



HAL
open science

Proposition de méthodologie pour la conservation des murs anciens en maçonnerie de pierre

Frédéric Magnen

► **To cite this version:**

Frédéric Magnen. Proposition de méthodologie pour la conservation des murs anciens en maçonnerie de pierre. Génie civil. 2013. dumas-01133821

HAL Id: dumas-01133821

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01133821>

Submitted on 20 Mar 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
PARIS**

MEMOIRE
présenté en vue d'obtenir
le DIPLOME d'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : CONSTRUCTION - AMENAGEMENT
OPTION : BATIMENT

par
Frédéric MAGNEN

Proposition de méthodologie pour la conservation
des murs anciens en maçonnerie de pierre

Soutenu le 2 juillet 2013

JURY

PRESIDENT : Monsieur Francis GUILLEMARD, Professeur titulaire de chaire

MEMBRES : Monsieur Gabriel BAJEUX, Professeur associé

Monsieur Michel CAZENAVE, Professeur associé

Monsieur Xavier CESPEDES, Professeur associé

Monsieur Joseph PAIS, Professeur associé

Monsieur Jean-Sébastien VILLEFORT, Professeur agrégé

Madame Valérie FLIS-PLISSON, Ingénieur à la CAPEB

(Confédération de l'Artisanat et des Petites Entreprises du Bâtiment)

Monsieur Vincent FOUSSARD, Architecte

Madame Claudine MALFILATRE, Ingénieur de recherche au CTMNC

(Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction)

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Monsieur Gabriel BAJEUX qui, par ses conseils précis, m'a aidé à élargir ma réflexion dans le cadre de ce mémoire.

Ma gratitude va aussi à Monsieur Vincent FOUSSARD, architecte qui, depuis plusieurs années, me fait bénéficier de sa grande compétence en matière de réhabilitation.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance au Conservatoire National des Arts et Métiers, cette belle institution qui cherche à concilier savoir et expérience.

LISTE DES NOTATIONS

Lorsque les illustrations (figures ou tableaux) n'ont pas été réalisées par l'auteur de ce mémoire, leurs sources sont citées entre crochets : le nom de l'auteur du document est suivi, si possible, de la date de parution (mise entre parenthèses) puis du numéro de la page si l'illustration est tirée d'un livre. Tous les ouvrages ainsi mentionnés sont répertoriés dans la bibliographie.

Exemple de notation : [Dupont (2010), p.80].

Il arrive aussi que l'auteur ait légèrement modifié des documents mais qu'il puisse être utile au lecteur de connaître la source originelle. Elle est alors précédée des mots 'd'après'.

Exemple de notation : [d'après Dupont (2010), p.81].

A : section porteuse (m^2)

C_h : coefficient de réduction pour la hauteur du mur

C_u : coefficient de réduction pour l'épaisseur du mur

e : excentricité (m)

e_{he} : excentricité due aux charges horizontales, y compris vent (m)

e_p : excentricité en pied de mur (m)

e_{init} : excentricité initiale (m)

E : module de Young (en MPa)

f_b : résistance moyenne normalisée à la compression des pierres (MPa)

f_d : résistance corrigée à la compression de la maçonnerie (MPa)

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie (MPa)

f_m : résistance moyenne à la compression du mortier (MPa)

G : module de cisaillement (en MPa)

h : hauteur réelle du mur (m)

h_{eff} : hauteur effective du mur (m)

K : coefficient réducteur appliqué aux résistances

L : longueur porteuse du mur (m)

M_p : moment fléchissant en pied de mur (kN.m)

N_{Ed} : charge appliquée (kN)

N_p : charge verticale agissant en pied de mur (kN)

N_{Rd} : capacité portante (kN)

P : charge ponctuelle appliquée (kN)

R : dureté superficielle (en mm)

u : épaisseur réelle du mur (m)

u_{eff} : épaisseur effective du mur (m)

V : vitesse de propagation du son dans la pierre (en m/s)

w_m : épaisseur des joints prise en compte (cm)

γ : déformation liée au cisaillement

γ_M : coefficient partiel de sécurité

ε : déformation liée à la compression ou à la traction

λ : élancement

λ_{eff} : élancement effectif

ν : coefficient de Poisson

ρ : : poids volumique (kN/m^3)

σ : contrainte de compression ou de traction (en MPa)

σ_{Ed} : contrainte de compression appliquée (MPa)

σ_{Rd} : contrainte de compression admissible (MPa)

τ : contrainte de cisaillement (en MPa)

ϕ_p : coefficient de réduction prenant en compte l'élancement et l'excentricité en pied de mur

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	7
1 COMPOSITION D'UN MUR	8
1.1 ASSEMBLAGE DES COMPOSANTS.....	8
1.1.1 <i>Murs uniquement constitués de pierres.....</i>	<i>9</i>
1.1.2 <i>Murs à deux parements séparés par un blocage.....</i>	<i>9</i>
1.1.3 <i>Murs organiques</i>	<i>10</i>
1.2 COMPOSANT 1 : LA PIERRE	11
1.2.1 <i>Classification selon un critère géologique.....</i>	<i>11</i>
1.2.2 <i>Classification selon le critère de la dureté.....</i>	<i>13</i>
1.2.3 <i>Caractéristiques mécaniques</i>	<i>14</i>
1.2.4 <i>Tableau de synthèse pour les pierres calcaires</i>	<i>17</i>
1.3 COMPOSANT 2 : LE JOINT	18
1.3.1 <i>Morphologie des joints.....</i>	<i>18</i>
1.3.2 <i>Fabrication du mortier.....</i>	<i>19</i>
1.3.3 <i>Caractéristiques mécaniques du mortier</i>	<i>23</i>
1.4 COMPOSANT 3 : LE METAL.....	25
2 AGENTS DESTRUCTEURS	27
2.1 AGENT DESTRUCTEUR 1 : L'EAU	27
2.1.1 <i>Origines.....</i>	<i>27</i>
2.1.2 <i>Quantification</i>	<i>28</i>
2.1.3 <i>Mesures.....</i>	<i>31</i>
2.1.4 <i>Actions</i>	<i>33</i>
2.2 AGENT DESTRUCTEUR 2 : LES SELS	41
2.2.1 <i>Nature des sels</i>	<i>42</i>
2.2.2 <i>Manifestations</i>	<i>44</i>
2.3 AGENTS DESTRUCTEURS DIVERS	45
2.3.1 <i>Les organismes biologiques</i>	<i>45</i>
2.3.2 <i>La corrosion</i>	<i>46</i>
2.3.3 <i>Le bois</i>	<i>47</i>
3 TRAITEMENTS DES SURFACES	48
3.1 DIAGNOSTIC.....	48

3.2	ACTIONS : TRAITEMENTS DE L'EPIDERME	48
3.2.1	<i>Décapage</i>	48
3.2.2	<i>Nettoyage</i>	49
3.2.3	<i>Renforcement</i>	58
3.3	ACTIONS : TRAITEMENTS DE L'ÉPAISSEUR SUPERFICIELLE	59
3.3.1	<i>Reprise des joints de maçonnerie</i>	59
3.3.2	<i>Retaille à vif</i>	60
3.3.3	<i>Ragréage en pierre reconstituée</i>	60
3.3.4	<i>Placage</i>	62
4	STRUCTURE : CAPACITES PORTANTES	64
4.1	MESURE	64
4.2	EVALUATION DES CONTRAINTES DE COMPRESSION	65
4.2.1	<i>1^{ère} méthode : Règle du 'un dixième'</i>	66
4.2.2	<i>2^{ème} méthode : Guide Socotec (fiche 7.70)</i>	67
4.2.3	<i>3^{ème} méthode : Eurocode 6</i>	69
4.2.4	<i>Comparaison des trois méthodes d'évaluation</i>	74
4.3	MODELISATION GLOBALE	78
4.3.1	<i>Exemple de modèle élastique linéaire</i>	78
4.3.2	<i>Modèles anisotropiques et élastoplastiques</i>	80
5	STRUCTURE : FISSURES ET DESORDRES	82
5.1	DIAGNOSTIC	82
5.1.1	<i>Fissures dues à des tensions internes</i>	83
5.1.2	<i>Fissures dues au sol</i>	85
5.2	MESURE	88
5.2.1	<i>Fissuromètres</i>	88
5.2.2	<i>Témoins</i>	88
5.2.3	<i>Jauges</i>	89
5.2.4	<i>Capteurs</i>	89
5.3	ACTIONS	92
5.3.1	<i>Interventions en superstructure</i>	92
5.3.2	<i>Interventions en infrastructure</i>	96
	CONCLUSION	100

INTRODUCTION

Les maçonneries anciennes en pierre font trop souvent l'objet de traitements ponctuels sans suivi ni coordination sur le long terme. Il convient donc de mettre sur pied une véritable méthode de conservation. Ce type de méthodologie, assez rare, est d'autant plus nécessaire que de nombreuses techniques innovantes apparaissent pour le traitement des maçonneries anciennes. Il est donc utile de les répertorier et de définir dans quelles situations leur utilisation est opportune.

Pour chacun des thèmes exposés, la méthodologie suivra généralement une progression similaire : observation, mesure, action. L'objectif de ce mémoire est de réaliser un document opérationnel qui puisse servir de référence lors de la rédaction des études préalables ou des CCTP (cahiers des clauses techniques particulières).

Nous excluons de notre étude les façades en pierre qui ont été recouvertes d'enduit ainsi que la réfection des statues qui entre plutôt dans le champ de la restauration d'art. Par ailleurs, notre pratique professionnelle en région parisienne nous conduira à accorder une place importante à la pierre la plus courante dans cette métropole : le calcaire. Nous nous plaçons dans le cas de missions courantes (à budget limité), sans nous restreindre au domaine spécifique des Monuments Historiques.

Après avoir décrit, dans une première partie, les principaux composants d'un mur, nous répertorierons, dans une seconde partie, les agents extérieurs qui participent à sa lente destruction. Nous étudierons ensuite à la fois les traitements de surface (appliqués notamment lors des ravalements) et les renforcements en profondeur (injection de résines, insertion d'armatures métalliques ou composites...).

Un des trois derniers chapitres sera plus précisément consacré à la capacité porteuse d'un mur en maçonnerie ancienne de pierres.

1 COMPOSITION D'UN MUR

Dans un premier temps, nous étudierons la composition d'un mur en décrivant la façon dont sont assemblés les différents éléments.

Dans un second temps, nous détaillerons les trois composants principaux : la pierre, le joint et le métal.

Précisons, au préalable, un point de vocabulaire : les pierres prennent en effet des dénominations différentes selon la façon dont elles sont choisies et préparées. On parle de cailloux, de moellons (ébauchés ou smillés) ou de pierres de taille.

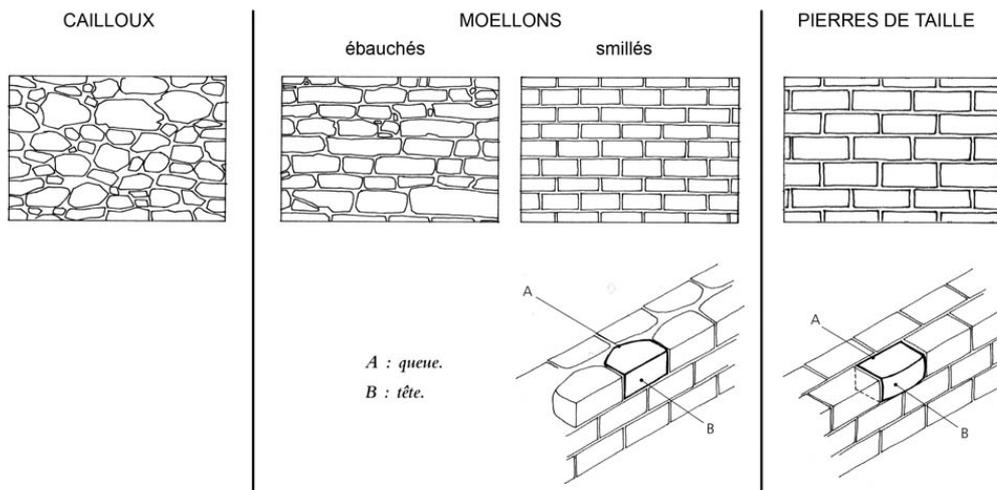


Figure 1 : Essai de classification entre cailloux, moellons et pierres de taille

1.1 ASSEMBLAGE DES COMPOSANTS

On peut distinguer essentiellement trois types de murs en maçonnerie :

- les murs d'appareil régulier composés, dans toute leur épaisseur (simple ou double), de pierres géométriquement taillées
- les murs constitués de deux parements en pierres de taille (ou en moellons) englobant un 'blocage', c'est-à-dire une masse de matériaux divers agglomérés par des mortiers en chaux ou à base de terre argileuse
- les murs 'organiques' (ou 'mixtes') dont les arêtes, les soubassements, les chaînages, les encadrements de baies sont faits en pierre de taille, tandis que le reste est constitué de petite maçonnerie où le liant domine.

1.1.1 Murs uniquement constitués de pierres

1.1.1.1 Murs à épaisseur simple

L'appareil peut être réglé (les blocs ont la même largeur en façade) ou alterné. Les assises sont régulières (c'est-à-dire de hauteur constante) ou irrégulières... Les raffinements sont innombrables.

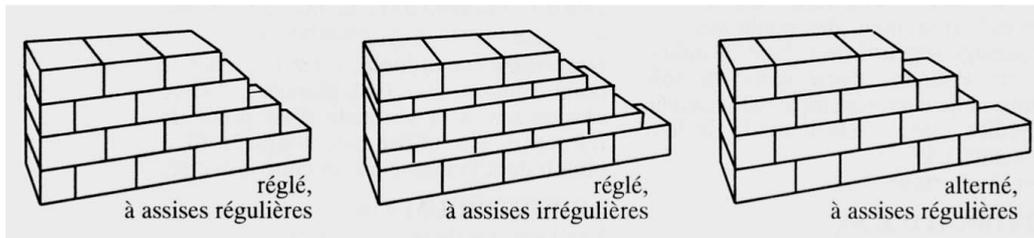


Figure 2 : Exemples d'appareils à épaisseur simple

[De Vigan (2003), p.80]

1.1.1.2 Murs à épaisseur double

La maçonnerie est essentiellement composée de deux types de pierre. Le premier type regroupe les pierres dont la profondeur est inférieure à l'épaisseur de la façade, le second les pierres (plus rares) qui ont un parement visible de chaque côté du mur. Ces pierres traversantes sont appelées 'parpaings' ou boutisses parpaignes'.

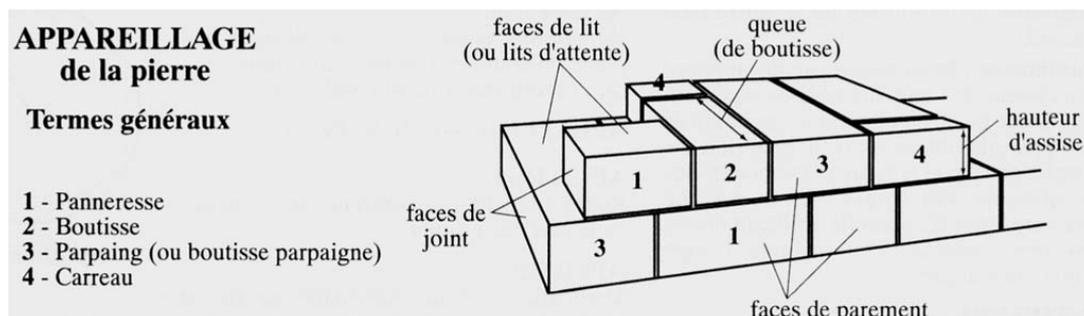


Figure 3 : Dénomination des pierres selon leur emplacement

[De Vigan (2003), p.80]

1.1.2 Murs à deux parements séparés par un blocage

Le 'blocage' entre les parements est plus ou moins épais et sa composition peut varier.

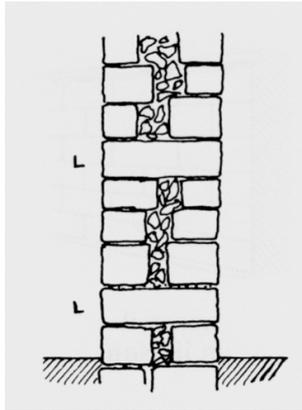


Figure 4 : Deux parements distincts mais proches
 L : liasonnement par des boutisses parpaignes
 [De Vigan (2003), p.602]

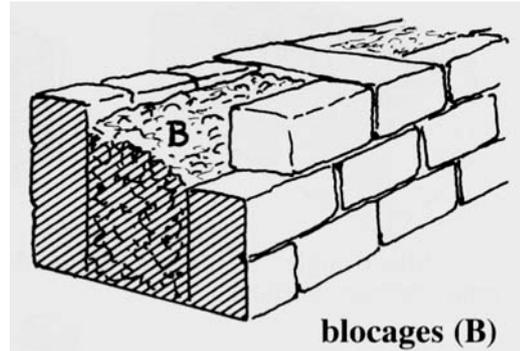


Figure 5 : Parements séparés par un blocage épais
 [De Vigan (2003), p.160]

1.1.3 Murs organiques

Il s'agit de murs qui ont une constitution double.

L'usage de la pierre est restreint à certaines assises et à des éléments verticaux qui peuvent être assimilés à des colonnes. Le reste est constitué de maçonnerie banchée où le liant prédomine et assure la cohésion de matériaux divers, généralement de petites tailles (galets, cailloux). Nous n'étudierons pas ce type de mur dans ce mémoire.

