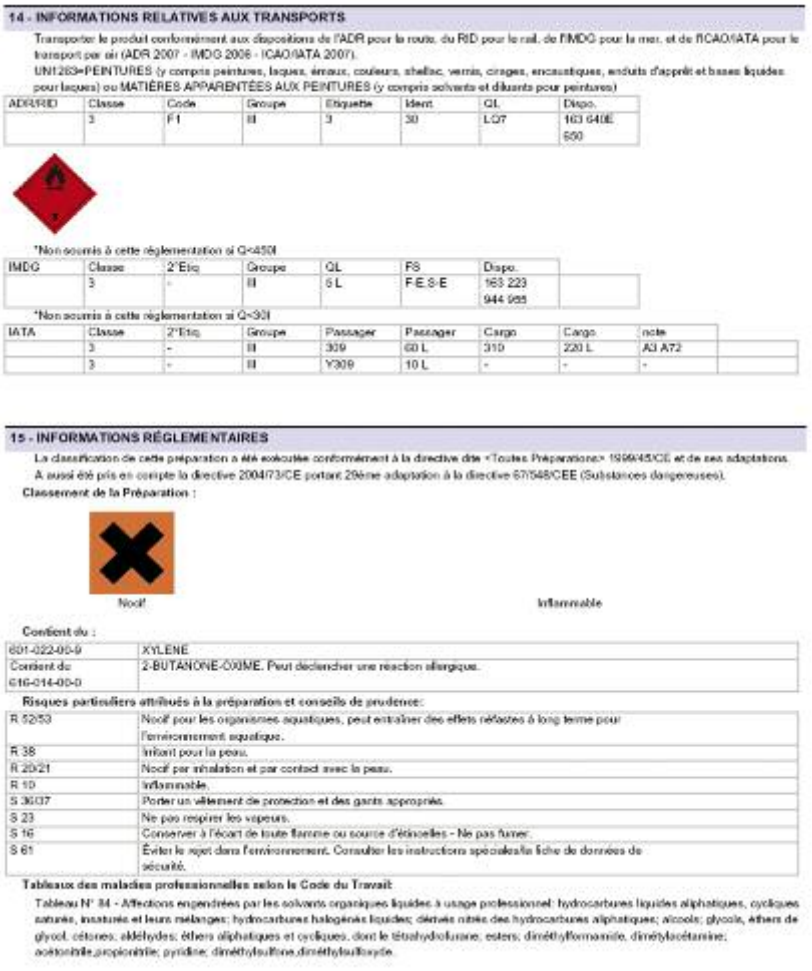
8.1 Rappel des obligations

8.2 Cas d'un chantier de réparation et/ou de renforcement d'un ouvrage en maçonnerie

UNE ÉDITION DU SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES (STRRES) / FÉVRIER 2016

Un chantier est considéré comme une **installation classée** s'il peut présenter des dangers ou des inconvénients pour la commodité du voisinage, la santé, la sécurité, la salubrité publique, l'agriculture, la protection de la nature et de l'environnement. Cette installation est soumise à **autorisation** ou à **déclaration** suivant la gravité des dangers ou des inconvénients qu'elle présente.

Les contraintes sont imposées par des lois et décrets qui sont regroupés dans le **Code de l'Environnement**[21].



14 - INFORMATIONS RELATIVES AUX TRANSPORTS

Transporter le produit conformément aux dispositions de l'ADR pour la route, du RID pour le rail, de l'IMDG pour la mer, et de l'ICAO/IATA pour le transport par air (ADR 2007 - IMDG 2006 - ICAO/IATA 2007).

UN1263=PEINTURES (y compris peintures, laques, émaux, couleurs, shellac, vernis, cirages, encaustiques, enduits d'apprêt et bases liquides pour laques) ou MATIÈRES APPARENTÉES AUX PEINTURES (y compris solvants et diluants pour peintures)

ADR/RID	Classe	Code	Groupe	Etiquette	Ident.	QL	Dispo.
	3	F1	II	3	30	LQ7	163 640E 650

*Non soumis à cette réglementation si Q<450l

IMDG	Classe	2°Etiq.	Groupe	QL	FS	Dispo.
	3	-	II	5 L	F-E,S-E	163 223 944 955

*Non soumis à cette réglementation si Q<30l

IATA	Classe	2°Etiq.	Groupe	Passager	Passager	Cargo	Cargo	note
	3	-	II	309	60 L	310	220 L	A3 A72
	3	-	II	Y309	10 L	-	-	-

15 - INFORMATIONS RÉGLEMENTAIRES

La classification de cette préparation a été exécutée conformément à la directive dite «Toutes Préparations» 1999/45/CE et de ses adaptations. A aussi été pris en compte la directive 2004/73/CE portant 29ème adaptation à la directive 67/548/CEE (Substances dangereuses).