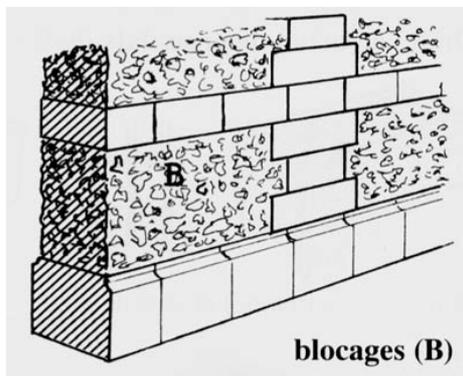


Figure 6 : Murs avec chaînages verticaux et horizontaux
 [De Vigan (2003), p.160]

1.2 COMPOSANT 1 : LA PIERRE

Nous expliciterons deux critères de classification (géologie et dureté) puis nous définirons les propriétés mécaniques qui sont utilisées pour décrire une pierre. Enfin, nous proposerons un tableau de synthèse pour les pierres calcaires.

1.2.1 Classification selon un critère géologique

L'écorce terrestre contient trois grandes familles de roches : les roches magmatiques (appelées aussi endogènes ou plutoniques), les roches sédimentaires (appelées aussi exogènes) et les roches métamorphiques.

L'écorce terrestre contient 65% de roches magmatiques (dont 22% pour le seul granit), 8% de roches sédimentaires (dont 4% d'argile et 2% de carbonate, parmi lesquels les calcaires), 27% de roches métamorphiques (dont 1% seulement de marbre).

1.2.1.1 Roches magmatiques

Selon sa vitesse de refroidissement, le magma qui remonte vers la surface terrestre donne naissance en se solidifiant à trois types de roches magmatiques :

- si la remontée a lieu brusquement (via par exemple une cheminée volcanique), le refroidissement est rapide et le magma se transforme en roches à caractère vitreux où les minéraux, faute de temps, n'ont pu se développer. C'est le cas du basalte, de la nivoirine ou de l'andésite.
- si la remontée est lente, de gros cristaux ont suffisamment de délai pour apparaître au sein d'une matrice sans grain. C'est ainsi que se forme le porphyre.
- si la remontée est très lente, les minéraux disposent d'assez de temps pour prendre la forme de grains. On obtient les granits.

1.2.1.2 Roches sédimentaires

Ces roches, situées en surface, peuvent avoir des compositions très diverses et recouvrent 75% des terres émergées.

Elles proviennent de l'évolution plus ou moins marquée d'un sédiment. Rappelons que les sédiments sont des dépôts minéraux ou organiques qui s'accumulent en couches, à l'état de débris, en milieu généralement subaquatique.

1.2.1.2.1 Roches calcaires

La pierre calcaire contient plus de 75% de carbonate de calcium (CaCO_3) : c'est d'ailleurs sa définition selon la norme NF B 10-101 actualisée en janvier 2008.

Elle est issue de l'agglomération au fond des océans de deux constituants principaux :

- des grains issus de roches diverses suite à la décomposition par l'érosion
- des squelettes d'animaux marins (notamment des coquillages).

Dans une même carrière, les différentes couches superposées (appelées bancs) présentent souvent des duretés différentes.

Les bancs de calcaires durs sont dits 'de liais', 'de cliquart' ou 'de roche'. Le banc de liais contient la pierre dont le grain est le plus fin. Le banc de roche est constitué du calcaire le plus dur d'une carrière : le grain est assez inégal mais très résistant.

Les bancs de calcaire tendre sont dits 'de lambourde' ou 'de vergelé'. On parle aussi pour cette seconde catégorie de banc franc ou royal. On qualifiera un banc tendre par l'adjectif 'royal' si le calcaire est à grain fin et par l'adjectif 'franc' si la pierre contient plus de coquillages.

Notons que certains calcaires présentent de minces filons d'argiles qui constituent une faiblesse potentielle (notamment parce qu'ils conduisent l'humidité).

Spécificité du calcaire : le calcin

Le calcin est une pellicule (épaisse de quelques millimètres) qui se dépose à la surface du calcaire. Cette croûte est plus dure que la pierre et la protège tout en permettant néanmoins à la vapeur d'eau de passer. C'est de la calcite (carbonate de calcium cristallisé) qui se dépose en surface, apportée essentiellement par l'eau de carrière (dont est gorgée la pierre peu après son extraction) avant qu'elle ne s'évapore. Plus précisément, l'eau draine vers la surface des sels de calcium (bicarbonate de calcium) qui recristallisent sous forme CaCO_3 lors de l'évaporation.

Certains affirment que le calcin peut se reconstituer sous l'action de la pluie qui apporterait les acides faibles nécessaires à la dissolution du CaCO_3 préalable à sa reformation en surface.

Il semble que ce deuxième processus soit inexistant ou négligeable par rapport à celui ayant lieu sous l'action de l'eau de carrière.

1.2.1.2.2 Roches siliceuses

Les grès sont des pierres composées de grains de sable fin, généralement quartzeux, agglutinés ensemble naturellement par un ciment dont la nature est variable (calcaire, siliceuse ou argileuse). Certaines sortes de grès peuvent être employées dans les édifices ; beaucoup d'autres sont rejetées à cause de leur propriété d'absorber et de garder indéfiniment leur humidité.

1.2.1.3 Roches métamorphiques

Ces roches sont issues de la transformation (ou 'métamorphose') des roches magmatiques ou sédimentaires suite à des mouvements tectoniques qui les entraînent vers les profondeurs du sol.

Au contact de l'énergie interne au globe terrestre, les roches initiales y sont soumises à des températures et des pressions qui altèrent leur composition chimique. On assiste en particulier à une recristallisation.

Voici quelques exemples de transformation :

calcaire → marbre (à la différence des calcaires, ils peuvent être polis)

grès → quartzite

granits → orthogneiss

basalte → amphibolite

argile → schiste (ex : ardoise) → micaschiste → paragneiss

Dans ce dernier exemple, la roche obtenue varie selon l'intensité des pressions appliquées. Il n'est d'ailleurs pas rare que des micaschistes composent une couche géologique intermédiaire entre les couches de schiste et celles de paragneiss. Toutes ces roches sont issues de la rigidification (plus ou moins forte) de fines couches argileuses (constituées par des dépôts sédimentaires successifs).

1.2.2 Classification selon le critère de la dureté

On raye la surface de la pierre à l'aide du scléromètre de Martens. La largeur de la rayure obtenue caractérise la 'dureté superficielle'. Cette largeur peut aller de 0,5 mm pour les pierres dures jusqu'à 3,5 mm pour les pierres tendres.

La norme NF B 10-30 répartit les pierres en quatorze catégories. Plus la pierre est dure et difficile à tailler, plus le chiffre indiquant sa catégorie est élevé.

Ce chiffre est obtenu par la formule suivante :

$$I = \frac{V}{5435} + (2,91 \rho) + \frac{5,14}{R} - 4,59$$

où :

- V (en m/s) est la vitesse de propagation du son dans la pierre.
- ρ (en tonnes/m³) est la masse volumique.
- R (en mm) est la dureté superficielle.

Certaines catégories sont regroupées dans des ensembles plus larges dont les contours peuvent varier d'un type de pierre à l'autre.

Tableau I : Dureté (classification générale)
[De Vigan (2003), p.759]

-Pierre **très tendre** : moins de 2.
 -Pierre **tendre**, coeff. 2 - 2,5 - 3 - 3,5 - 4.
 -Pierre **demi-ferme**, coefficients 4,5 - 5 - 5,5 - 6 - 6,5 et 7.
 -Pierre **ferme**, coefficients 7,5 et 8.
 -Pierre **dure**, coefficients 8,5 - 9 - 9,5 - 10 - 10,5 - 11 - 11,5 - 12.
 -Pierre **très dure**, coefficient 13.
 -Pierre **extra-dure**, coefficient 14.

Tableau II : Dureté des calcaires
[Bajeux (2013a), chap.10, p.16]

Tendre	I = 0,5 à 3,5
Mi tendre	I = 4 à 5,5
Ferme	I = 6 à 7,5
Dure	I = 8 à 10,5
Froide	I = 11 à 14

Remarquons que la terminologie est un peu différente pour les pierres calcaires : elles sont qualifiées de 'froides' si leur coefficient de taille est supérieur ou égal à 11.

1.2.3 Caractéristiques mécaniques

La détermination des caractéristiques mécaniques des pierres de taille peut être complexe, en raison du manque d'homogénéité de ces matériaux naturels, comparativement à des matériaux préfabriqués.

Des prélèvements représentatifs par carottage doivent être effectués en laboratoire pour déterminer la structure pétrographique de la pierre. L'idéal est de parvenir à identifier les carrières d'extraction.

1.2.3.1 Lit et délité

Certaines pierres (en particulier les roches sédimentaires) sont composées de couches superposées. Ce ne sont donc pas des matériaux isotropes.

Lorsque le lit est disposé horizontalement dans un mur porteur, la pierre est posée correctement car la charge verticale correspondant au poids de l'édifice s'exerce perpendiculairement aux couches et a tendance à les resserrer.

En revanche, si le lit est monté dans le plan vertical, on dit que la pierre est en 'délit'. Dans ce cas, la capacité porteuse de la pierre est très inférieure car les différentes couches de pierre vont avoir tendance à se dissocier sous l'effet de la charge appliquée. C'est d'autant plus préjudiciable quand le plan du lit est parallèle au nu de la façade (comme dans la situation de la pierre V2 sur la figure suivante) car les pierres voisines ne peuvent s'opposer au 'dessalement' des lits par contrebutement (contrebutement qui a lieu en revanche dans le cas de la pierre P2 sur la figure suivante).

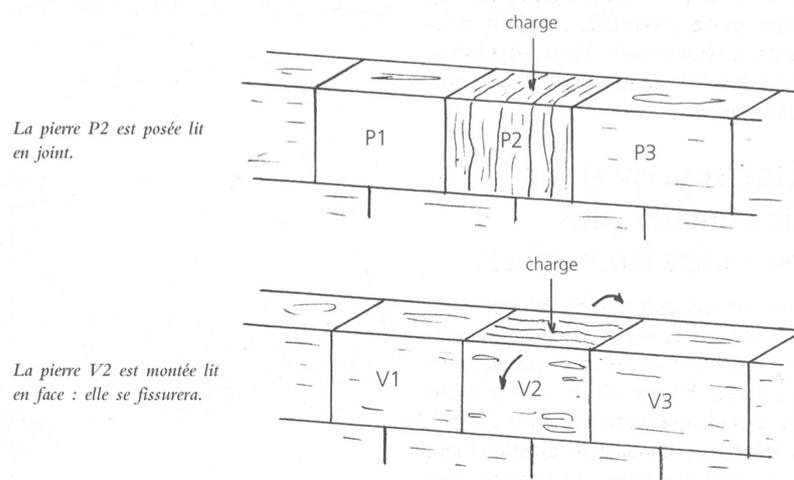


Figure 7 : Deux types de montages en délit

[Laurent (2005), p.15]

1.2.3.2 Masse volumique

Cette mesure est exprimée en kg/m^3 .

$$\text{masse volumique (apparente)} = \frac{\text{masse du matériau sec}}{\text{volume apparent}}$$

Le volume apparent est défini par les arêtes de l'échantillon sans tenir compte des vides intérieurs (pores).

1.2.3.3 Résistance à la compression

Cette mesure s'exprime en kg/cm^2 , en Mpa (ou en bar).

$$1 \text{ kg/cm}^2 = 9,81 \text{ N} / (100 \text{ mm}^2) = 0,0981 \text{ N/mm}^2 = 0,0981 \text{ MPa} = 0,981 \text{ bar}$$

La résistance à l'écrasement n'est pas toujours fonction de la densité. Par exemple, la pierre extraite de la carrière de Rognes a une densité de 1870 kg/m^3 et une résistance à l'écrasement

de 97 kg/cm² (= 9,51 MPa) alors que le banc franc de Saint-Leu, qui n'a qu'une densité de 1690 kg/m³ (densité inférieure à la précédente) présente pourtant une résistance à l'écrasement de 120 kg/cm² (11,77 MPa).

1.2.3.4 Résistance à la traction

Ce paramètre n'est utile que dans le cas de pierres destinées à travailler en flexion (linteaux, consoles, dalles de balcon...)

Tableau III : Résistance à la compression et à la traction

[d'après Socotec (2009), p.2]

Pierres	Résistance à la compression simple (rupture) (MPa)	Résistance à la traction simple (rupture) (MPa)
Calcaire ordinaire	2 à 12	0,5 à 5
Calcaire compact	7 à 40	4 à 15
Grès	40 à 1 00	0,5 à 5
Schiste	7 à 60	0 à 10
Granit	60 à 1 80	6 à 15

1.2.3.5 Vitesse de propagation du son

Les travaux du CEBTP (centre expérimental de recherche et d'étude du bâtiment et des travaux publics) ont montré que la vitesse de propagation du son dans la pierre est en relation directe avec la résistance à la compression. Plus la vitesse de propagation du son dans la pierre est élevée, plus la résistance à la compression est grande.

(pierre tendre) 1500m/s < son < 6200m/s (pierre dure)

La quantité d'eau contenue dans la pierre n'influence pratiquement pas le résultat obtenu.



Figure 8 : Auscultation sonique appliquée à un bloc de béton.

[CEBTP]

1.2.4 Tableau de synthèse pour les pierres calcaires

Tableau IV : Caractéristiques principales des pierres calcaires

les plus courantes en façade

[Virolleaud (2011), p.175]

Dureté	N°	Dénomination et origine	Densité (kg/m ³)	Rupture à l'écrasement (kg/cm ²)
Pierres calcaires				
Très tendre	1	Tuffeau de Touraine (Indre-et-Loire) Billy (Aisne), banc royal	1 200 à 1 400 1 370 à 1 500	35 à 50 35 à 50
Tendre	2	Vierzy (Aisne) Sireuil (Charente), tendre Saint-Vaast (Oise), banc royal Fontvieille (Bouches-du-Rhône) La Boulaye (Oise), banc royal	1 575 à 1 650 1 600 à 1 725 1 600 1 650 à 1 725 1 650 à 1 775	60 à 90 50 à 65 50 à 75 50 à 75 65 à 90
Tendre	3	Méry-sur-Oise, banc franc Saint-Maximin (Oise), roche douce Saint-Même (Charente) Méry-sur-Oise, banc royal Sireuil (Charente), roche ferme Saint-Vaast (Oise), roche douce	1 650 à 1 800 1 650 à 1 775 1 675 à 1 850 1 650 à 1 850 1 700 à 1 850 1 900	65 à 100 75 à 110 50 à 90 75 à 100 65 à 90 90 à 110
Demi-ferme	4	Savonnières (Meuse) Saint-Maximin (Oise), roche demi-ferme Estaillades (Vaucluse) Migné (Vienne)	1 750 à 1 950 1 775 à 1 950 1 900 à 2 000 2 050 à 2 175	80 à 160 110 à 200 130 à 250 125 à 175
Demi-ferme	5	Caen (Calvados) Branvilliers (Meuse), liais Lavoux (Vienne), fin	1 900 à 2 050 1 900 à 2 500 2 050 à 2 200	130 à 300 180 à 250 170 à 250
Ferme	6	Saint-Maximin (Oise), roche ferme Ravières (Yonne) Lérouville (Meuse)	1 950 à 2 250 2 250 à 2 200 2 300 à 2 400	200 à 330 325 à 450 225 à 325
Ferme	7	Larrys (Yonne), roche ferme Chauvigny (Vienne), roche ferme Euville (Meuse), roche ferme	2 150 à 2 300 2 200 à 2 375 2 300 à 2 450	350 à 600 250 à 450 205 à 450
Dure	8	Massangis (Yonne), liais Saint-Maximin (Oise), roche dure Vilhonneur (Charente)	2 250 à 2 350 2 250 à 2 500 2 350 à 2 435	475 à 625 350 à 525 425 à 650
Dure	9	Massangis (Yonne), roche jaune Échaillon (Isère), blanc Larrys (Yonne), sous-moucheté	2 250 à 2 375 2 350 à 2 550 2 350 à 2 500	525 à 700 500 à 850 700 à 950
Dure	10	Larrys (Yonne), moucheté	2 450 à 2 600	900 à 1 100
Froide	11	Villebois (Ain) Arudy (Basses-Pyrénées)	2 325 à 2 675 2 650 à 2 750	750 à 1 250 1 000 à 1 475
Froide	12	Corgoloin (Côte-d'Or) Comblanchien (Côte-d'Or) Hydrequent (Pas-de-Calais)	2 550 à 2 700 2 550 à 2 700 2 650 à 2 750	1 350 à 1 700 1 350 à 1 700 1 450 à 1 600
Froide	13	Hauteville (Ain)	2 600 à 2 800	1 600 à 1 875

1.3 COMPOSANT 2 : LE JOINT

Les matériaux utilisés en maçonnerie se divisent en deux grandes catégories : les matériaux solides (moellons, pierres...) que nous venons d'étudier et les matériaux agglutinants (chaux, ciment, plâtre...).

1.3.1 Morphologie des joints

Selon l'épaisseur des joints, on parle de joints vifs, maigres ou gras.

Dans le premier cas, les pierres sont posées sans mortier.

Dans les deux autres cas, les joints sont fins ou larges.

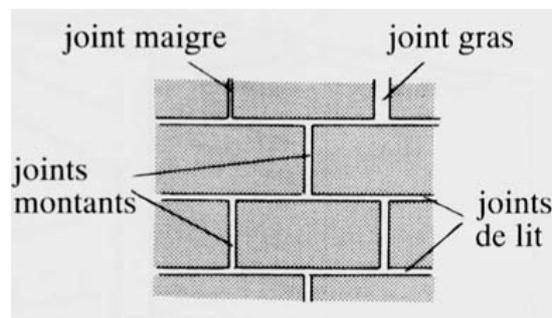


Figure 9 : Dénomination des joints
selon leur position et leur épaisseur
[De Vigan (2003), p.578]

1.3.1.1 Partie apparente des joints

Les joints affleurants sont préconisés dans le cas de pierres tendres qui ont tendance à s'épaufrer.

Les joints creux sont possibles avec les pierres dures. Ils permettent de souligner les arêtes, ce qui est souvent du meilleur effet. Les joints saillants sont plus fragiles (même lorsqu'ils contiennent du ciment).

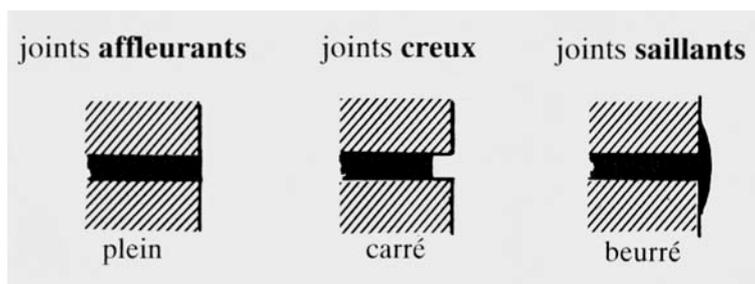


Figure 10 : Typologie des joints
[d'après De Vigan (2003), p.579]

1.3.1.2 Partie interne des joints

Lors du hourdage de la maçonnerie, deux méthodes sont possibles, selon que l'on décide, ou non, de remplir de mortier l'ensemble de l'interstice horizontal entre deux pierres superposées.

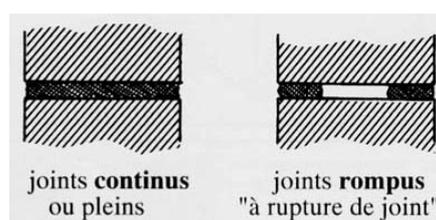


Figure 11 : Exemples de joints de hourdage
[d'après De Vigan (2003), p.578]

1.3.2 Fabrication du mortier

Nous nous attacherons essentiellement à la description des joints à base de sable et de chaux car ils sont les plus répandus et les plus adaptés à la maçonnerie de pierre.

On rencontre aussi des mortiers 'bâtards' (composés d'un mélange de ciment et de chaux hydraulique). Le DTU 20.1 prévoit des limites pour le dosage de ce type de mortier.

De façon générale, un sous-dosage en chaux (ou en ciment) peut induire une fragilisation du joint qui, dans certains cas, sera pulvérulent. A l'inverse, un surdosage risque de produire un joint trop rigide qui se fissurera faute de pouvoir s'adapter aux mouvements de la façade.

Outre les adjuvants (utilisés notamment pour modifier la couleur), les dosages recommandés pour la restauration contemporaine sont les suivants :

Tableau V : Composition des mortiers traditionnels selon l'Eurocode 6

(Annexe Nationale Française : partie 1.1)

[Hurez (2009), p.42]

Éléments de maçonnerie	Mortier de chaux hydraulique	Mortier bâtard		Mortier de ciment
		Ciment + Chaux		
En pierre (calcaire, granit, grès)	250 à 350 kg/m ³	150 à 275 kg/m ³	100 à 200 kg/m ³	
	M5	Avec un dosage global de 350 à 400 kg/m ³		
En pierre tendre (Tuffeau de Touraine)		100 à 125 kg/m ³	100 à 200 kg/m ³	
		M2,5		

Ces valeurs sont des valeurs moyennes tabulées.
 Les caractéristiques finales des mortiers durcis, non adjuvés, dépendent principalement :
 - des dosages exacts et des types de ciments et chaux utilisés (ex. CEM II 32.5 N) ;
 - de la compacité granulométrique des sables utilisés (par exemple, idéalement pour un sable 0-4 mm avec taux de fines $\leq 100 \mu\text{m}$ inférieur à 10 %).

CEM est la notation internationale désignant les ciments. Il faut distinguer 5 catégories suivant la composition : CEM I à CEM V.

M5 et M2,5 sont des catégories définies selon la résistance à la compression (voir chapitre 1.3.3).

1.3.2.1 Sable

Un sable est un granulat fin qui est produit par la désagrégation naturelle d'une roche minérale. Les sables sont généralement siliceux, quartzueux ou calcaires... Ils servent surtout à former la partie inerte des mortiers.

Les sables les plus estimés sont ceux qui sont exempts d'argile.

Dans le cas de maçonnerie en pierre calcaire, l'idéal est que le sable soit remplacé par de la sciure issue des pierres à hourder car, dans ce cas, le joint dans son ensemble sera composé de carbonate de calcium, comme les pierres du mur, ce qui réduit les risques d'incompatibilité.

1.3.2.2 Chaux

La chaux est le liant le plus adapté aux maçonneries de pierre.

On distingue principalement deux types de chaux :

- la chaux aérienne : elle est produite à partir de calcaire pur (c'est-à-dire du carbonate de calcium CaCO₃)
- la chaux hydraulique : elle est produite à partir de calcaire contenant jusqu'à environ 25 % d'argile.

Par souci de quantification, il est défini un taux d'hydraulicité qui dépend du pourcentage d'argile dans la roche utilisée. Moins il y a d'argile au départ, plus la prise est lente.

Tableau VI : Caractéristiques comparées des liants selon Louis Vicat

[Laurent (2005), p.34]

Type de chaux	Argile	Indice d'hydraulicité	Prise
Chaux aérienne grasse	0 %	voisin de 0	plusieurs mois
Chaux aérienne maigre	quelques %	0 à 0,10	plusieurs mois
Chaux faiblement hydraulique	5,3 à 8,2 %	0,10 à 0,16	du 16 ^e au 30 ^e jour
Chaux moyennement hydraulique	8,2 à 14,8 %	0,16 à 0,31	du 10 ^e au 15 ^e jour
Chaux simplement hydraulique	14,8 à 19,1 %	0,31 à 0,42	du 5 ^e au 9 ^e jour
Chaux éminemment hydraulique	19,1 à 21,8 %	0,42 à 0,5	du 2 ^e au 4 ^e jour
Ciments courants	environ 23 %	0,5 à 0,6	quelques heures

Ce qui distingue aussi une chaux très hydraulique et un ciment, c'est la température de cuisson. Ainsi, pour une pierre calcaire initiale contenant 23% d'argile, on obtiendra une chaux hydraulique si la température est limitée à 850°C ou un ciment si la température est portée à 1400°C.

Notons enfin qu'il existe des chaux hydrauliques artificielles (XHA) mais elles sont peu perméables à la vapeur d'eau et leur usage en réhabilitation est donc moins répandu.

1.3.2.2.1 Chaux aérienne

Son appellation normalisée est CL (pour 'calcic lime').

Par exemple, 'CL 90' signifie que la chaux contient au moins 90 % de CaO (chaux vive).

Le processus se fait en trois phases : cuisson, extinction, recarbonatation. Au terme du processus, le carbonate de calcium (constituant la pierre de départ) est reformé, comme le décrit le schéma suivant.

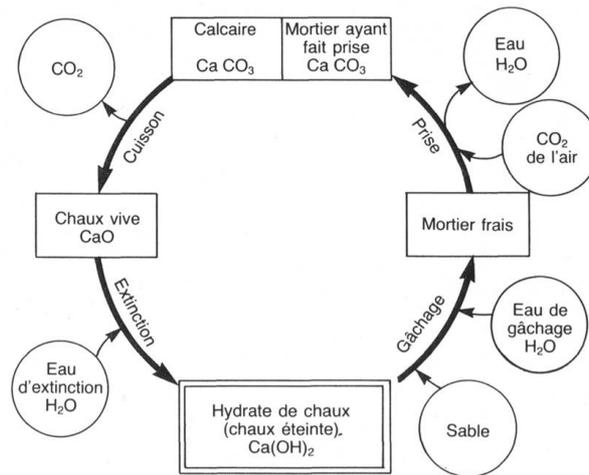


Figure 12 : Cycle de la chaux

[d'après Froidevaux (1986), p.40]

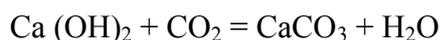
Cuisson (ou calcination)

CaCO_3 (carbonate de calcium = pierre calcaire) + chaleur = CaO (oxyde de calcium = chaux vive) + CO_2 (gaz carbonique)

Extinction

$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ (eau) = $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hydroxyde de calcium = hydrate de chaux = chaux éteinte ou aérienne)

Recarbonatation



Notons que la formule de recarbonatation ne fait pas apparaître le rôle de l'eau résiduelle mêlée à la chaux éteinte. C'est cette eau qui, en s'évaporant, contribue à attirer le CO_2 qui peut alors être fixé par la chaux éteinte.

C'est d'ailleurs la raison pour laquelle l'eau de gâchage (versée au moment du mélange avec le sable) est généralement ajoutée en quantité supérieure à celle théoriquement nécessaire à la seule 'extinction' du liant.

1.3.2.2 Chaux hydraulique naturelle

Son appellation normalisée est NHL (pour 'natural hydraulic lime'), anciennement XHN.

Cette chaux est fabriquée à partir de calcaires qui contiennent de l'argile, laquelle est composée, pour l'essentiel, d'éléments à base de silice (SiO_2).

Après la cuisson, on assiste à plusieurs phénomènes que l'on peut décrire en trois étapes.

Etape 1

La chaux vive (CaO) réagit sur la silice (SiO₂).



Etape 2

On ajoute de l'eau. Il se produit alors potentiellement deux processus en parallèles.

Processus 1



Comme pour la chaux aérienne, la chaux vive non consommée à l'étape 1 peut s'éteindre avec l'eau.

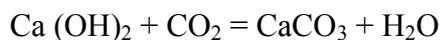
Processus 2



On observe l'hydratation des silicates qui cristallisent : cela constitue la prise hydraulique (le contact avec l'air n'est pas nécessaire). Il se forme un gel.

Etape 3

L'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂ (produit par les deux processus de l'étape 2) subit une recarbonatation au contact du CO₂ de façon identique à ce qui a été vu pour la chaux aérienne.



Cette recarbonatation constitue la prise aérienne de la chaux hydraulique.

1.3.3 Caractéristiques mécaniques du mortier

1.3.3.1 Généralités

Plusieurs principes peuvent être énumérés :

Principe 1 : La dureté des joints ne doit pas excéder celle des pierres.

Principe 2 : Plus les joints sont épais, plus leur résistance diminue et tend à se rapprocher de la résistance intrinsèque du mortier utilisé (tout en restant généralement supérieure, même pour les joints épais).

Dans les joints minces, le mortier bénéficie en effet d'un processus qui peut être comparé à une forme de frettage et qui est dû aux forces de frottement sur les pierres voisines.

1.3.3.2 Valeurs numériques

1.3.3.2.1 Mortiers anciens

Voici des valeurs qui ont pu être constatées sur des maçonneries anciennes :

Tableau VII : Résistance à l'écrasement de différents mortiers anciens
[d'après Laurent (2005), p.37]

Mortier en chaux grasse et sable ordinaire âgé de 14 ans	19 kg/cm ²	(1,86 MPa)
Enduit des démolitions de la Bastille (construite en 1370 et détruite en 1789)	55 kg/cm ²	(5,39 MPa)
Mortier en pouzzolane de Naples et de Rome	35 kg/cm ²	(3,43 MPa)

1.3.3.2.2 Mortiers contemporains

L'Eurocode 6 prévoit seulement l'usage de joints courants pour les maçonneries utilisant « des pierres naturelles prétaillées » : ni les joints minces (épaisseur allant de 1 à 3 mm), ni les mortiers allégés ne sont envisagés.

Un mortier de résistance (à la compression) égale à 5 MPa est classé M5.

Par ailleurs, les différents types de chaux hydrauliques sont associés à des valeurs normalisées de résistance à la compression :

NHL 2 : résistance à l'écrasement de 2 à 4,5 MPa

NHL 3,5 : résistance à l'écrasement de 3,5 à 10 MPa

NHL 5 : résistance à l'écrasement de 5 à 15 MPa

On observe qu'une chaux qui présente une résistance à l'écrasement de 7 MPa peut être classée aussi bien NHL 3,5 que NHL 5.

Les chaux aériennes (CL) sont peu résistantes à la compression (de 2 à 3 MPa).

1.4 COMPOSANT 3 : LE METAL

Les maçonneries anciennes en pierre dissimulent souvent en leur sein des tirants et des chaînages métalliques qui contribuent à la stabilité générale.

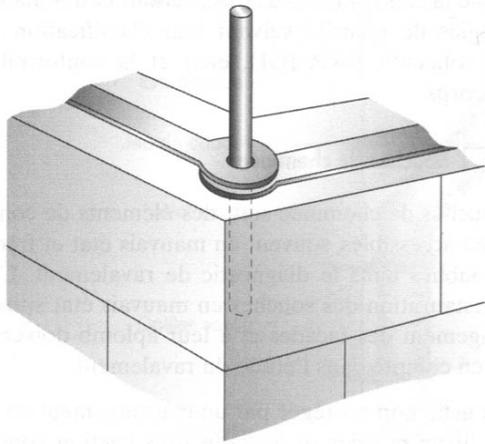


Figure 13 : Schéma de l'assemblage de deux tirants
[Virolleaud (2011), p.462]



Figure 14 : Assemblage de deux tirants
dans une pierre
[Vincent Foussard]

Lorsque le métal est situé à moins de 20 cm du parement, la détection peut se faire avec un 'Ferroscan', qui est un appareil dont le coût n'est pas prohibitif.



Figure 15 : Ferroscan Hilti PS 200
Détecteur et tablette numérique associée
[<http://www.hilti.fr>]



Figure 16 : Utilisation du 'Ferroscan'
[http://www.diamgroupe.com/travaux_speciaux.html]

Au-delà d'une profondeur de 20 cm, la localisation des éléments métalliques est souvent difficile et ne peut se faire qu'en ayant recours à des techniques complexes et coûteuses : repérage électromagnétique, réflectométrie radar (on parle aussi de 'sondages géoradar'), gammagraphie ...

2 AGENTS DESTRUCTEURS

La dégradation des murs a de multiples origines. Nous étudierons, en détail, deux d'entre elles : l'eau et les sels.

Enfin, nous mentionnerons, dans une dernière partie, trois phénomènes perturbateurs : l'action des organismes biologiques, la corrosion des éléments métalliques, la dilatation des corps étrangers en bois.

2.1 AGENT DESTRUCTEUR 1 : L'EAU

L'action destructrice de l'eau est renforcée par le gel et le vent qui participent à la décohésion des cristaux des roches.

2.1.1 Origines

Comme nous le montre le schéma suivant, les origines de l'eau agissant sur un mur sont multiples.

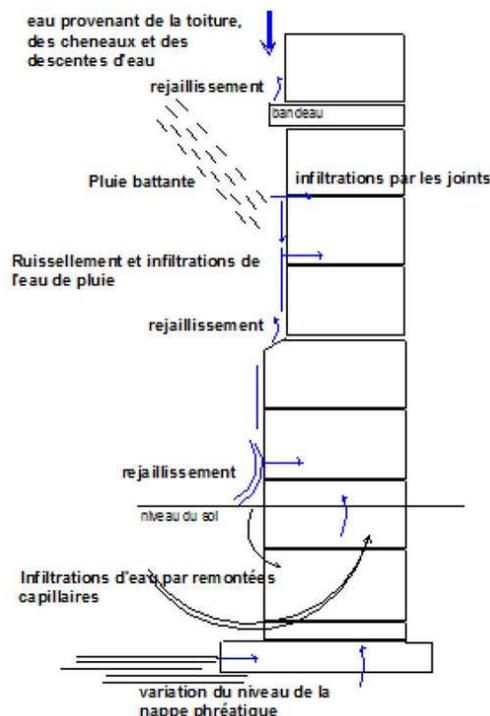


Figure 17 : Origines de l'eau agissant sur un mur en pierre

[Bajeux (2013b), chap.14, p.3]

2.1.1.1 Pluie

La pluie s'infiltré dans les murs par les joints mais aussi par les pierres elles-mêmes, à travers leurs pores. Le phénomène est particulièrement important à l'aplomb des surfaces horizontales (bandeaux, balcons) où se produisent des rejaillissements.

2.1.1.2 Nappe phréatique

La montée des nappes phréatiques a un impact non négligeable sur les maçonneries, via les fondations. La pénétration se fait par capillarité, selon un mouvement ascendant. Elle est d'autant plus pernicieuse que ses premières manifestations sont souvent invisibles.

2.1.1.3 Vapeur d'eau interne

Les logements produisent une quantité importante de vapeur d'eau (en particulier, dans la cuisine et la salle de bain). Des condensations peuvent avoir lieu au cœur de la maçonnerie si le point de rosée y est atteint, ce qui conduit alors à la progressive désagrégation du mur.

2.1.1.4 Fuite au niveau des canalisations

Il faut, avant tout examen, repérer la localisation des conduites diverses : eau potable, eaux usées ou ménagères, eau de chauffage...

2.1.2 Quantification

Certaines pierres peuvent être comparées à des éponges. Il est donc important de quantifier leur comportement en présence d'humidité.

2.1.2.1 Porosité (en %)

Il faut distinguer deux types de pores vides dans la pierre : les pores qui ne communiquent pas avec l'extérieur et les pores qui sont ouverts sur l'extérieur. Ce sont ces derniers qui contribuent à la 'porosité' d'une pierre.

La porosité est, en effet, définie comme la proportion des vides (accessibles à l'eau extérieure) par rapport au volume apparent d'une pierre. Cette mesure s'effectue en laboratoire sous pression.

La porosité est très variable d'une pierre à l'autre : elle est presque nulle pour les granits et les marbres mais peut atteindre 45% pour les calcaires tendres.

Une autre quantification, la ‘porométrie’, mesure la taille et la répartition des pores.

2.1.2.2 Perméabilité (en l/(m².h) ou en g/(dm².24h))

La perméabilité évalue la vitesse de pénétration horizontale de l’eau liquide à travers une surface verticale d’un matériau en un temps donné.

Elle est exprimée :

- soit en litres par m² en une heure
- soit en grammes (d’eau) par dm² en un jour

Un outil de mesure courant est la pipe de Karsten.