Classement de la Préparation :

Nocif Inflammable

Contient du :

601-022-00-9	XYLENE
Contient du 616-014-00-0	2-BUTANONE-OXIME. Peut déclencher une réaction allergique.

Risques particuliers attribués à la préparation et conseils de prudence:

R 52/53	Nocif pour les organismes aquatiques, peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique.
R 38	Irritant pour la peau.
R 20/21	Nocif par inhalation et par contact avec la peau.
R 10	Inflammable.
S 36/37	Porter un vêtement de protection et des gants appropriés.
S 23	Ne pas respirer les vapeurs.
S 16	Conserver à l'écart de toute flamme ou source d'étincelles - Ne pas fumer.
S 61	Éviter le rejet dans l'environnement. Consulter les instructions spéciales/la fiche de données de sécurité.

Tableaux des maladies professionnelles selon le Code du Travail:

Tableau N° 84 - Affections engendrées par les solvants organiques liquides à usage professionnel: hydrocarbures liquides aliphatiques, cycliques saturés, insaturés et leurs mélanges; hydrocarbures halogénés liquides; dérivés nitrés des hydrocarbures aliphatiques; alcools; glycols, éthers de glycol, cétones, aldéhydes; éthers aliphatiques et cycliques, dont le tétrahydrofurane; esters; diméthylformamide, diméthylacétamine; acétonitrile,propionitrile; pyridine; diméthylsulfone,diméthylsulfoxyde.

Figure n° 35 : extrait d'une fiche de données de sécurité (FDS) de la société Parexlanko

[21] *Consulter le site : www.legifrance.gouv.fr.*

L'entrepreneur doit demander avant tout début des travaux les **autorisations nécessaires de démarrage des travaux et les certificats d'acceptation préalable pour les déchets dangereux (DIS).** Il doit tenir compte des sujétions liées à la récupération, au transport et au traitement de tous les déchets générés par les travaux.

> Il est rappelé que les déchets industriels sont répartis en trois classes :

- **Classe I,** les déchets industriels spéciaux (DIS) : déchets considérés comme dangereux (par exemple, des déchets contenant des solvants organiques nocifs) ;
- **Classe II,** les déchets industriels banals (DIB) : déchets considérés comme non dangereux (par exemple, des emballages non souillés) assimilables à des déchets ménagers et pouvant être traités dans les mêmes filières ;
- **Classe III,** les déchets industriels inertes (par exemple, des abrasifs pour la préparation d'un support non utilisés, des morceaux de béton…).

Le décret 2002-540 du 18 avril 2002 donne la liste des déchets. Certains d'entre eux sont **considérés comme dangereux** (marqués par un astérisque) s'ils contiennent des **concentrations** (pourcentage en poids) suffisantes de certaines substances listées dans l'annexe 1 du présent décret.[22]

> L'élimination des déchets comporte deux filières :

- l'élimination proprement dite dans des installations d'élimination des déchets par mise en décharge ou par incinération ;
- la valorisation des déchets par tri, recyclage et réutilisation, soit sur place, soit hors du chantier, soit en centre spécialisé.

> L'élimination des trois catégories de déchets :

- cas des déchets de classe I (les déchets industriels spéciaux ou DIS, dangereux) :
  - les DIS sont éliminés dans des installations, soit de stockage, soit d'incinération autorisées,
  - ils sont soumis à une **traçabilité** de leur origine à leur destination au moyen d'un **bordereau de suivi des déchets industriels** (BSDI),
  - ils doivent recevoir un **certificat d'acceptation préalable** du gestionnaire de l'installation d'élimination des déchets avant de pouvoir être déposés dans celle-ci,
  - **ils sont contrôlés** lors de leur admission dans l'installation d'élimination des déchets afin de vérifier s'ils sont bien conformes aux **déchets autorisés** dans cette installation;

[22] *Consulter les pages 7074 à 7088 du Journal Officiel (JO) n°93 du 20 avril 2002.*

Certains composants utilisés lors des travaux sont **toxiques** (diluants réactifs de résines époxydiques, solvants, constituants des polyuréthannes, etc.), **irritants** (liants minéraux à base de silicates, ciments, liants organiques de nature basique, etc.) ou encore **inflammables** (solvants, etc.). Ils peuvent donc être considérés comme dangereux et relever de la catégorie des déchets industriels spéciaux **(DIS).**

Même lorsque cela n'est pas imposé par la réglementation, un **maître d'ouvrage** a intérêt à évaluer les types de déchets que l'ensemble des opérations de réparation ou de renforcement de son ouvrage (par exemple, lors de la préparation du support) va générer, sachant que certains des déchets peuvent provenir de l'ouvrage existant (produits de démolition) et d'autres des travaux.

> Cela peut permettre :

- d'une part, d'éviter des **surprises désagréables en cours de travaux,** comme la découverte de produits amiantés ;
- d'autre part, aux clauses du **marché**, de prendre en compte la gestion des déchets et, si possible, de leur valorisation sous forme de clauses environnementales. De telles clauses sont autorisées par le **Code des Marchés Publics.**

L'entrepreneur, lors du **choix des produits,** se doit de proposer au **maître d'œuvre,** parmi ceux utilisables, c'est–à-dire ayant la même efficacité globale (propriétés mécaniques et chimiques, facilité de mise en œuvre et coût), ceux qui sont les **moins dangereux pour la santé du personnel qui les utilise et qui sont les moins polluants** pour l'environnement.

Il faut noter, qu'en matière d'hygiène et de sécurité, les normes de produits ne traitent que de généralités et de principes. Par exemple, les normes de la série **NF P 95-1**** renvoient à l'étiquetage et celles de la série **NF EN 1504-**** à l'avertissement de **l'article ZA1 de l'annexe ZA,** qui renvoie **au site EUROPA**[23]**.**

L'entrepreneur se doit d'organiser son chantier pour faciliter le tri des déchets. En effet, par exemple, le mélange de déchets de catégories différentes peut conduire à classer la totalité des déchets en DIS, dont le coût de traitement est très supérieur à celui des deux autres catégories.

> Il est donc nécessaire de bien identifier les méthodes et les techniques utilisées lors de travaux de restauration du béton ou de renforcement structural, qui génèrent les volumes les plus importants de déchets appartenant aux trois classes. Il convient de citer :

- les techniques de préparation d'une réparation ou d'un renforcement (par exemple, nettoyage des parements, création de niches dans la maçonnerie…), qui génèrent :
  - des déchets de diverses classes lors du décaissement d'une voûte, lors du terrassement à l'arrière d'un mur de soutènement,

[23] *http : /europa.eu.int/comm/enterprise/construction/internal/dangsub/dangmain.htm.*

- cas des déchets de classe II (déchets industriels banals ou DIB) :
  - les déchets d'emballages industriels ou commerciaux peuvent être soumis à l'obligation de valorisation si les quantités de déchets produites sont importantes (>1 100 litres / semaine),
  - les autres déchets DIB, s'ils ne sont pas valorisés, sont éliminés dans des installations, soit de stockage, soit d'incinération autorisées ;
- cas des déchets de classe III (les déchets industriels inertes) :
  - les déchets industriels de classe III, s'ils ne sont pas valorisés, sont stockés dans une décharge de classe III autorisée.

- des mélanges de matériaux, les uns issus de la structure (débris de pierres, de mortier, poussières…) et les autres de la technique utilisée (par exemple, des abrasifs minéraux ou métalliques lors d'un « sablage » à sec ou de l'eau chargée de débris lors d'un forage) ;

- les techniques de projection de mortiers ou de bétons, surtout par voie sèche, qui génèrent, à cause des rebonds, des déchets inertes en fortes quantités ;

- les injections à l'aide de produits à base de résines de synthèses, qui peuvent générer des DIS.