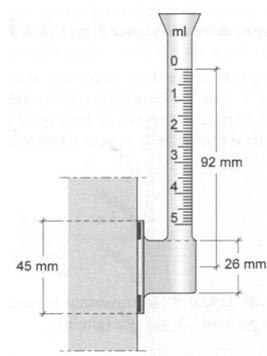


Figure 18 : Méthode dite ‘de la pipe Karsten’
[Virolleaud (2011), p.161]

Une éprouvette graduée en forme de pipe est placée contre le mur. L’étanchéité provisoire est assurée par du mastic. Le niveau d’eau se situe initialement à 92 mm. Sa baisse progressive est ensuite notée toutes les cinq minutes.

2.1.2.3 Capillarité (en g/(m².s^{0,5}))

Le coefficient C de capillarité quantifie l’absorption d’eau par capillarité (c’est-à-dire de bas en haut) à travers une surface horizontale d’un matériau en un temps donné. Ce coefficient s’exprime par la formule :

$$C = 100 \cdot M / (S \cdot \sqrt{t})$$

où

- M est la masse d’eau absorbée en grammes.
- S est la surface de la section inférieure de l’échantillon en m².
- t est la durée de l’immersion en secondes.

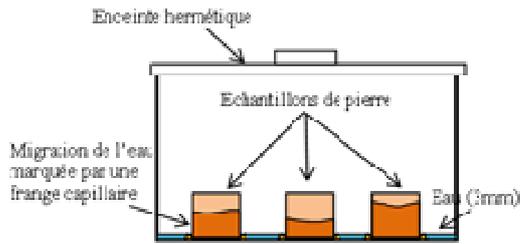


Figure 19 : Dispositif de mesure de la capillarité pour trois échantillons de pierre

[http://www.hybriprotech.eu/veille_technologique6.html]

Tableau VIII : Coefficients de capillarité de matériaux courants [Virolleaud (2011), p.162]

Matériau	Coefficient de capillarité C
Béton vibré	1
Brique	5
Grès	10
Mortier	15
Calcaire demi-ferme	20
Calcaire tendre	30
Plâtre	50
Calcaire très tendre	80

2.1.2.4 Perméance (en $g/(m^2 \cdot h)$)

Il s'agit de la quantité de vapeur d'eau traversant une paroi par unité de surface et par unité de temps.

Elle se quantifie, par exemple, en grammes d'eau par m^2 et par heure. On parle aussi d'Indice conventionnel de Transfert de Vapeur d'eau (ITV).

2.1.2.5 Gélivité (en cycles)

Beaucoup de pierres, lorsqu'elles sont humides, sont susceptibles de se fendre si elles sont exposées à une température inférieure à $0^\circ C$. Elles sont dites gélives.

La gélivité se mesure (en laboratoire) en 'cycles de gel normalisés' : on fait subir à la pierre des cycles de gel et de dégel jusqu'à l'apparition de signes de désagrégation.

La gélivité est liée à la pométrie : les pierres à pores fins gèlent plus facilement que celles à pores larges.

Les études menées en laboratoire ont montré que, dans une pierre imbibée d'eau, l'eau dans les pores ne gèle pas de façon homogène. C'est d'abord l'eau près de la surface qui se transforme en glace. La glace ayant un volume supérieur à l'eau, il en résulte une pression accrue sur les parois des pores mais surtout sur l'eau qui est située plus profondément dans les pores et qui ne s'est pas encore solidifiée. C'est en réalité cette eau captive (dont la pression augmente au fur et à mesure que la glace progresse en profondeur dans la pierre) qui finit par fendre la pierre.

2.1.3 Mesures

Nous évoquerons quatre méthodes qui sont représentatives des usages professionnels : l'utilisation d'un humidimètre, la thermographie, l'emploi d'une bombe à carbure ou le séchage d'échantillons prélevés.

2.1.3.1 Humidimètre

Il existe deux types d'humidimètres.

Dans le premier cas, l'humidimètre est muni de deux pointes qu'il faut planter dans le mur à inspecter afin de pouvoir y mesurer le taux d'humidité (on parle d'humidimètre 'à pointes'). La précision des valeurs est médiocre et il faut surtout utiliser ce type d'humidimètres pour comparer les différentes zones d'une paroi.

Dans le second cas, l'humidimètre n'a pas de pointes et est muni d'une sonde qui détecte l'humidité lorsqu'une zone spécifique de l'appareil est posée contre la surface du matériau à analyser (on parle d'humidimètre 'de contact'). Ce second type d'appareils est plus fiable que le précédent.



Exemple d'humidimètre à pointes
'Surveymaster' de la marque GE ®
[<http://www.ge-mcs.com/en/moisture-and-humidity/moisture-meters.html>]



Exemple d'humidimètre de contact
'Humidimètre à patin universel Tramex ME Plus'
[<http://www.labomat.eu/?page=CAT&sc=39>]

2.1.3.2 Thermographie

Une caméra thermographique infrarouge met en évidence les différences de température d'un mur. Il est parfois possible d'interpréter les zones froides comme des zones qui sont humides (lorsque tous les autres paramètres ont été identifiés : sources de chaleur, appareils divers...).

En effet, les zones humides sont plus froides pour deux raisons. D'une part, l'humidité diminue la résistance thermique des matériaux qu'elle imprègne. D'autre part, la température des surfaces est abaissée de quelques dixièmes de degré aux endroits où un phénomène d'évaporation se produit. Toute évaporation nécessite en effet un prélèvement énergétique.

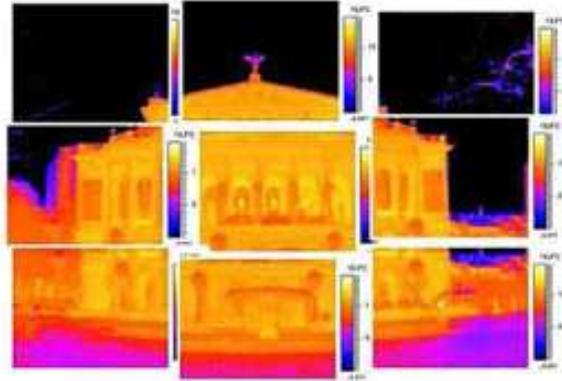


Figure 20 : Exemple d'image obtenue par thermographie
[Bajeux (2013b), chap.14, p.10]

2.1.3.3 Bombe à carbure

Cette méthode consiste, d'abord, à prélever un échantillon et à le réduire en poudre. Une quantité précise de cette poudre est ensuite introduite dans une bouteille spéciale munie d'un manomètre. L'introduction d'une dose de carbure de calcium provoque une réaction chimique avec l'eau contenue dans l'échantillon de départ, ce qui produit un gaz : l'acétylène. La pression de ce gaz (mesurée par le manomètre) permet de déduire le taux d'humidité de la poudre initiale.

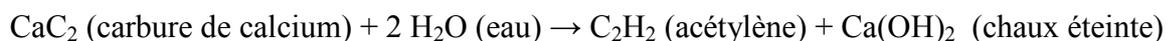


Figure 21 : Ustensiles requis par la méthode dite de la 'bombe à carbure'
[http://www.carrelage-infos.fr/bombe_carbure.html]

2.1.3.4 Mesure par séchage d'échantillons

C'est la seule méthode vraiment fiable. Les échantillons prélevés sont placés dans des récipients étanches puis pesés avant d'être mis dans une étuve pour y perdre toute leur humidité. La différence entre les masses des prélèvements secs et humides permet de déduire le taux d'humidité.

2.1.4 Actions

Nous classerons les actions à entreprendre en fonction de l'origine de l'eau : eau atmosphérique, eau souterraine ou eau produite par l'activité humaine à l'intérieur des bâtiments.

2.1.4.1 Face à l'eau d'origine atmosphérique

Les méthodes requises sont variées. Nous en citerons trois :

- remplacement des pierres dont la nature n'est pas appropriée au degré d'exposition aux intempéries
- imperméabilisation par hydrofuge
- travaux de zinguerie

2.1.4.1.1 Remplacement des pierres vulnérables à l'action des intempéries

Il s'agit de regarder si des pierres trop poreuses ou gélives n'ont pas été placées malencontreusement à des endroits très sollicités par les intempéries et éventuellement d'envisager des remplacements (lorsque le budget et les circonstances techniques le permettent).

Résistance à la pluie

Les pierres doivent être dures en soubassement, fermes sur les corniches ou les bandeaux, et peuvent être demi-fermes ou tendres en parement courant.

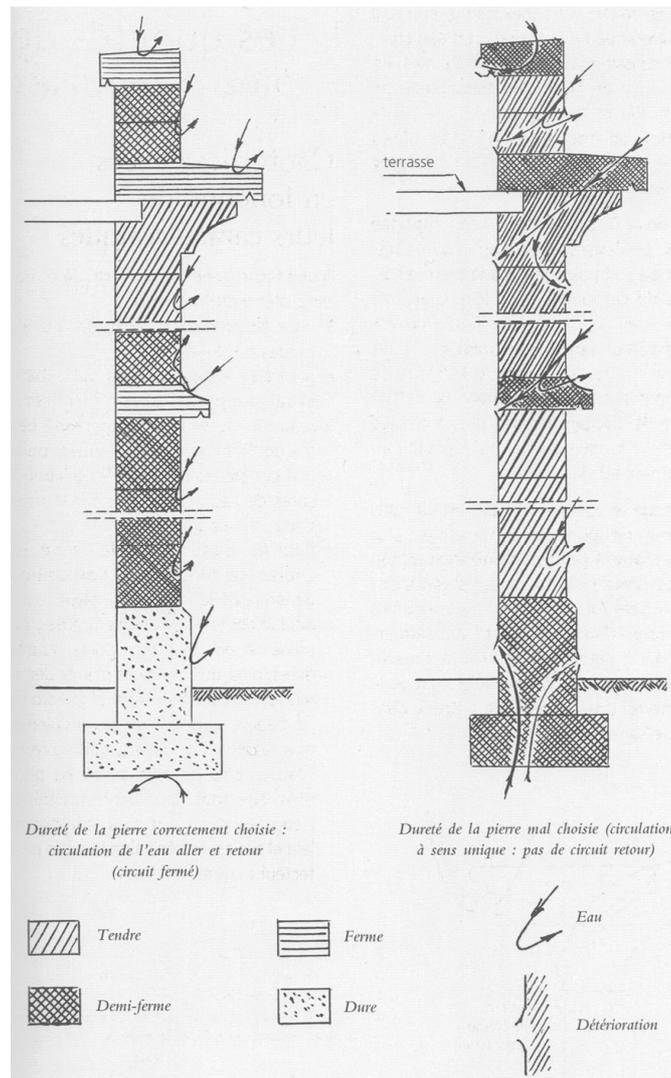


Figure 22 : Résistance d'une maçonnerie à la pluie selon la nature des pierres
[Laurent (2005), p.31]

Résistance au gel

L'aptitude à l'emploi des pierres dépend non seulement de leur position dans le mur mais aussi de la localisation géographique de l'ouvrage. Le tableau suivant fait référence aux quatre zones de gel définies par la norme NF EN 771-6 :

- Zone A (gel très faible) : pas plus de 2 jours avec une température inférieure à -5°C
- Zone B (gel faible) : pas plus de 4 jours avec une température inférieure à -6°C
- Zone C (gel modéré) : pas plus de 10 jours avec une température inférieure à -10°C
- Zone D (gel sévère) : plus de 10 jours avec une température inférieure à -10°C

Il n'existe pas de traitement réellement durable contre la gélivité. Il faut donc, soit remplacer les pierres inadaptées, soit réaliser une isolation par l'extérieur du parement (ce qui cache définitivement les pierres).

Tableau IX : Prescriptions générales concernant le gel
pour l'emploi de pierres naturelles massives
ayant une épaisseur supérieure ou égale à 80 mm
[extrait de la norme NF B 10-601]

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) ⁽¹⁾
	Gélvité	NF EN 12371	A, B et C aucune D \geq 12 cycles
	Compression	NF EN 772-1	Dimensionnement ⁽²⁾
Assise de rejaillissement ⁽³⁾ Appui de fenêtre ⁽⁴⁾	Gélvité	NF EN 12371	A \geq 12 cycles
			B \geq 12 cycles
			C \geq 24 cycles
			D \geq 48 cycles
Console ⁽³⁾	Gélvité	NF EN 12371	A \geq 12 cycles
			B \geq 12 cycles
			C \geq 24 cycles
			D \geq 48 cycles
Corniche ⁽⁴⁾ Couronnement ⁽⁴⁾	Gélvité	NF EN 12371	A \geq 36 cycles
			B \geq 48 cycles
			C \geq 96 cycles
			D \geq 96 cycles
Main courante ⁽⁴⁾ Bandeau ⁽⁴⁾	Gélvité	NF EN 12371	A \geq 12 cycles
			B \geq 24 cycles
			C \geq 48 cycles
			D \geq 96 cycles
Soubassement ⁽⁵⁾	Capillarité	NF EN 772-11	$C_{w,s}$ (perpendiculaire et parallèle au lit) \leq 130 g/m ² .s ^{0.5}
	Gélvité	NF EN 12371	A \geq 36 cycles
			B \geq 36 cycles
			C \geq 48 cycles
Compression	NF EN 772-1	Dimensionnement ⁽²⁾	
Dalle massive de balcon ⁽⁴⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾	Gélvité	NF EN 12371	A \geq 96 cycles
			B \geq 96 cycles
			C \geq 96 cycles
			D \geq 144 cycles
Pile de pont ⁽⁷⁾	Gélvité	NF EN 12371	A, B, C, D \geq 144 cycles
Gargouille ⁽⁷⁾	Gélvité	NF EN 12371	A, B, C, D \geq 144 cycles

1) Pour calculer l'épaisseur d'un mur selon le critère de capillarité $C_{w,s}$ (parallèle au lit), se reporter à la norme P10-202 (référence DTU 20.1).
2) Selon la norme P10-202-2 (référence DTU 20.1).
3) 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).
4) 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 gélvité.
5) Soubassement : toute pierre dont le chant inférieur est à moins de 15 cm du sol fini.
6) Les dalles porteuses font l'objet d'une justification particulière lors de leur conception.
7) Un cahier des charges doit préciser les essais mécaniques nécessaires.

2.1.4.1.2 Techniques d'imperméabilisation par hydrofuge

Ces produits incolores limitent la pénétration de l'eau extérieure dans les pores des pierres sans modifier les propriétés mécaniques, ni bloquer le passage de la vapeur venant de l'intérieur d'un immeuble. On observe néanmoins que le transit de la vapeur d'eau est diminué après application d'un hydrofuge (environ 15 % en moins).

Le principe est qu'un hydrofuge modifie la tension superficielle du support, ce qui conduit l'eau à glisser sur le parement : on parle d'effet perlant. Les hydrofuges, en revanche, n'assurent pas, au sens strict, de fonction d'étanchéité et ils ne s'appliquent pas sur une surface horizontale.

Les hydrofuges contribuent aussi à retarder le retour de l'encrassement et donc à allonger les cycles de ravalement. L'application d'un hydrofuge doit être renouvelée environ tous les dix ans. Notons que les traitements hydrofuges sont totalement à proscrire sur les maçonneries de pierres hourdées au plâtre.

Tableau X : Action d'un hydrofuge sur la capillarité et l'absorption d'eau
[d'après Virolleaud (2011), p. 317]

Matériaux	Hydrofuges à base de résines siliconates		
	Non hydrofugé	Hydrofugé avant cycles de vieillissement	Hydrofugé après 75 cycles de vieillissement
<i>Coefficient de capillarité moyen (NF B 10-502)</i>			
Pierre calcaire	27	0,3	0,3
Mortier de ciment	1,6	0,06	0,03
<i>Absorption d'eau par gravité à l'aide de pipettes en verre (en g/dm².24 h)</i>			
Pierre calcaire	400	50	37
Mortier de ciment	31	6	3

Tableau XI : Action d'un hydrofuge du point de vue de l'indice ITV
(transfert de vapeur d'eau)
[d'après Virolleaud (2011), p. 317]

Matériaux	Hydrofuges à base de résines siliconates	
	Témoin	Hydrofugé
<i>Indice conventionnel de transfert de vapeur d'eau ITV (g/m².24 h)</i>		
Pierre calcaire	285	242
Mortier de ciment	110	89

Les hydrofuges employés pour le ravalement sont généralement à base de résines siliconates, acryliques ou siloxanes. Citons, par exemple, le produit suivant : IMPREGNANT H de la société AMONIT. C'est une solution solvantée transparente de polysiloxane. La concentration dans le solvant est de 6 %.

2.1.4.1.3 Travaux de zinquerie

Il faut s'inspirer des façades haussmanniennes qui cherchent, en multipliant les bandeaux et les saillies, à limiter au maximum le ruissellement sur les façades. En sous-face, ces modénatures présentent souvent un coupe-larmes, c'est-à-dire un petit canal qui interrompt le film aqueux et favorise l'égouttage.

Leur partie supérieure est à recouvrir de couvertines en zinc ou en plomb. Il faut si possible prévoir un relevé vertical pour limiter les rejaillissements d'eau.

Sur des saillies (bandeaux ou corniches)

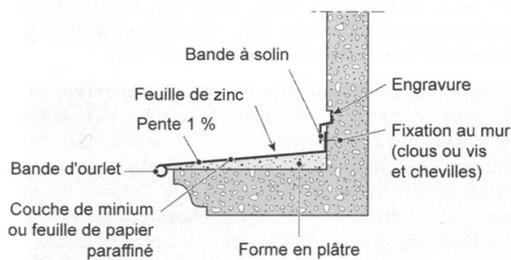


Figure 23 : Protection par bandes de zinc
[Virolleaud (2011), p. 327]



Figure 24 : Relevé vertical en zinc
[Vincent Foussard]



Figure 25 : Protection d'une saillie par bandes de zinc
[Vincent Foussard]

Les bandes de zinc sont posées sur du papier anglais (ou paraffiné) afin d'éviter le contact avec le glacis de plâtre. Les ourlets sont emboîtés dans les bandes d'agrafes plates.

Sur des balcons



Figure 26 : Pose de bandes de plomb sur un balcon
[Vincent Foussard]



Figure 27 : Protection en plomb d'un balcon.
[<http://www.morin-couverture.com/savoir-faire>]

Les rebords sont enroulés sur les ourlets des bandes d'agrafes (qui ne sont pas plates, contrairement au cas précédent). Les raccords avec la façade sont assurés par des 'bandes à rabattre'.

2.1.4.2 Face aux remontées capillaires

Nous étudierons dans ce chapitre quatre techniques différentes : la pose d'un drain, la coupure de capillarité, l'injection de résine, l'insertion de siphons atmosphériques.



Figure 28 : Exemple de remontées capillaires
[Bajeux (2013a), chap.13, p.4]

2.1.4.2.1 Drain

Le drain a pour seule fonction de collecter les eaux de ruissellement (qui descendent le long d'un mur) et de les évacuer vers un exutoire. Il ne traite donc pas, à proprement parler, les remontées capillaires mais limite l'accumulation d'humidité qui est susceptible de se produire près des fondations.

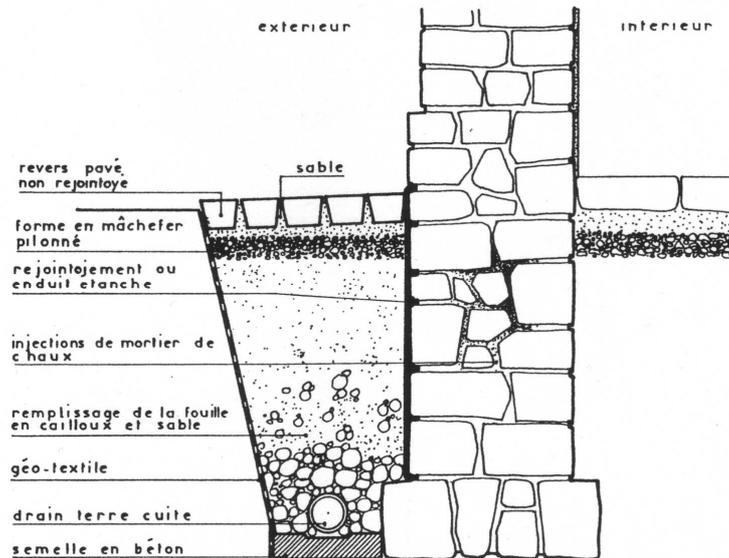


Figure 29 : Exemple de drain près d'une fondation

[Duval. (1990), p.36]

2.1.4.2.2 Coupures de capillarité

Cette technique n'est applicable à des maçonneries existantes que si elles sont homogènes et appareillées avec des joints droits et suffisamment épais. Il est préférable que le mur soit mince. Elle est surtout utilisée pour les maçonneries de briques mais peut être adaptée aux maçonneries de pierres.

Le processus consiste à réaliser, le plus bas possible, une saignée horizontale (sur toute l'épaisseur du mur) et à y insérer un matériau étanche : feuille de plomb, de bitume armé, de plastique armé ... Deux lits d'ardoise superposés jouaient parfois ce rôle autrefois.

Le matériau inséré doit s'arrêter à 2 cm du nu extérieur du mur pour laisser la place à un rejointoyement étanche.

On procède par tronçons non consécutifs d'une longueur de 90 cm environ afin d'éviter des tassements.

La méthode implique de poser, au préalable, des étais provisoires qui reprennent les charges, jusqu'à ce qu'une injection de mortier spécial à base de résine vienne refermer la saignée.

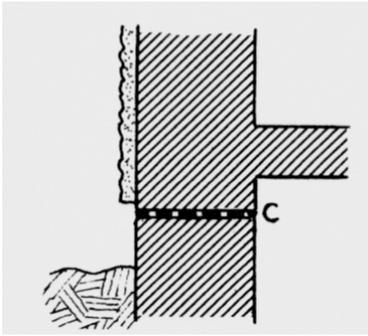


Figure 30 : Coupure de capillarité
[De Vigan (2003), p.316]

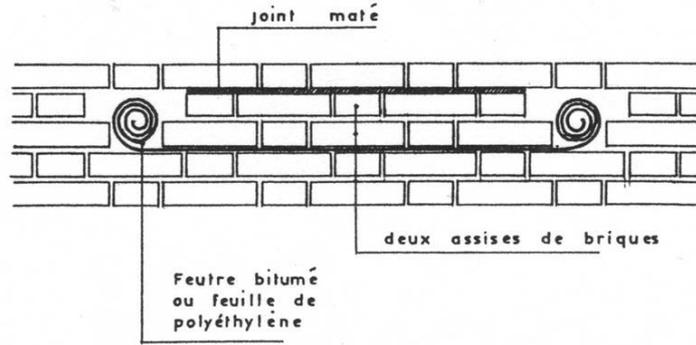


Figure 31 : Insertion d'une coupure de capillarité
[d'après Duval (1990), p.37]

2.1.4.2.3 Injection de résine

Le principe consiste à injecter une résine hydrofuge sous pression qui s'introduira dans les pores de la maçonnerie et agira comme une barrière.

La mise en œuvre commence par le forage d'orifices à intervalles réguliers. Les percements sont réalisés soit sur une ligne soit sur deux lignes en quinconce. Si le mur est épais, les trous sont réalisés des deux côtés.

Le diamètre, l'inclinaison et l'intervalle des forages sont liés aux caractéristiques précises du procédé technique retenu.

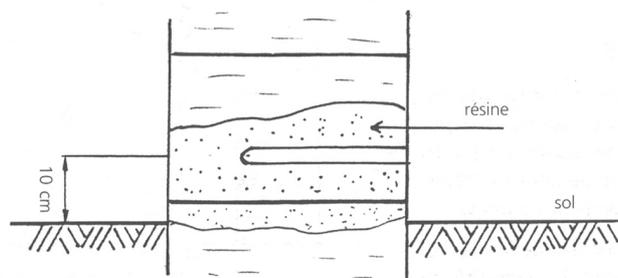


Figure 32 : Injection de résine après percement de trous
[Laurent (2005), p.67]

Cette méthode est aussi utilisée pour des maçonneries composées de deux parements en pierres enserrant une masse centrale de matériaux divers (généralement de mauvaise qualité) agglomérés avec des mortiers pauvres en chaux ou avec de la terre argileuse. Le produit injecté a alors pour fonction de renforcer la partie centrale. Il peut être fait appel à des résines ou à des mortiers mêlant sable et chaux hydraulique naturelle ...

2.1.4.2.4 Siphon atmosphérique

Ce procédé consiste à sceller dans la base des murs humides des tubes d'une vingtaine de centimètres de profondeur. L'air extérieur pénètre à l'intérieur du drain, s'humidifie et, devenu plus dense, s'écoule à l'extérieur en faisant place à une nouvelle quantité d'air sec.

Plusieurs procédés sont disponibles : Knapen, Taulon, Abal, RAEM... L'efficacité de ces produits n'est pas toujours facile à mettre en évidence.

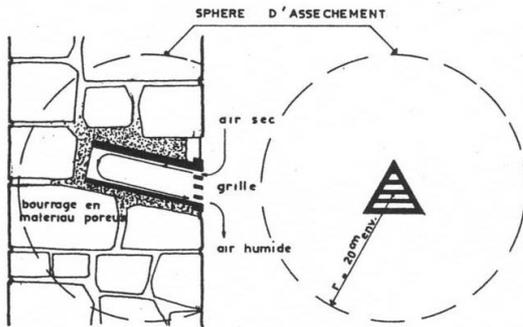


Figure 33 : Exemples de siphons atmosphériques
[d'après : Duval (1990), p.39]



Figure 34 : Série de siphons atmosphériques
[Gabriel Bajoux]

2.1.4.3 Face à la vapeur d'eau interne

Plusieurs stratégies correctrices sont possibles :

- réduire le flux en posant un pare-vapeur sur la face-interne. Ce pare-vapeur est généralement séparé de la maçonnerie par un isolant. Le pare-vapeur doit toujours être du côté chaud de l'isolant pour éviter le risque de condensation dans ou sous l'isolant.
- rendre plus perméable à la vapeur la face extérieure de la maçonnerie pour accroître la 'respiration' du mur
- améliorer la ventilation des locaux
- limiter la production de vapeur d'eau, si possible

2.2 AGENT DESTRUCTEUR 2 : LES SELS

De graves dégradations sont causées, à l'intérieur des pierres, par la cristallisation de sels solubles. L'eau est, en effet, un très bon solvant pour ces sels et, après évaporation, elle les dépose sous forme cristallisée, ce qui entraîne des gonflements ou des efflorescences (qui se présentent sous forme de tâches blanchâtres).

Ces sels peuvent être apportés de différentes façons, notamment :

- par l'eau de pluie.
- par les remontées capillaires venues du sol.

2.2.1 Nature des sels

Les exemples qui suivent concernent surtout les pierres calcaires.

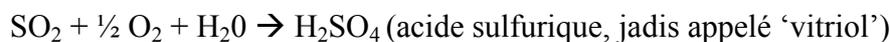
Nous étudierons en effet plus particulièrement trois ions qui nuisent à la matrice carbonatée des pierres calcaires (c'est-à-dire au CaCO_3) : les sulfates (SO_4^{2-}), les nitrates (NO_3^-) et les carbonates (CO_3^{2-}).

Certains sont plutôt présents dans l'atmosphère, d'autres dans les sols. Ils s'associent à d'autres constituants pour former des acides (sulfurique, nitrique, carbonique) dont l'action sur le calcaire est destructrice.

Notons que certaines substances contenant du chlore (Cl) ou du sodium (Na) s'attaquent également au calcaire.

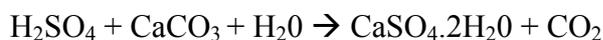
2.2.1.1 Sels à base de sulfates

Des composés sulfurés sont apportés par la pollution urbaine ou les 'pluies acides'. Ces composés contiennent du SO_2 (dioxyde de soufre) qui réagit avec l'eau et l'oxygène :



Diverses réactions se produisent ensuite avec le carbonate de calcium (CaCO_3) qui constitue l'essentiel de la pierre calcaire.

Le plus notable est l'apparition d'une pellicule gypseuse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) :



Rappelons que le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) a pour désignation scientifique le 'sulfate de calcium hydraté' et contient un anion sulfate (SO_4^{2-}) et un cation de calcium (Ca^{2+}).

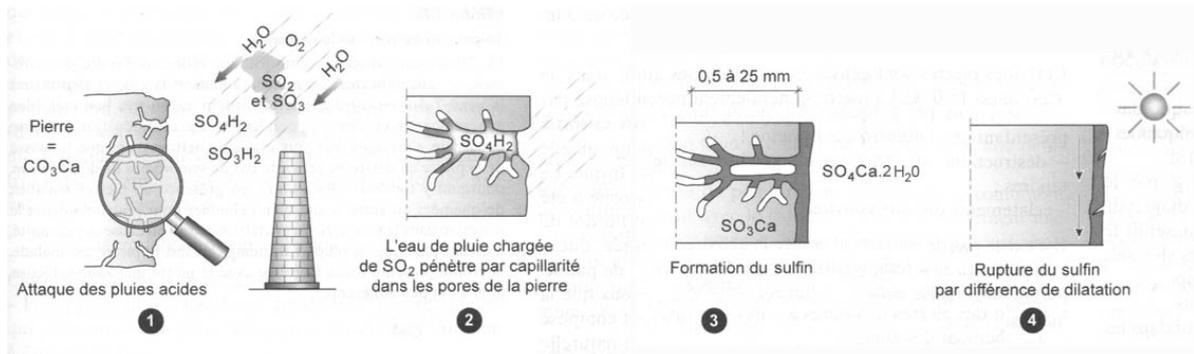


Figure 35 : Formation du sulfin sur des pierres calcaires

[Virolleaud (2011), p.191]

Cette pellicule gypseuse agrège, en milieu urbain, diverses particules polluantes en suspension dans l'atmosphère, notamment des suies ou des cendres volantes (contenant des particules métalliques). L'ensemble forme une croûte noirâtre appelée 'sulfin' dont l'épaisseur peut dépasser le centimètre.

Ces dépôts sont 4 à 5 fois plus durs que la pierre et ont une faible porosité ainsi qu'une faible perméabilité. Le sulfin libère peu à peu de l'acide sulfureux qui attaque la pierre. Une zone friable apparaît donc sous les plaques de sulfin. Or, ces plaques ont un taux de dilatation généralement au moins deux fois plus élevé ($20 \text{ à } 24 \times 10^{-6} \text{ m/}^\circ\text{C}$) que celui de la pierre elle-même, ce qui conduit à un détachement progressif de cette croûte sous l'action des variations de température.

2.2.1.2 Sels à base de nitrates

L'azote (N) est fréquemment apporté par les engrais agricoles qui remontent dans les murs par capillarité.

L'acide nitrique est composé de deux ions : H^+ et NO_3^- (le nitrate). Cet acide réagit sur le calcaire et on obtient du nitrate de calcium $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$:

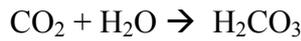


C'est un sel de couleur blanche.

2.2.1.3 Sels à base de carbonates

Le CO_2 apporté par la pollution urbaine (ou par les deux réactions décrites précédemment) peut dissoudre le calcaire en présence d'eau.

Le dioxyde de carbone s'associe à l'eau pour former un acide faible : l'acide carbonique H_2CO_3 .



Cet acide attaque ensuite le calcaire.



2.2.2 Manifestations

L'eau, le vent et les cycles climatiques (gel, périodes sèches) tiennent évidemment un rôle actif tout au long des processus. Les formes que prennent les dégradations liées aux sels sont nombreuses. Nous en détaillerons deux : la désquamation et l'alvéolisation.

2.2.2.1 Desquamation pulvérulante (ou exfoliation)

La désquamation est le phénomène par lequel la surface de la pierre se détache et met à jour des zones pulvérulentes sans consistance. Ce phénomène est généralement lié à la présence de sulfite mais il arrive que les causes soient plus complexes.

La désquamation est plus fréquente au pied des bâtiments et aux endroits où l'eau peut être retenue (surfaces horizontales, moulures...).

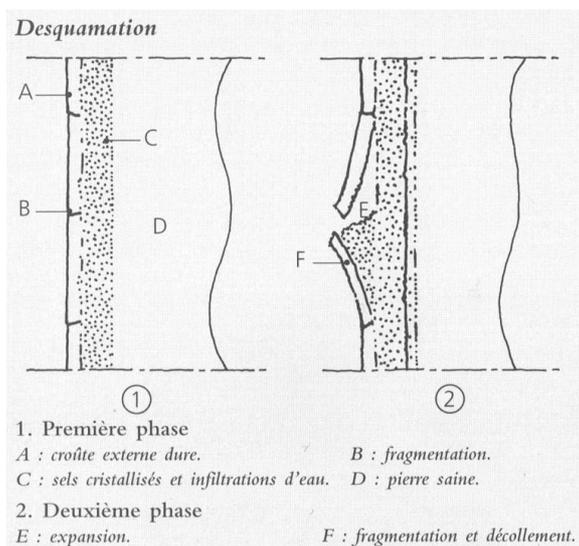


Figure 36 : Coupe schématisant une désquamation

[Coignet (2010), p.75]



Figure 37 : Photographie de désquamation

[Coignet (2010), p.76]

2.2.2.2 Alvéolisation (ou nécrose)

Elle se caractérise par la présence de certains sels qui détruisent les cristaux constitutifs de la pierre. L'action de l'érosion conduit ensuite à l'apparition progressive de sillons et d'alvéoles.

On observe l'alvéolisation sur des endroits particulièrement exposés (comme les angles de bâtiments).

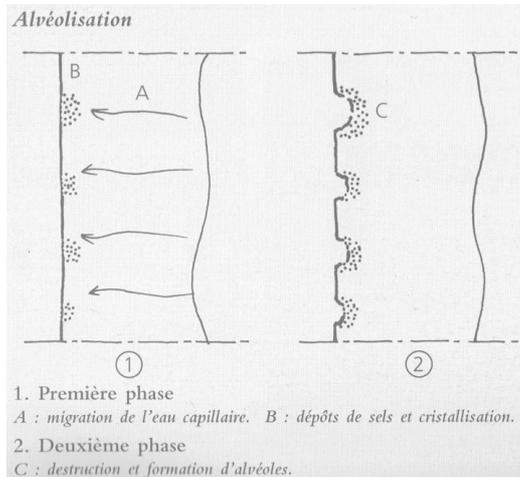


Figure 38 : Processus d'alvéolisation
[Coignet (2010), p.75]

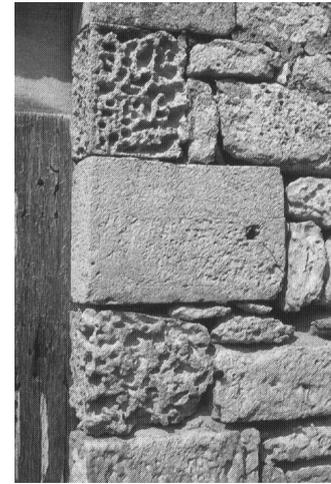


Figure 39 : Alvéolisation de pierres calcaires
[Coignet (2010), p.76]

2.3 AGENTS DESTRUCTEURS DIVERS

Il est impossible d'être exhaustif. Nous attirerons donc l'attention du lecteur sur trois types de nuisance : les organismes biologiques, la corrosion des inserts métalliques et les corps étrangers en bois.

2.3.1 Les organismes biologiques

Citons plusieurs exemples :

Insectes et araignées

Ils accélèrent, en particulier, la dégradation des joints.

Cryptogames (algues, lichens...)

Leurs racines peuvent pénétrer assez profondément dans la pierre.

Salpêtre

Le salpêtre est un champignon qui se développe dans un milieu acide, humide et peu aéré (contenant généralement de l'urée). Par exemple, il n'est pas rare d'observer du salpêtre dans des étables ou des locaux ayant abrité des animaux.