9

Fiche synthétique du PAQ

I ◀◀ Retour au sommaire I

UNE ÉDITION DU SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES (STRRES) / FÉVRIER 2016

La réalisation de travaux de réparation et/ou de renforcement des ouvrages en maçonnerie comporte plusieurs opérations enchaînées les unes aux autres. Chaque opération peut faire l'objet d'une **procédure** et d'un **cadre de document de suivi,** mais tous ces différents documents peuvent être regroupés dans une **procédure d'exécution principale** (par exemple, la procédure de réalisation de tirants d'enserrement…) et **un cadre des documents de suivi d'exécution principal.**

> Il est rappelé que le marché fixe, en s'inspirant des dispositions du présent guide :

- les stipulations (prescriptions de moyens et spécifications de produits) à respecter, ainsi que la consistance des essais et contrôles. Ces obligations sont reprises dans les **procédures** et les **cadres des documents de suivi ;**
- ce qui relève des contrôles interne, extérieur voire externe ;
- un cadre de **PAQ** avec la liste minimale des procédures et des cadres de documents de suivi à fournir ;
- le calendrier et les conditions de présentation au **maître d'œuvre** des différents documents constituants le **SOPAQ** et le **PAQ** au fur et à mesure du déroulement de l'opération chantier (de la remise des offres à la signature du **marché** et de la période de préparation des travaux à leur réception)[24].

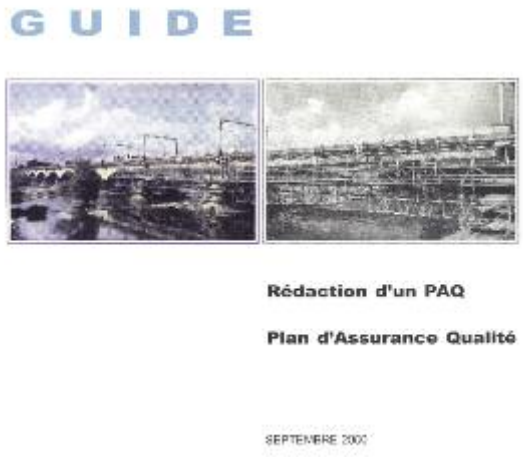


Figure n° 36 : guide du STRRES 2000 relatif à la rédaction des PAQ en réparation

[24] *Le schéma de l'assurance qualité sur le chantier de la page 13 du guide de rédaction d'un PAQ du STRRES donne dans le détail les actions qualité à entreprendre et le calendrier à respecter.*

La présente fiche complète, en tant que de besoin et en tenant compte des stipulations des **guides maçonnerie, la fiche de maçonnerie du guide de 2000 du STRRES** relative à la rédaction d'un Plan d'Assurance de la Qualité (PAQ).

Bien entendu, cette fiche très générale doit être adaptée à la méthode de réparation et/ou de renforcement à mettre en œuvre. Par exemple, la fiche relative à un rejointoiement diffère fortement de celle sur l'injection d'une maçonnerie….

Il est possible de consulter également, d'une part, **le guide de décembre 1991, SETRA, SNCF, TP de France et SNBATI : Mise en œuvre des Plans d'Assurance de la Qualité – Exécution des ouvrages en béton armé et précontraint** et, d'autre part, le **fascicule 65 du CCTG.**

RÉPARATION DES MAÇONNERIES
Points sensibles, critiques et d'arrêts

Rep	Description des phases d'exécution	Intervention du contrôle interne			Intervention du contrôle externe à l'entreprise (1)	Intervention du contrôle extérieur (2)
		Points sensibles (3)	Points critiques (4)	Points d'arrêts (5)		
1	**PAQ,** pendant le période de préparation des travaux : mise au point du **document d'organisation générale** et établissement des documents suivants : **- les procédures d'exécution ;** **- les cadres des documents de suivi**		Oui			Oui
2	**PAQ,** avant toute réalisation d'une opération : mise au point **des procédures d'exécution et des cadres des documents de suivi** correspondants		Oui	Oui		Oui
3	**PAQ,** pendant la réalisation d'une opération : respect des procédures, renseignement des documents de suivi et information du **maître d'œuvre** (6)		Oui			Oui
4	**Choix des produits et des matériels**					
	La consultation fixe la famille du produit et les caractéristiques à respecter, voire une technique d'exécution — **L'entrepreneur** propose une ou des solutions - **Le marché** entérine la ou les solutions. (7)					
	Une épreuve d'étude est nécessaire pour choisir le produit lorsque les exigences à satisfaire sortent du domaine d'emploi de la norme ou il n'y a pas de norme sur le sujet (8)		Oui	Oui		Oui
5	**Contrôle et réception des produits et matériaux**					
	Transport, réception et stockage		Oui	Oui		Oui
	Essais d'identification rapide et/ou contrôle des caractères normalisés		Oui	Oui		Oui
6	**Relevé contradictoire de l'état de la maçonnerie**		Oui			Oui