Il n'existe pas de traitement définitif du salpêtre par simple aspersion d'un produit adéquat. Il faut donc agir selon plusieurs axes :

- repérer et neutraliser les apports d'eaux usées (fosses d'aisance défectueuses, ruptures d'égouts) qui sont généralement à l'origine du phénomène
- ajouter éventuellement des radiateurs car une augmentation de la température (accroissant les mouvements de l'air) est bénéfique
- remplacer les pierres infectées

Bactéries

Leur rôle dans certaines desquamations gypseuses a été mis en évidence. En milieu anaérobie, certaines bactéries ont, en effet, la capacité d'agir sur des composés contenant du soufre : on parle de bactéries 'sulfato-réductrices'.

D'autres jouent un rôle plus particulier dans le développement et l'action des nitrates sur la pierre.

2.3.2 La corrosion

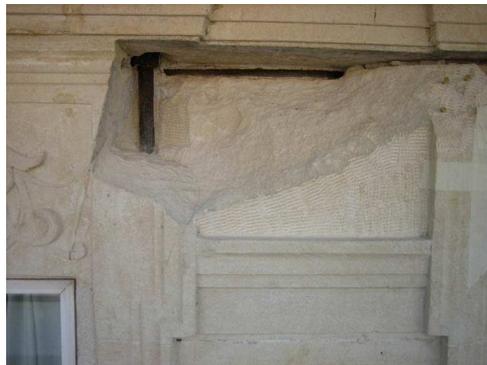


Figure 40 : Chaînage métallique corrodé ayant fait éclater une façade
[Vincent Foussard]

En cas de présence d'armatures métalliques, la pénétration de l'humidité conduit au développement de la rouille. On observe un gonflement progressif des métaux infectés, ce qui fait éclater la maçonnerie avoisinante.

Le traitement est complexe et consiste essentiellement à dégager les fers puis à les passiver avec un produit anti-rouille. Un remplacement ou un renforcement doit être envisagé lorsque la dégradation est trop importante.

2.3.3 Le bois

On trouve souvent des cales de bois dans les maçonneries haussmanniennes en pierres de taille. Elles sont la cause de désordres car elles gonflent sous l'action de l'humidité, ce qui conduit à une déstabilisation des pierres avoisinantes.

Ces cales sont très fréquentes entre les dalles (en pierre) des balcons et les consoles sous-jacentes.



Figure 41 : Exemples de résidus en bois insérés dans la maçonnerie

[Vincent Foussard]

3 TRAITEMENTS DES SURFACES

La conservation des murs anciens implique de ne pas laisser se dégrader la surface des pierres ou des joints.

Nous distinguerons dans notre exposé les traitements superficiels (consistant en particulier à faire disparaître les dépôts nocifs) et les traitements plus en profondeur (tels que le rejointoiement, le ragréage ou le remplacement partiel de pierres par des plaquettes).

3.1 DIAGNOSTIC

On parle de mission DIA, première syllabe du mot 'diagnostic'.

L'objectif est de déterminer :

- la nature des dépôts en surface
- l'imprégnation par les sels (notamment dans les zones près de la surface)
- le type de produits qui ont déjà été appliqués sur la pierre et leur degré de pénétration

Voici les différents types d'échantillons qui peuvent être récoltés et confiés à un laboratoire si le budget le permet :

- fragments tombés au pied du mur
- carottage dans la pierre (cylindres de diamètre 50mm et de profondeur 100mm)
- prélèvement du liant des joints
- poussière issue du grattage des surfaces des pierres (ou prélèvement par arrachage superficiel en utilisant un ruban adhésif)
- croûtes arrachées ponctuellement

3.2 ACTIONS : TRAITEMENTS DE L'EPIDERME

Nous évoquerons successivement trois techniques qui sont appliquées à l'épiderme d'un mur : le décapage, le nettoyage puis le renforcement superficiel.

3.2.1 Décapage

La pierre a parfois été recouverte de peinture qu'on peut décider de retirer pour permettre une meilleure 'respiration' du mur et retrouver la façade dans son aspect d'origine.

Deux types de peintures sont généralement retrouvés : des peintures anciennes silicatées et des peintures modernes dérivées du pétrole. Chacune implique des méthodes spécifiques de décapage.

3.2.1.1 Peintures silicatées

Ces peintures, essentiellement à base de silicates alcalins, ont surtout été utilisées au milieu du vingtième siècle. Le sodium (Na) et le potassium (K) sont les composants alcalins les plus fréquents. Citons le ‘Silexore’ qui est une marque dont l’usage a été très répandu.

Ces peintures se combinent avec le support pour former un ensemble indissociable (on parle de peinture ‘pétrifiante’) si bien qu’il est très difficile de supprimer ces peintures sans abîmer la pierre.

Si la peinture silicatée n’est pas endommagée, il est donc souvent préconisé de ne pas y toucher même si ce revêtement, du fait de sa faible perméabilité, bloque la vapeur d’eau, ce qui risque, à terme, de conduire à une desquamation progressive.

Si la peinture silicatée n’est plus adhérente ou si des boursouflures indiquent que la pierre sous-jacente est déjà rongée, il faut intervenir. Le décapage chimique est risqué du fait des probables réactions avec la pierre elle-même. Les deux seules méthodes satisfaisantes sont la retaille mécanique (qui cause toutefois des dommages esthétiques) et le laser (qui est parfaitement adapté).

3.2.1.2 Peintures dérivées du pétrole

Ces peintures peuvent généralement être éliminées sans grande difficulté, même avec un simple décapant biologique neutre. L’usage de solvants est à proscrire car ils peuvent pénétrer profondément dans la pierre.

3.2.2 Nettoyage

Les premières méthodes, au sortir de la Seconde Guerre Mondiale, consistaient en un brossage manuel à sec suivi d’un rinçage à l’eau claire et étaient éventuellement achevées par un badigeonnage sommaire.

Aujourd’hui, la plupart des ravalements font appel à une ou plusieurs des méthodes décrites ci-dessous.

3.2.2.1 Nettoyage : méthodes utilisant uniquement de l'eau

On parle de 'phase aqueuse' lorsqu'il est fait appel à de l'eau froide, de l'eau chaude ou de la vapeur.

Pour éviter des infiltrations dans les locaux, l'usage de l'eau dans les ravalements doit être précédé d'un calfeutrement des interstices, d'un colmatage des fissures et d'un traitement provisoire des joints défectueux. Il n'en demeure pas moins que ces techniques sont difficiles à réaliser en milieu habité et qu'elles conviennent davantage à des réhabilitations lourdes induisant une non-occupation des locaux.

Il est souhaitable que l'eau soit utilisée sans adjuvant car ces produits peuvent pénétrer très profondément dans les pierres et ressurgir plus tard sous forme d'efflorescences.

Par ailleurs, toute technique utilisant abondamment de l'eau ne peut être mise en œuvre en période de gel.

Après ou pendant l'amollissement des dépôts superficiels sous l'action de l'eau, ces procédés s'accompagnent généralement d'une action mécanique par brossage. Les outils peuvent être des brosses dures métalliques ou des brosses douces en poil naturel.

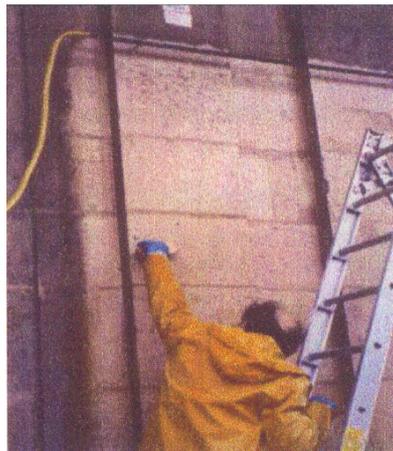


Figure 42 : Brossage d'une façade en pierre
au Val de Grâce à Paris
[Bajeux (2013b), chap.14, p.12]

3.2.2.1.1 Méthode1 : sous forme liquide, sans pression

On parle de 'ruissellement'.

Cette méthode consiste à faire ruisseler, pendant plusieurs jours, une mince épaisseur d'eau sur la façade (via des rampes d'arrosage en tête de mur) pour ramollir et décrocher les encrassements.

L'eau doit être récupérée au fur et à mesure pour ne pas fragiliser les soubassements.

Avantages :

- technique douce qui convient aux pierres tendres et ne supprime pas le calcaire
- baisse de la concentration en sels nocifs présents en surface et disparition des efflorescences

Inconvénients :

- processus lent
- saturation des murs par l'humidité

3.2.2.1.2 Méthode 2 : par pulvérisation, à basse pression

On parle de 'brumisation' ou de 'nébulisation'.

A la différence de la vapeur qui nécessite un ajout de chaleur (ébullition), les brouillards (produits par brumisation ou nébulisation) sont obtenus par fragmentation de l'eau. On parle généralement de brumisation lorsque les gouttelettes ont un diamètre proche de 50 µm et de nébulisation lorsque ce diamètre est plus petit (autour de 2,5 µm). Contrairement à la brumisation, la nébulisation ne mouille pas mais humidifie.

On procède à des pulvérisations de courte durée depuis des lances munies de gicleurs. Certaines lances de pulvérisation peuvent être munies, à leur extrémité, d'une brosse à rotation électrique.

Avantage :

- limitation de l'apport en eau (par rapport au ruissellement)

Inconvénient :

- processus lent

3.2.2.1.3 Méthode 3 : par projection, à haute pression

Après ramollissement par humidification, à la différence des deux méthodes précédentes, les encrassements sont supprimés au moyen d'un hydro-nettoyeur (par exemple, de marque 'Kärcher') à haute pression (50 à 200 bars). Le processus sera optimisé si l'eau projetée est chauffée à une température qui devra rester inférieure à 95°C.

Avantages :

- souplesse des réglages (pression, débit, éloignement du point d'application)
- imbibition de la pierre limitée du fait du rejaillissement immédiat de l'eau
- (si utilisation d'eau chaude) économie de temps, suppression des corps gras en surface

Inconvénient :

- risque d'abrasion sur les pierres qui ne sont pas suffisamment dures.

3.2.2.1.4 Méthode 4 : sous forme vaporisée

A la différence des trois méthodes précédentes, l'eau est portée avant projection à une température de 140°C, ce qui la transforme en vapeur.

Au contact de la pierre, cette vapeur se condense brutalement, ce qui ramollit les salissures incrustées qui sont ensuite enlevées par rinçage et brossage.

Avantages :

- souplesse des réglages
- imbibition de la pierre limitée
- suppression des corps gras en surface
- réduction de la consommation d'eau

Inconvénients :

- emploi réservé aux pierres très dures
- augmentation de la consommation énergétique
- résistance au traitement des dépôts très incrustés

3.2.2.2 Nettoyage : méthodes utilisant de la poudre abrasive

Cette poudre est constituée de sables ou de divers granulats appelés 'fines'.

Le cahier des charges doit préciser les pressions, l'angle d'attaque, la distance de projection, la nature et le diamètre des grains.

Pour lutter contre les maladies professionnelles comme la silicose, il est interdit d'utiliser des sables abrasifs contenant plus de 5 % en poids de silice libre cristalline (SiO₂).

Nous distinguerons sablage et microfinage selon la pression utilisée et la granulométrie du produit projeté.

3.2.2.2.1 Sablage à sec

Cette méthode, courante après-guerre, a conduit à des abus : les sableuses fonctionnaient à des pressions trop élevées (25 ou 30 bars) et projetaient des grès broyés d'une granulométrie de 100 à 500 µm. Ceci a eu pour conséquence une détérioration des parements.

Aujourd'hui, les pressions sont plus réduites (on parle de 'sablage léger') mais cette méthode reste problématique car les limites préconisées pour la pression peuvent être dépassées au gré des exécutants.

Les abrasifs utilisés sont diversifiés : sable siliceux, alumine, corindon, olivine, laitiers de haut fourneaux (fonte), résidus de la fabrication du phosphore, produits minéraux ...

Avantages :

- absence d'eau et limitation du risque d'infiltration
- rapidité d'exécution

Inconvénients :

- traitement agressif qui élimine le calcin et peut conduire à l'usure des arêtes
- utilisation délicate sur des façades présentant plusieurs types de pierre
- méthode potentiellement dangereuse pour l'opérateur qui doit être soigneusement protégé
- nuisances pour l'environnement : dissémination aux abords de l'immeuble de poussières très volatiles et souvent polluantes

3.2.2.2 Sablage hydropneumatique

A la différence de la méthode précédente, de l'eau est mêlée aux grains abrasifs et projetée à basse pression (1 à 4 bars).

Ce procédé tend à remplacer le sablage à sec.

Avantages :

- rapidité d'exécution
- efficacité (y compris sur des façades très encrassées)

Inconvénients :

- traitement assez agressif avec disparition partielle du calcin et risque de polissage excessif
- risque d'infiltration (plus modéré néanmoins qu'avec les procédés exclusivement à base d'eau ou de vapeur).
- dégradation des joints

3.2.2.3 Microfinage à sec = (micro)gommage

A la différence des deux méthodes précédentes de sablage, le microfinage utilise un granulat très tendre (dureté Mohs <6) et très fin. C'est un nettoyage par microabrasion et il est une version édulcorée du sablage dont il est dérivé. La projection se fait à très basse pression (entre 0,5 et 2,5 bars) et l'inertie des grains est si faible qu'ils ne se heurtent pas à la façade mais suivent les flux d'air qui s'écoulent parallèlement au parement. C'est le frottement des particules tangentiellement à la façade qui assure le nettoyage (d'où le terme de 'gommage').

Avantages :

- adaptation possible à tous les types de pierre (y compris dans le cas de murs peu épais et poreux)
- réduction significative, par rapport aux méthodes précédentes, des effets secondaires de l'abrasion

Inconvénients :

- résultat très dépendant de la dextérité de l'exécutant : un microfinage trop lent, à trop faible distance, avec une pression trop forte, sous un angle inapproprié peut endommager davantage la pierre qu'un sablage léger bien exécuté.
- dégagement très important de poussières (sauf avec le procédé Thomann-Henry : voir ci-dessous)
- nécessité fréquente de devoir ajouter manuellement un badigeon 'cache-misère' sur les modénatures de la façade

Remarque :

Une version particulière de microfinage à sec est le procédé mis au point par l'entreprise Thomann-Henry.



Figure 43 : Procédé Thomann-Henry (photo 1)
[Bajeux (2013a), chap.13, p.7]



Figure 44 : Procédé Thomann-Henry (photo 2)
[Virolleaud (2011), p.271]

L'aspect révolutionnaire est que la projection se fait depuis une nacelle accrochée à une grue montée sur un camion. La hauteur maximale accessible est de 42m. Les aspirateurs installés dans la nacelle (qui est en fait une 'cabine-ventouse') évacuent les poussières projetées ce qui

protège l'opérateur tout en facilitant son contrôle visuel. Aucun échafaudage n'est donc nécessaire et la réalisation est rapide (progression de 7 mètres linéaires par jour)

Inconvénients spécifiques à la méthode Thomann-Harry:

- coût élevé (recours à du personnel qualifié et à un matériel onéreux)
- difficulté fréquente de stationnement pour le camion qui porte la grue

3.2.2.2.4 Microfinage par voie humide = hydrogommage

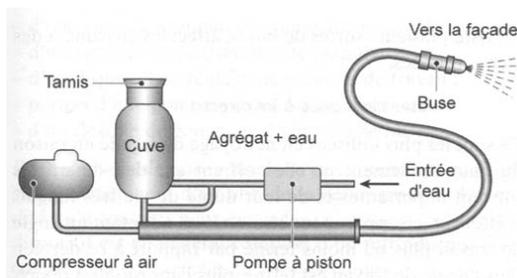


Figure 45 : Appareil à cuve pour l'hydrogommage
[Virolleaud (2011), p.279]



Figure 46 : Mise en œuvre de l'hydrogommage
[Virolleaud (2011), p.279]

Contrairement au procédé précédent, de l'eau est utilisée en complément, essentiellement pour retenir les poussières. Son action adoucit aussi un peu l'effet abrasif des 'fines'. C'est une méthode proche du sablage hydropneumatique. Elle s'en distingue surtout par le faible diamètre des granulats projetés.

Avantage :

- grande efficacité et abrasion limitée au strict nécessaire

Inconvénient :

- nécessité d'un rinçage soigné à l'eau claire (chaude si possible) pour désembouer les pores colmatés par les 'fines'. Le chantier reste sale jusqu'à cette ultime opération.

3.2.2.3 Nettoyage : méthodes chimiques

L'objectif est de dissoudre l'encrassement et de retirer de la pierre les sels cristallisés.

Le processus présente souvent quatre phases : humidification préalable, application du composé chimique, élimination mécanique (dans le cas d'une pâte ou d'un gel), rinçage.

L'application se fait au moyen d'un pulvérisateur ou d'une brosse, selon que le produit prend la forme d'un liquide, d'un gel ou d'une pâte.

Ces méthodes impliquent un dosage précis. L'intervention d'un laboratoire est idéale.

C'est un secteur en pleine évolution, du fait de l'arrivée de produits pratiquement neutres (pH autour de 7). Avant cette nouveauté, le calcaire était parfois traité avec des produits à tendance alcaline (basique). Rappelons que les bases attaquent la silice et que les acides attaquent la calcite.

Mais les produits alcalins peuvent, eux aussi, avoir sur le long terme une action destructrice sur le calcaire (dépôts de carbonates et de sulfates alcalins).

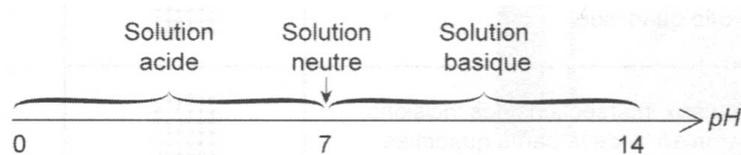


Figure 47 : Echelle du pH

[Virolleaud (2011), p.474]

Avantage :

- absence d'action mécanique abrasive (ce qui est appréciable sur des pierres fragiles).

Inconvénients :

- risques de réactions chimiques incontrôlées avec les diverses substances présentes dans la pierre (que l'emploi d'un neutralisant ne suffit pas toujours à éviter). Le problème est d'autant plus épineux que, la plupart du temps, la composition chimique exacte des produits n'apparaît pas sur les fiches techniques (dans un souci de protection commerciale).