RÉPARATION DES MAÇONNERIES Points sensibles, critiques et d'arrêts						
Rep	Description des phases d'exécution	Intervention du contrôle interne			Intervention du contrôle externe à l'entreprise (1)	Intervention du contrôle extérieur (2)
		Points sensibles (3)	Points critiques (4)	Points d'arrêts (5)		
7	**Épreuve de convenance de préparation du support (rejointoiement…)**		Oui			Oui
8	**Épreuve de convenance d'une opération**					
	Préparation générale de l'épreuve (documents nécessaires et organisation de l'ensemble des opérations)		Oui			Oui
	Préparation du support et/ou travaux préalables		Oui			Oui
	Préparation des produits et matériaux		Oui			Oui
	Réalisation de l'épreuve		Oui			Oui
	Après réalisation de l'épreuve		Oui			Oui
9	**Contrôles d'exécution d'une opération**					
	Préparation du support et/ou travaux préalables		Oui			Oui
	Préparation de l'opération		Oui			Oui
	Préparation des produits et matériaux		Oui			Oui
10	**Levée du point d'arrêt avant travaux**		Oui	Oui		Oui
	Réalisation de l'opération (mise en œuvre des produits, mise en œuvre de tirants…)		Oui			Oui
	Après réalisation de l'opération		Oui	Oui		Oui
(pm)	Travaux complémentaires (nettoyage, revêtement de protection…)	Reprendre la présente fiche à partir de la tâche n°2				
11	**Réception des travaux**					
	Remise des résultats des essais		Oui			Oui
	PAQ : remise au **maître d'œuvre** de l'ensemble des documents originaux constituants le PAQ		Oui	Oui		Oui
	Vérifications diverses					Oui

Tableau n° 14 : liste des points sensibles, critiques et d'arrêt, relative à une opération de réparation d'un ouvrage en maçonnerie

LÉGENDE :

(1) il s'agit d'une surveillance et assistance du contrôle interne effectuée par un représentant indépendant de la direction du chantier. Il doit être prévu au **marché**.

(2) il s'agit du **maître d'œuvre** du client (voire du client) ou d'un organisme habilité par lui (laboratoire ou bureau d'études).

(3) **un point sensible** est un point de l'exécution qui doit particulièrement retenir l'attention. Dans le présent tableau, l'ensemble des points sensibles n'a pas été développé.

(4) **un point critique** est un point de l'exécution qui nécessite une matérialisation du **contrôle interne** sur un **document de suivi d'exécution** ainsi qu'une information préalable du **contrôle extérieur** pour que ce dernier puisse effectuer son contrôle, s'il le juge nécessaire. L'intervention du **contrôle extérieur** n'est pas indispensable à la poursuite de l'exécution.

(5) **un POINT D'ARRÊT** est un point critique pour lequel un accord formel du **maître d'œuvre** (ou d'un organisme habilité par lui) est nécessaire à la poursuite de l'exécution. Les délais de préavis et les délais de réponse du **maître d'œuvre** sont fixés dans le **marché** ainsi que les dispositions à prendre à l'issu du délai de réponse en l'absence de réaction du **maître d'œuvre** (situation très anormale). Les **POINTS D'ARRÊT** doivent être prévus au **marché.**

(6) **le marché** peut prévoir qu'un double (photocopie) des documents de suivi renseignés soit remis au **maître d'œuvre** au fur et à mesure du déroulement des travaux (une facilité pour le **contrôle extérieur**). Il est rappelé que l'ensemble des documents originaux constituants le PAQ doit être remis au **maître d'œuvre** au moment de la réception des travaux.

(7) ce point recouvre les périodes de préparation du projet, de consultation des entreprises, de jugement des offres, de mise au point et de signature du **marché.**

(8) si cette épreuve est prévue au **marché**.

LISTE DES FIGURES

Figure n° 1 : Coupe longitudinale schématique d'un pont en maçonnerie 26

Figure n° 2 : Demi-élévation et demi-coupe longitudinale d'un pont en maçonnerie 27

Figure n° 3 : Demi-coupe transversale et demi-vue en bout d'un pont en maçonnerie ...27

Figure n° 4 : Demi-coupe transversale schématique d'un pont en maçonnerie 28

Figure n° 5 : Coupe transversale type d'un mur de soutènement en maçonnerie 28

Figure n° 6 : Coupe transversale d'un mur en pierre sèche (crédit photo Wikipédia) 29

Figure n° 7 : Application de la loi de Jurin 63

Figure n° 8 : Résultats de mesures de teneur en eau dans un mur 64

Figure n° 9 : Comment se forment les pluies acides 66

Figure n° 10 : Conséquences sur la pierre 66

Figure n° 11 : Graphique donnant l'évolution de la masse volumique 67

Figure n° 12 : Disposition des grains dans une coupe d'un marbre calcaire 69

Figure n° 13 : Ressaut hydraulique au franchissement d'un ouvrage 69

Figure n° 14 : Affouillement local à l'amont d'un appui 90

Figure n° 15 : Effets des dragages sur le cours d'eau 91

Figure n° 16 : Conséquences de la réduction de section d'un cours d'eau 91

Figure n° 17 : Conséquences de la suppression de méandres sur un cours d'eau 92

Figure n° 18 : Conséquences de la réalisation, en 1963, de crèches sensées renforcer les fondations des piles du pont de Thouaré en Loire-Atlantique.....92

Figure n° 19 : Effet de seuil dû aux protections trop larges autour des fondations 93

Figure n° 20 : Conséquences des barrages sur le cours d'eau.....93

Figure n° 21 : Schéma de modification des hydrogrammes de crue dû aux aménagements urbains et agricoles.....94

Figure n° 22 : Désordres dus au rapprochement des culées causé par un glissement de terrain.....96

Figure n° 23 : Désordres dus à un écartement des culées.....97

Figure n° 24 : Désordres dus au tassement d'une culée 97

Figure n° 25 : Désordres dus au tassement d'une pile.....98

Figure n° 26 : Dégradations type sur un massif de fondation superficielle.....101

Figure n° 27 : Voile en béton au pourtour d'une fondation et érosion en sous-face.....101

Figure n° 28 : Désordres dans une fondation profonde 104
Figure n° 29 : Observations sur la base d'un appui par ouverture d'une fouille 109
Figure n° 30 : Exemples de mises à sec des appuis d'un ouvrage 110
Figure n° 31 : Désordres pouvant survenir lors d'une réduction du débouché 111
Figure n° 32 : Cloutage dissymétrique 117
Figure n° 33 : Schéma de principe de l'essai de tachabilité 156
Figure n° 34 : Symboles de danger (extrait d'un document Weber et Broutin) 201
Figure n° 35 : Extrait d'une fiche de données de sécurité (FDS) de la société Parexlanko ..206
Figure n° 36 : Guide du STRRES 2000 relatif à la rédaction des PAQ en réparation 212

LISTE DES PHOTOS

Photo n° 1 : Pont Fabricio (dit des quatre têtes) construit en 62 avant J. C. (crédit photo D. Poineau) 42
Photo n° 2 : Etat de l'église Notre-Dame de Royan construite entre 1955 et 1958 (crédit photo D. poineau) 43
Photo n° 3 : Couronnement d'un garde-corps à Dinan Côtes d'Armor (crédit photo D. Poineau) 44
Photo n° 4 : Déformation liée à un affouillement sous la fondation de la pile mettant en danger le pont de Régereau sur le Vicoin (crédit photo J-p Levillain) ...47
Photo n° 5 : Déformation du mur en retour d'un pont en maçonnerie (crédit photo J. M. Michotey) 48
Photo n° 6 : Fissure des moellons dans une voûte composite associant la pierre et la brique (crédit photo J. M. Michotey) 49
Photo n° 7 : Fracture à la jonction entre le bandeau et la voûte avec écrasement d'une des pierres de la clé de voûte (crédit photo LRPC) 49
Photo n° 8 : Désorganisation locale (crédit photo CDOA Corse) 50
Photo n° 9 : Désorganisation de la maçonnerie d'une pile (photo CDOA 70) 51
Photo n° 10 : Désorganisation quasi-totale des joints (crédit photo J. M. Michotey) 51
Photo n° 11 : Désorganisation locale d'un parement en briques (crédit photo J. M. Michotey) 52
Photo n° 12 : Désorganisation de surface du parement en pierres calcaire du pont de Favernay due au gel (crédit photo DDE 70) 52
Photo n° 13 : Désorganisation profonde de pierres calcaires mettant en jeu la stabilité et la capacité portante du mur d'une habitation (crédit photo D. Poineau) 53

Photo n° 14 : Exemple d'emploi de matériaux inadaptés : pierres et mortier de hourdage (crédit photo LRPC) 55