- efficacité parfois limitée sur des parements très encrassés

- risque de dégradation de l'environnement. L'idéal est de choisir un produit biologique (non nocif et biodégradable), sans solvant, sans base forte ni acide fort et ne nécessitant pas de neutralisation...

3.2.2.4 Nettoyage : autres méthodes

Il s'agit soit de méthodes très coûteuses, soit de procédés expérimentaux. Ces techniques sont donc rarement employées pour des murs courants en maçonnerie ancienne.

3.2.2.4.1 Application de cataplasmes (ou de compresses)

Le cataplasme peut être constitué de laine de roche. L'humidification se fait via un réseau de tubes microporeux. La teneur en eau est mesurée régulièrement pour contrôler l'imbibition de la pierre.

Avantage :

- technique efficace de dessalement

Inconvénient :

- forte consommation en eau.

3.2.2.4.2 Nettoyage au laser

C'est une des meilleures techniques de nettoyage pour les pierres claires. Le rayonnement laser (onde infrarouge de forte énergie) est absorbé par les salissures superficielles de couleur sombre alors que le support, s'il est clair, a tendance à le réfléchir. Les salissures sont donc soumises à une fusion puis à une vaporisation, tandis que le support ne subit pas d'échauffement notable. Jusqu'à récemment, son emploi était surtout réservé aux chantiers d'exception (type Monuments Historiques) ou à des surfaces restreintes (statues, modénatures). Désormais, l'apparition des 'pinçaux laser' (en remplacement des simples rayons ponctuels qui étaient très lents) permet de réduire les coûts et les délais.



Figure 48 : Utilisation d'un laser à rayon ponctuel
[<http://www.patrimoine.ville-arles.fr>]



Figure 49 : Aire de travail nécessaire à l'emploi du laser
[Bromblet (2003), p.9]

Avantages :

- absence d'eau, de poudres abrasives ou de produits chimiques
- extrême précision

Inconvénients :

- coûts et délais variables selon la technique retenue
- mise en œuvre qui peut être assez complexe

3.2.2.4.3 Divers

Il convient de prêter attention aux développements actuels de techniques expérimentales telles que :

- la cryogénie qui consiste à projeter à grande vitesse des microbilles de glace carbonique (à une température de -78°C) à l'aide d'air comprimé. Rappelons que la glace carbonique est du dioxyde de carbone sous forme solide.
- les produits pelables à base de latex naturel (sève d'hévéas stabilisée à l'ammoniaque)
- un système à base d'argile absorbante. Les premiers résultats semblent prometteurs.

3.2.3 Renforcement

On parle aussi bien de 'consolidation' que de 'reminéralisation'.

3.2.3.1 Reminéralisation chimique

A l'échelle microscopique, les éléments constitutifs d'une pierre (calcite, minéraux...) sont unis entre eux par un lien qui peut être, par exemple, de la silice ou du calcium... Sous l'action des agents extérieurs, ce lien peut être endommagé. Les consolidants sont des liquides d'imprégnation qui sont appliqués pour reconstituer ce lien disparu.

La mise en œuvre peut se faire en utilisant différents outils : un pulvérisateur, un pinceau, un rouleau... Il convient, au préalable, d'effectuer des tests de porosité pour déterminer les quantités nécessaires à appliquer.

Contrairement à l'hydrofugation, les reminéralisants ne doivent pas nécessairement être appliqués sur l'ensemble d'une façade : leur emploi peut rester circonscrit aux zones malades ou abîmées. Notons qu'il n'y a pas d'incompatibilité entre consolidants et hydrofuges.

Il est souvent prescrit un composé à base de silicate d'éthyle. Voici un exemple de produit : reminéralisant type 'Silimin B' de la société 'Amonit'.

3.2.3.2 Biominéralisation

Cette méthode est expérimentale et tente de mettre à profit la capacité naturelle de certaines bactéries non pathogènes à sécréter du calcaire (carbonate de calcium). L'objectif est la

reconstitution d'un épiderme protecteur en calcite (carbonate de calcium cristallisé) à la surface de la pierre. La mise en œuvre consiste à ensemercer la surface avec les dites bactéries et à les nourrir pendant plusieurs jours afin de favoriser la carbonatogenèse.

3.3 ACTIONS : TRAITEMENTS DE L'ÉPAISSEUR SUPERFICIELLE

Les méthodes que nous allons décrire dans ce chapitre sont à distinguer de deux autres types de procédés :

- ceux qui sont appliqués à l'épiderme d'un mur (ils ont fait l'objet des paragraphes ci-dessus)
- ceux qui visent au renforcement des structures (voir chapitre 5).

Nous parlerons de 'traitements de l'épaisseur superficielle' et cette catégorie regroupe des techniques qui modifient la couche superficielle des murs (sur une profondeur maximale de 5 cm environ). Il s'agit de la reprise des joints, de la retaille à vif, du ragréage en pierre reconstituée et du placage.

3.3.1 Reprise des joints de maçonnerie

En dernière phase du ravalement, il est procédé au rejointoiement final.

Les joints existants sont creusés au moyen d'un poinçon : on parle du 'sciottage' des joints.

Les mortiers utilisés devront être adaptés à la nature des pierres. Pour les pierres calcaires, il est généralement préconisé un mortier à base de chaux et de poudre de pierre (ou, faute de mieux, de sable).

Il faut distinguer :

- le joint de hourdage qui a été réalisé au moment de la création de la maçonnerie (par fichage, coulage ou bain de mortier). Il a un rôle mécanique : lier les éléments entre eux. En principe, on n'y touche pas au moment d'un ravalement.
- le joint de finition qui a un rôle esthétique et assure aussi une fonction d'étanchéité. Il peut être, par exemple, beurré, tiré ou bouché.

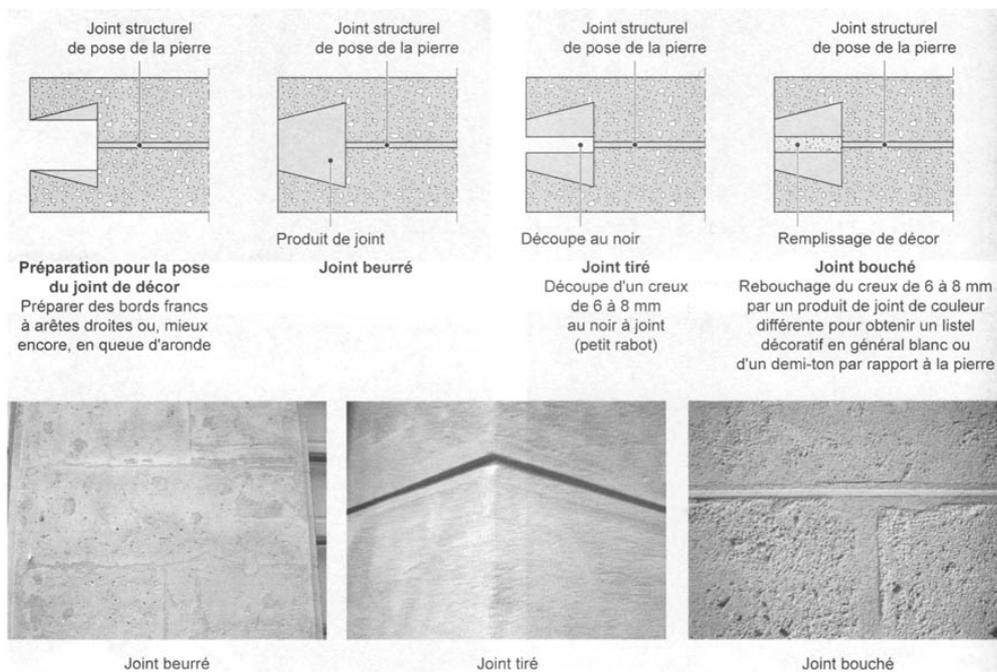


Figure 50 : Exemples de rejointoiement
 [Virolleaud (2011), p.392]

3.3.2 Retaille à vif

Lorsque le parement est très abîmé (comme le tuffeau à Nantes), on procède, avec un ‘ciseau à pierreaux’, à une retaille du parement sur une épaisseur limitée généralement à 5 mm. Bien exécutée, cette méthode permet de respecter les modénatures d’origine.

Une variante possible, lorsque le parement est moins endommagé, est de procéder à un ponçage. On utilise une ponceuse à disque ou un outil appelé ‘chemin de fer’.

Le nouveau parement doit ensuite être protégé (avec un hydrofuge notamment) pour éviter un retour rapide des salissures et des dégradations.

Citons quelques inconvénients :

- méthode lente
- atteinte à la valeur historique d’une façade
- difficulté d’obtenir une planéité parfaite des nouvelles surfaces
- coût élevé du fait du recours à une main d’œuvre très qualifiée

3.3.3 Ragréage en pierre reconstituée

Nous distinguerons deux types de surfaces à traiter :

- les zones planes

- les moulures

Les méthodes retenues ne sont pas identiques pour ces deux cas de figure.

Au terme du processus, il convient souvent d'ajouter une patine d'harmonisation pour éviter les contrastes avec les zones conservées en l'état.

3.3.3.1 Zones planes

La méthode suit les étapes suivantes :

- piochage de la façade sur 5 cm d'épaisseur environ
- dégrossis préalable en mortier de chaux (sur quelques centimètres)
- mise en place d'un grillage galvanisé avec clous à bateau pour fixation sur toute la surface
- corps d'enduit ou renformis (sur 2 ou 3 cm) en utilisant, par exemple, le produit 'Chausable Naturel' de la marque 'Saint-Astier'
- couche de finition sur une épaisseur de 5 à 7 mm en recourant, par exemple, au produit 'Paris Déco' de la marque 'Saint-Astier'

3.3.3.2 Moulures



Figure 51 : Exemple de moulure reconstituée
avec des clous et des fils en laiton
[Vincent Foussard]

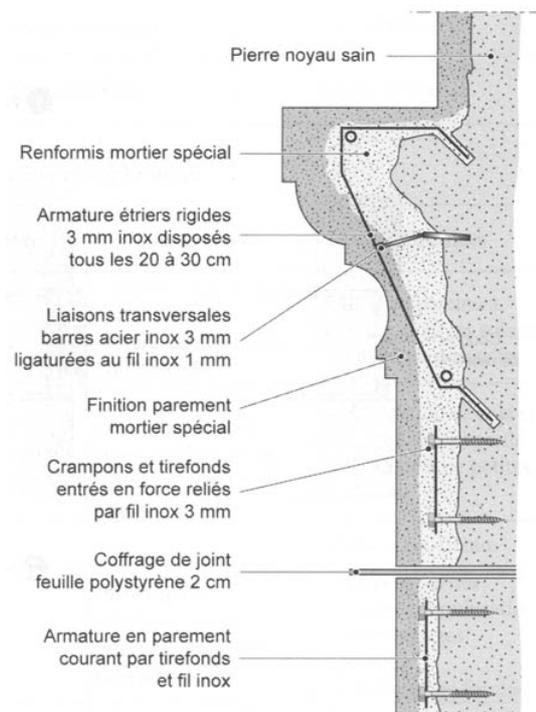


Figure 52 : Réparation d'une corniche
[Virolleaud (2011), p.393]

La méthode suit plusieurs étapes successives :

- piochage des zones friables
- application d'une résine d'adhérence sur le support en pierre saine
- percement par des vis ou des clous (en laiton ou en acier inox). Si c'est nécessaire, des goujons en tiges filetées (associés à des chevilles chimiques) sont posés.
- mise en place, sur les parties les plus dégradées, de fil (en laiton ou en acier inox) pour servir d'armature entre les points de fixation (vis, clous ou goujons).
- ragréage (renformis et finition) avec un mortier à base de chaux, pigments et poudre de pierre (ou sable, faute de mieux). Ces raccords seront réalisés avec un mortier de dureté similaire au support.

Certains mortiers préparés en usine s'apparentent au 'ciment métallique' : ils contiennent en effet un liant à base d'oxychlorure de zinc, en plus de la poudre de pierre et des charges siliceuses. C'est le cas, notamment, du mortier 'Minerstone' de la société 'Amonit'.

3.3.4 Placage

On procède à un refouillement (c'est-à-dire à un creusement de la surface apparente de la pierre sur une épaisseur de 7,5 cm minimum) et l'on insère une 'plaquette' dans l'espace vacant ainsi créé.

Deux méthodes de fixation existent :

- pose d'une agrafe métallique
- utilisation de colles à base de résines époxy ou acryliques.

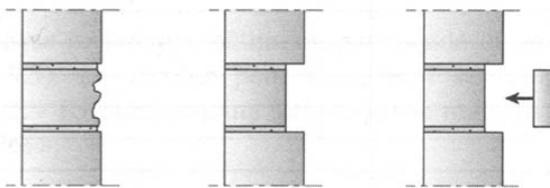


Figure 53 : Implantation d'un placage en remplacement du parement [Virolleaud (2011), p.454]

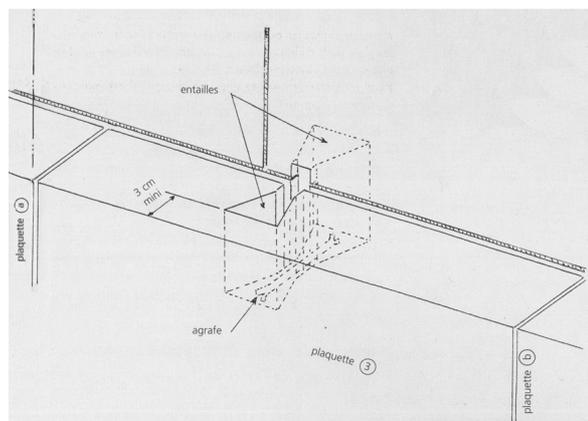


Figure 54 : Mise en place d'une agrafe métallique entre une plaquette et son support en pierre [Laurent (2005), p.89]

Notons que les caractéristiques de la plaquette doivent être très proches de celles des pierres environnantes car, par exemple, si la plaquette est moins poreuse que les pierres qui l'entourent, ces dernières se dégraderont plus vite et un contraste apparaîtra dans la façade.

La plaquette est généralement un peu plus épaisse que l'excavation qui l'accueille afin que cette plaquette puisse être retaillée après son insertion.

Le plaquage est une méthode onéreuse.

4 STRUCTURE : CAPACITES PORTANTES

La conservation d'un mur ancien implique aussi de vérifier qu'il est soumis à des charges qui ne se rapprochent pas trop de sa capacité de résistance théorique. Dans le cas contraire, il faudra être très vigilant sur l'apparition de fissures, même mineures.

Nous ne nous intéresserons dans ce chapitre qu'aux murs d'appareil régulier composés, dans toute leur épaisseur, de pierres géométriquement taillées. Nous considérerons, de plus, que les joints sont continus sur toute l'interface entre les pierres.

La résistance à la compression d'une pierre dépend aussi de la teneur en eau : un calcaire saturé d'eau a une résistance en compression divisée par deux ! En effet, si les pores d'une pierre sont pleins d'eau, les pressions sont transférées entièrement sans possibilité d'amortissement élastique. Nous n'intégrerons néanmoins pas ce facteur dans les paragraphes suivants : il devra être paramétré, au cas par cas, en fonction des caractéristiques inhérentes à chaque chantier.

4.1 MESURE

Il est fait appel à la méthode dite de « relaxation (ou libération) des contraintes ».

La première étape consiste à disposer très précisément deux groupes de quatre 'billes'. On peut utiliser pour cela des appareils électroniques de positionnement.

On perce ensuite deux rainures avec une disqueuse : la rainure supérieure est située au-dessus des billes, la rainure inférieure est située sous les billes.

Cette opération a pour conséquence de relâcher, entre les deux percements, la contrainte de compression qui s'exerçait sur cette portion de mur (d'où le nom de la méthode). La distance verticale entre les deux groupes de billes a donc tendance à augmenter.

Pour terminer, on insère un vérin ultra-plat (généralement en forme de demi-disque) dans chacune des deux rainures puis ces deux vérins sont activés simultanément.

On mesure la pression de compensation qui doit être fournie par les vérins pour rétablir la position initiale des billes. On obtient ainsi la contrainte de compression qui s'appliquait à la maçonnerie avant le percement des rainures.

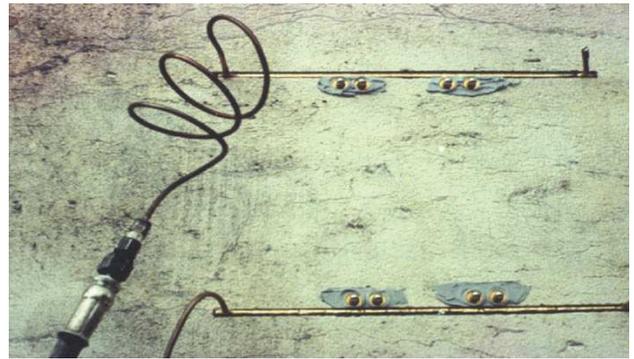


Figure 55 : Méthode de la libération des contraintes par sciage
[Gabriel Bajoux]

4.2 EVALUATION DES CONTRAINTES DE COMPRESSION

Nous concentrerons notre attention sur la résistance à la compression sous charges verticales et nous ne détaillerons pas la résistance à la traction, au cisaillement ou à la flexion car nous savons que ces sollicitations sont en partie reprises par des armatures métalliques insérées entre (ou dans) les pierres. Or, il est difficile, dans une maçonnerie ancienne, d'évaluer la section exacte et l'état de conservation de ces armatures sauf à avoir recours à un appareillage onéreux.

Nous expliciterons trois méthodes qui, par leur simplicité, sont adaptées à des diagnostics assez rapides sur des chantiers courants :

- la règle du 'un dixième'
- la méthode citée en 2009 par le bureau d'études Socotec (voir bibliographie)
- la méthode tirée de l'Eurocode 6

L'objectif est de comparer ces trois types d'évaluation.