Photo n° 15 : Dissolution du mortier des joints (crédit photo LRPC) 56

Photo n° 16 : Coulures d'humidité et de calcite et pierres sensibles au gel sous un ancien pont ferroviaire (crédit photo DDE 52) 57

Photo n° 17 : Incidences destructrices de la végétation fidèle alliée de l'eau (crédit photo CDOA 78) 58

Photo n° 18 : Racine dans une des barbacanes d'un mur de soutènement (crédit photo D. Poineau) 58

Photo n° 19 : Désorganisation des murs en retour d'une culée (crédit photo LRPC) 59

Photo n° 20 : Pont romain sur l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine (crédit photo Paul Munhoven Wikipedia) 59

Photo n° 21 : Effondrement d'un pont lors des crues du Sud-est en 1992 (crédit photo DDE 84) 60

Photo n° 22 : Effets sur la pierre du passage des eaux de pluie au travers du remblai et des murs de tête (crédit photo D. Poineau) 61

Photo n° 23 : Effets des remontées d'humidité et de sels dans les piles (crédit photo D. Poineau) 62

Photo n° 24 : A gauche alvéolisation pathologique de la pierre calcaire des remparts d'Avignon à droite vermiculures sculptées d'un bandeau en pierres de taille d'un immeuble parisien (crédit photo D. Poineau) 62

Photo n° 25 : Utilisation de pierres calcaires sensibles au gel (crédit photo LRPC) 65

Photo n° 26 : Maladie d'une pierre calcaire (crédit photo D. Poineau) 67

Photo n° 27 : Desquamation de pierres calcaires de l'église de Villejuif (crédit photo D. Poineau) 68

Photo n° 28 : Carottes prélevées dans les pierres calcaires du pont de Villeneuve-Loubet (crédit photo P. Vion) 70

Photo n° 29 : Altération de briques de parement (crédit photo D. Poineau) 72

Photo n° 30 : Efflorescences très inesthétiques (crédit photo D. Poineau) 76

Photo n° 31 : Fissure due à l'absence d'un joint de fractionnement (crédit photo D. Poineau) 80

Photo n° 32 : Joint de fractionnement (photo D. Poineau) 80

Photo n° 33 : Concrétions de calcite sous l'intrados d'une voûte (crédit photo J. M. Michotey) 81

Photo n° 34 : Gargouille de l'aqueduc de la Vanne entre Arcueil et Cachan par temps de gel (crédit photo D. Poineau) 83

Photo n° 35 : Désorganisation des briques du bandeau due à l'eau et au gel (crédit photo J. M. Michotey) 84

Photo n° 36 : Conception d'un pont ancien (crédit photo J.L. Michotey).....85

Photo n° 37 : Transports de charges lourdes par fardier attelé à des chevaux de trait - Rechargement de chaussée excessif et circulation à ras des tympans sur un pont de la RN 3 (crédit photo D. Poineau et J. M. Michotey) 85

Photo n° 38 : Fracturation et déversement d'un avant-bec chargé par un élargissement mal conçu (crédit photo LRPC).....86

Photo n° 39 : Effondrement d'une maquette (crédit photo D. Poineau) 97

Photo n° 40 : Rupture due à l'affouillement d'une culée (crédit photo LRPC).....98

Photo n° 41 : Tassement d'une pile dû à un affouillement (crédit photo M. Virlogeux) 99

Photo n° 42 : Rupture due à un affouillement d'une pile (Crédit photo Jean-Louis Michotey) 99

Photo n° 43 : Dégradation par abrasion d'une pièce de bois de fondation (crédit photo J. P. Levillain).....102

Photo n° 44 : Pont de Thouaré sur le Loire : désordres dans une crèche (crédit photo JP. Levillain).....104

Photo n° 45 : Désorganisation de la maçonnerie par la végétation (crédit photo J. M. Michotey) 113

Photo n° 46 : Désorganisation de l'enduit ciment et du mur de soutènement en maçonnerie (crédit photo D. Poineau).....115

Photo n° 47 : Exemple de travaux d'enduisage inadaptés à la maçonnerie (crédit photo D. Poineau) 115

Photo n° 48 : Traces des remontées d'humidité (crédit photo D. Poineau) 116

Photo n° 49 : Résultat du choc d'un convoi poussé sur une pile de l'ancienne Passerelle des Arts (crédit photo D. Poineau).....110

Photo n° 50 : Aqueduc d'Arcueil-Cachan, échafaudage volant pour des travaux de ragréage (crédit photo D. Poineau) 124

Photo n° 51 : Soutènement pendant les travaux de confortement d'un pont à la Poterne des Peupliers (crédit photo D. Poineau).....124

Photo n° 52 : Pierre clivée (crédit photo Anjougranitimport).....159

Photo n° 53 : Finition smillée (crédit photo D. Poineau) 160

Photo n° 54 : Finition bossagée (crédit photo D. Poineau).....160

Photo n° 55 : Finition sciée (crédit photo D. Poineau).....161

Photo n° 56 : Finition brochée (crédit photo D. Poineau) 161

Photo n° 57 : Mur en matériaux locaux (crédit photo D. Poineau).....163

Photo n° 58 : Pont en maçonnerie envahi par la végétation (crédit photo Cofex-Littoral) ...178

Photo n° 59 : Désorganisation de la maçonnerie par des arbustes (crédit photo CDOA 78) 179

Photo n° 60 : Dévégétalisation sur le pont Fabricio à Rome (crédit photo D. Poineau) . 180

Photo n° 61 : Pont de Villeneuve-Loubet avant travaux (crédit photo CG 06)..... 185

Photo n° 62 : Pont de Villeneuve-Loubet le jour de l'inauguration après travaux d'élargissement (crédit photo CG 06)..... 186

Photo n° 63 : Coulures d'eau et de calcite (crédit photo CDOA Corse)..... 187

Photo n° 64 : Décapage de coulure à THP (2500 bars) au pont des Abarines (crédit photo Cofex Littoral) 188

Photo n° 65 : Revêtement anti-graffiti permanent sur un mur à Paris (crédit photo D. Poineau) 190

Photo n° 66 : Equipements de protection individuelle (crédit photo D. Poineau)..... 203

LISTE DES TABLEAUX

Tableau n° 1 : Appellations des différentes chaux..... 75

Tableau n° 2 : Coefficients de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau..... 77

Tableau n° 3 : (Extrait de la thèse de N. Domède)..... 79

Tableau n° 4 : Coefficients de dilatation des pierres naturelles et de la terre cuite..... 79

Tableau n° 5 : Prescriptions générales d'emploi pour les pierres naturelles massives d'épaisseur ≥ 80 mm 154

Tableau n° 6 : Traitements de surface des pierres..... 159

Tableau n° 7 : Tests rapides d'identification des pierres 164

Tableau n° 8 : Identification de la grosseur du grain d'une pierre..... 164

Tableau n° 9 : Caractéristiques des briques 166

Tableau n° 10 : Classes de résistance des briques supérieures ou égales à 10MPa..... 167

Tableau n° 11 : Extrait de la norme NF EN 197-1..... 171

Tableau n° 12 : Tableau 7 extrait du DTU 20.1 relatif au dosage des mortiers pour le montage de pierres naturelles fermes 10 < fb (MPa) ≤ 40..... 176

Tableau n° 13 : Tableau 6 extrait du DTU 20.1 relatif au dosage des mortiers pour le montage de pierres naturelles dures fb > 40 MPa..... 176

Tableau n° 14 : liste des points sensibles, critiques et d'arrêt, relative à une opération de réparation d'un ouvrage en maçonnerie 213

Le comité de pilotage et de révision des guides révisés « Maçonnerie » était composé de :

Christian TRIDON, président du STRRES
Bernard FARGEOT, président d'honneur du STRRES
Gérard COLLE, vice-président d'honneur du STRRES
Jean-Pierre GADRET, vice-président d'honneur du STRRES
Hubert LABONNE, vice-président d'honneur du STRRES
Didier CHABOT, COFEX ILE-DE-FRANCE
Gil CHARTIER, RCA
Christian TOURNEUR, FREYSSINET
Jeanne NGO BIBINDE, FNTP
Régis DORBESSAN, OPPBTP
Patrick MOUTEL, OPPBTP
Michel FRAGNET, expert
Yves PICARD, expert

Les guides révisés « Maçonnerie » ont été rédigés par :

Daniel POINEAU (expert) et **Alain BOUINEAU** (expert)

avec la participation de :

Jean-Pierre LEVILLAIN, (JPL conseil)
Gilles PINGANAUD, (PAREXLANKO)
Christian TRIDON, (ARTEM)
Gérard COLLE, (COFEX LITTORAL)
Bernard PLU, (SNCF)

Ce document a été réalisé avec le concours
de la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP)
et de la Fédération Française du Bâtiment (FFB)