Nous évoquerons aussi, en fin de chapitre, des méthodes qui s'appuient sur de coûteuses modélisations, plutôt destinées aux bâtiments d'exception.

Notons que l'Eurocode 6 introduit brièvement la notion de vérification à l'ELS (état limite de service) pour les maçonneries contemporaines. Or, aucune étude ne définit précisément, pour les maçonneries anciennes en pierre, les limites d'utilisation en service.

En pratique, pour un mur ancien chargé verticalement, il est d'usage de considérer que l'ELS est vérifié si l'ELU (état limite ultime) l'est.

4.2.1 1^{ère} méthode : Règle du 'un dixième'

Cela consiste à obtenir la contrainte admissible pour le mur en divisant par dix la contrainte produisant la rupture de la pierre.

$$\sigma_{Rd} = f_b / 10$$

où :

- σ_{Rd} est la contrainte de compression admissible par la maçonnerie à l'ELU (en MPa).
- f_b est la résistance moyenne normalisée des pierres à la compression (MPa).

Cette règle est ancienne et a été, par exemple, mise en exergue par le professeur Denfer à l'Ecole Centrale en 1891 (voir bibliographie).

Il est significatif que, dans un ouvrage datant de 2009, le bureau d'études Socotec continue à mentionner cette règle :

« La contrainte admissible doit être limitée au dixième de la résistance à la compression de la pierre. »

Ce principe n'est donc pas annulé par la procédure de calculs plus précise recommandée par ce bureau de contrôle (voir paragraphe suivant).

Tableau XII : Règle du 'un dixième'

[d'après Denfer (1891), p.99]

Résistance à l'écrasement

NATURE DE LA MATIÈRE	Poids du mètre cube.	Charge par centimètre carré produisant la rupture	Charge de sécurité par centimètre carré.
Pierres diverses			
1. Château Landon.Souppes (S.-et-M.)	2500à2600	700 à 800	70 à 80
2. Hauteville (Ain).....	2760	1100	110
3. Villebois (Ain).....	2600à2700	800 à 900	80 à 90
4. Corgoloin (Côte-d'or).....	2700	900 à 1000	90 à 100
5. Granit de Normandie.....	2700	700	70
6. Lavé dure du Vésuve.....	2600	590	59
7. Porphyre.....	2880	2400	240
8. Comblanchien (Côte-d'Or).....	2700	900	90
9. Grimault.....	2600	700	70
10. Belyoye (Jura).....	2000à2700	800 à 900	80 à 90
11. Liais de Courville (Marne).....	2150	350 à 400	35 à 40
12. Echaillon blanc (Isère).....	2500	750	75
13. Anstrude (Marne).....	2150à2250	325 à 400	32 à 40
14. Liais de Clamart (Seine).....	2300à2500	400 à 500	40 à 50
15. Laversine (Aisne).....	2300	300 à 450	30 à 45
16. Roche de Bagneux (Seine).....	2200à2400	300 à 350	30 à 35
17. Euville (Meuse).....	2300	300 à 350	30 à 35
18. Ravières (Yonne).....	2200	280 à 330	28 à 33
19. Roche fine de St-Maximin (Oise)...	2100à2300	100 à 150	10 à 15
20. Roche de Chassignelles (Yonne)...	2300	450	45
21. Chauvigny (Vienne).....			
21. Lerouville (Meuse).....	2300	250 à 300	25 à 30
22. Roche ordin. St-Maximin (Oise)...	2100à2300	100 à 150	10 à 15
23. Vitry (Seine).....	1900à2000	120 à 250	12 à 25
24. Courson (Yonne).....	1900	85	8.50
25. Palotte (Yonne).....	1750	130 à 150	13 à 15
26. Isle-Adam (S.-et-O.) Banc franc...			
27. Marly-la Ville (S.-et-O.).....	1750	80 à 90	8 à 9
28. Méry (S.-et-O.).....	1700à1800	90 à 130	9 à 13
29. St-Waast (Oise) Banc royal.....	1550à1650	60 à 80	6 à 8
30. Abbaye du Val (S.-et-O.).....	1800	80 à 100	8 à 10
31. St-Leu (Oise) Vergelé.....	1750à1790	80 à 100	8 à 10
32. St-Maximin (Oise) Vergelé.....	1500à1600	50 à 70	5 à 7
33. St-Waast (Oise) Vergelé.....	1500à1600	50 à 70	5 à 7
34. Lambourdes.....	1500à1600	20 à 35	2 à 3.5
35. Meulière.....	1500à2200	30 à 150	3 à 15

4.2.2 2^{ème} méthode : Guide Socotec (fiche 7.70)

C'est aussi la méthode préconisée en 1984 par l'Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat (voir bibliographie) et reprise dans le guide rédigé par le bureau de contrôle Véritas en 2012 (voir bibliographie).

4.2.2.1 Résistance à la compression

La contrainte σ_{Rd} admissible d'une maçonnerie en compression est exprimée par la formule suivante :

$$\sigma_{Rd} = 4f_m / (10w_m)$$

où :

- f_m est la contrainte de rupture en compression du mortier des joints.
- w_m est l'épaisseur des joints (en cm).

Comme nous l'avons vu précédemment, cette contrainte σ_{Rd} n'est à retenir que si elle est inférieure au dixième de la résistance de la pierre. Dans le cas contraire, c'est toujours l'antique règle des maîtres-maçons (la règle du 'un dixième') qui s'applique.

f_m

En l'absence de tests réalisés en laboratoire sur des échantillons de mortier (extraits de la maçonnerie à diagnostiquer), Socotec préconise de fixer la valeur de f_m à 3,5 MPa.

w_m

Si l'épaisseur du joint est inférieure à 1 cm, on prend : $w_m = 1$ cm.

Si l'épaisseur du joint est supérieure à 4 cm, on prend : $w_m = 4$ cm.

Si l'épaisseur du joint est comprise entre 1 et 4 cm, on prend : $w_m =$ valeur mesurée en centimètres.

Conséquence

Si l'on fixe la valeur de f_m à 3,5 MPa, on observe que la contrainte admissible pour les maçonneries anciennes se situe entre 0,35 MPa (pour des joints de 4 cm d'épaisseur ou plus) et 1,4 MPa (pour des joints de 1 cm d'épaisseur ou moins).

$$0,35 = 4 \times 3,5 / (10 \times 4)$$

$$1,4 = 4 \times 3,5 / (10 \times 1)$$

4.2.2.2 Capacité portante

La capacité portante N_{Rd} ne dépend pas seulement de la résistance à la compression des éléments constitutifs mais aussi de la morphologie du mur et, en particulier, de son élancement.

Soit h la hauteur du mur et u son épaisseur, l'élancement noté λ est égal au rapport de h sur u :
 $\lambda = h/u$

Si $\lambda < 12$ et si le mur est parfaitement vertical

Dans ce cas, la capacité portante N_{Rd} dépend uniquement de la résistance à la compression et de la surface de la section utile A :

$$N_{Rd} = \sigma_{Rd} \cdot A$$

où A est la section de l'élément porteur (totale ou par unité de longueur), déduction faite d'un éventuel enduit.

Si $\lambda > 12$ et si le mur est parfaitement vertical

Pour intégrer le risque de flambement, il faut appliquer à la capacité portante N_{Rd} un coefficient de minoration issu des règles applicables aux maçonneries récentes. On procède par interpolation.

Tableau XIII : Minoration de la capacité portante en fonction de l'élancement.

[Socotec (2009), § 7.70.1]

Élancement λ	Coefficient minorateur de la capacité portante
16	0,93
17	0,88
18	0,83
19	0,78
20	0,75

4.2.3 3^{ème} méthode : Eurocode 6

L'Eurocode 6 prévoit le cas de maçonneries en pierres hourdées avec du mortier. Une évaluation peut donc être obtenue en appliquant cette méthode contemporaine à des maçonneries anciennes.

Pour chaque portion de mur, trois calculs doivent théoriquement être menés : en tête de mur, à mi-hauteur, en pied de mur.

Notre objectif étant de comparer la méthode de l'Eurocode 6 avec d'autres démarches plus sommaires, nous ne nous intéresserons qu'à la valeur en pied de mur.

La méthode exposée ci-dessous n'est valable que si l'élançement respecte la condition suivante :

$$\lambda_{\text{eff}} = h_{\text{eff}} / u_{\text{eff}} < 27$$

où :

- h_{eff} est la hauteur effective du mur.
- u_{eff} est l'épaisseur effective du mur.

$$h_{\text{eff}} = C_h \cdot h$$

$$u_{\text{eff}} = C_u \cdot u$$

où :

- h est la hauteur réelle du mur (entre le haut du plancher inférieur et le bas du plafond supérieur).
- u est l'épaisseur réelle du mur.

Dans notre cas, on prendra :

- C_h égal à 1 parce que, d'une part, nous ne considérerons pas que le mur soit spécifiquement raidi sur ses bords verticaux et que, d'autre part, le liaisonnement entre un mur en pierre et des planchers anciens (souvent en bois) ne fonctionne généralement pas comme un encastrement mais comme une rotule. De façon générale, l'Eurocode 6 précise que « dans tous les cas, il est possible de considérer que $h_{\text{eff}} = h$ ».
- C_u égal à 1 car, comme nous l'avons vu, nous nous plaçons dans le cas d'un mur courant qui n'est pas renforcé par des raidisseurs ou des contreforts.

$$N_{\text{Rd}} \text{ (en pied de mur)} = \Phi_p \cdot L \cdot u \cdot f_d$$

Où :

- N_{Rd} est la charge maximale admissible par la maçonnerie à l'ELU sous une charge verticale.
- Φ_p est le coefficient de réduction dû à l'élançement et à l'excentricité des charges en pied de mur.
- L est la longueur du mur.

- f_d est la résistance corrigée à la compression de la maçonnerie.

Notons que si $L.u < 0,1 \text{ m}^2$ (cas d'un poteau par exemple), il faut réduire la résistance de calcul de la maçonnerie en multipliant f_d par le facteur $(0,7 + 3.L.u)$.

$$\Phi_p = 1 - 2.e_p/u$$

où e_p est l'excentricité en pied de mur

$$e_p = \max (M_p/N_p + e_{\text{init}} + e_{\text{he}} ; 0,05 u)$$

Où :

- M_p est le moment fléchissant en pied de mur, dû à l'excentrement de la charge d'appui.
- N_p est la charge verticale agissant en pied de mur.
- e_{init} est l'excentricité initiale.
- e_{he} est l'excentricité due aux charges horizontales (au vent notamment).

Nous considérerons qu'au niveau du sol, l'application du poids du mur n'est plus excentrée par la présence de planchers (comme aux étages supérieurs) et que par conséquent :

$$M_p = 0.$$

La réalité est plus complexe puisqu'il peut y avoir des sous-sols et des caves. Nous estimerons néanmoins, en première approximation, qu'il est possible de ne pas prendre en compte M_p .

Pour ce qui est de e_{he} , l'excentricité due aux charges horizontales de vent peut généralement être négligée en tête et en pied de mur :

$$e_{\text{he}} = 0$$

$$e_{\text{init}} = h_{\text{eff}} / 450$$

$$f_d = f_k / \gamma_M$$

Où :

- f_k est la résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie.
- γ_M est le coefficient partiel de sécurité qui intègre les différentes incertitudes liées à la mise en œuvre et à la caractérisation de la résistance des matériaux.

Détermination de γ_M

γ_M dépend de la qualité du mortier et des blocs de pierre utilisés ainsi que du niveau de contrôle exercé sur (et par) l'entreprise lors de la réalisation d'un mur. Nous ferons deux hypothèses à propos des murs anciens que nous étudierons :

- le mortier utilisé est courant et les pierres seront considérées de catégorie 2 (et avec un niveau de confiance supérieur à 75 % pour ce qui est des variations de la résistance).
- un contrôle (effectif mais non continu) a été exercé, à l'époque, par une maîtrise d'œuvre extérieure à l'entreprise de maçonnerie. Le chantier a été exécuté par du personnel qualifié respectant les règles de l'art en vigueur lors de la construction. Cela correspondrait, en des termes modernes, à un niveau d'inspection IL2 (Inspection Level 2).

Tableau XIV : Coefficient γ_M associé à la maçonnerie

[Hurez (2009), p.86]

Maçonnerie	γ_M		
	Niveau de contrôle de l'exécution		
	IL3	IL2	IL1
Éléments de catégorie 1, mortier performantiel ⁽¹⁾	1,5	2,0	2,5
Éléments de catégorie 1, mortier de recette ⁽²⁾	1,7	2,2	2,7
Éléments de catégorie 2, tout mortier ⁽¹⁾⁽²⁾	2,5	3,0	3,5
Autres matériaux			
Ancrage d'acier d'armature	1,7	2,2	2,7
Acier d'armature et de précontrainte	1,15		
Composants accessoires ⁽³⁾	1,7	2,2	2,7
Linteaux conformes à l'EN 845-2	1,5	2,0	2,5

1) Prescriptions des mortiers performantiels ou de recette selon EN 998-2 et EN 1996-2.
2) Lorsque le coefficient de variation applicable aux éléments de catégorie 2 n'est pas supérieur à 25 %.
3) Le coefficient partiel pour les bandes de coupure de capillarité est inclus dans l'ouvrage de maçonnerie.

Précisons que l'Eurocode 6 considère que des éléments de maçonnerie contemporains sont de catégorie 1 si la résistance à la compression déclarée (en valeur moyenne ou en valeur caractéristique) est établie avec un niveau de confiance égal à 95%.

Les hypothèses retenues aboutissent à la valeur suivante :

$$\gamma_M = 3$$

Détermination de f_k

f_k peut être déterminé soit à partir d'essais réalisés selon la norme NF EN 1052-1, soit à partir de calculs normalisés. Nous retiendrons cette seconde méthode.

En supposant que le montage s'est fait avec un mortier courant et que les joints sont supérieurs à 3 mm, on peut utiliser la formule suivante :

$$f_k = K \cdot (f_b)^{0,7} (f_m)^{0,3}$$

Où :

- K est un coefficient dépendant de la nature des éléments maçonnés.
- f_b est la résistance moyenne normalisée à la compression des pierres. C'est la référence pour les calculs sous chargements verticaux.
- f_m est la résistance moyenne à la compression du mortier, déterminée conformément à l'EN 1015-11.

Il faut veiller à respecter les limites imposées par l'Eurocode 6 :

$$f_m \leq 20 \text{ MPa et } f_m \leq 2 \cdot f_b$$

$$f_b \leq 75 \text{ MPa}$$

Dans le cas des ouvrages de maçonnerie en pierre naturelle prétaillée avec un mortier d'usage courant, il faut prendre :

$$K = 0,45$$

Mais, dans la mesure où il est fréquent que ce type de maçonnerie présente des joints verticaux intérieurs épais, il est prudent de suivre la recommandation de l'Eurocode 6 consistant à multiplier K par 0,8.

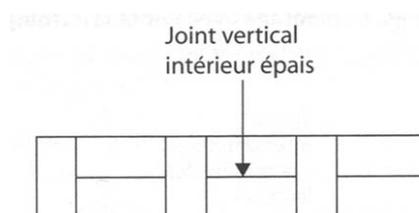


Figure 56 : Vue en plan d'un mur appareillé
[Hurez (2009), p.49]

On obtient donc $K = 0,8 \times 0,45 = 0,36$

4.2.4 Comparaison des trois méthodes d'évaluation

Nous considérons, pour cette comparaison, un mur situé au rez-de-chaussée d'un bâtiment entre le sol et le plancher du premier étage. Il pourrait s'agir par exemple d'un pan de mur d'une façade parisienne en pierres de taille.

L'épaisseur u est de 30 cm et la hauteur h de 3 m. Il n'y a ni contrefort ni raidisseur contre ce mur.

L'élancement est donc égal à : $\lambda = h / u = 3/0.3 = 10$

$\lambda < 12$ donc on n'a pas de coefficient à appliquer dans la méthode recommandée par Socotec.

$\lambda < 27$ donc on peut utiliser la méthode proposée par l'Eurocode 6.

Pour f_b et f_m , les données retenues sont les suivantes :

- $f_b = 40$ MPa (pierre calcaire du type 'roche dure de Saint-Maximin (Oise)'). On respecte bien la limite imposée par l'Eurocode 6 : $f_b \leq 75$ MPa

- $f_m = 5$ MPa (c'est-à-dire, en langage contemporain, un mortier type NHL 5).

On respecte ainsi les deux limites imposées par l'Eurocode 6 : $f_m \leq 20$ MPa et $f_m \leq 2.f_b$

Nous prendrons l'épaisseur du joint w_m égale à 1 cm car c'est une valeur couramment observable sur les façades parisiennes.

Tableau XV : Comparaison des trois méthodes pour la roche dure de Saint-Maximin

	méthode 1 : Règle du 'UN DIXIEME'		méthode 2 : Guide SOCOTEC		méthode 3 : EUROCODE 6	
	$\sigma_{Rd} = f_b / 10$	4 MPa	$\sigma_{Rd} = 4f_m / (10w_m)$	2 MPa	$\sigma_{Rd} = \phi_p \cdot f_d$	2,32 MPa
σ_{Rd} : contrainte admissible						
f_d : résistance corrigée à la compression de la maçonnerie		/		/	$f_d = f_k / \gamma_M$	2,57
γ_M : coefficient partiel de sécurité (qui tient compte des différentes incertitudes liées à la mise en oeuvre et à la caractérisation de la résistance des matériaux)		/		/		3 /
f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie		/		/	$f_k = K \cdot (f_b)^{0,7} \cdot (f_m)^{0,3}$	7,72 MPa
K : coefficient réducteur appliqué aux résistances		/		/		0,36 /
f_b : résistance moyenne normalisée à la compression des pierres		40 MPa		40 MPa		40 MPa
f_m : résistance moyenne à la compression du mortier des joints		5 MPa		5 MPa		5 MPa
w_m : épaisseur des joints prise en compte		1 cm		1 cm		1 cm
ϕ_p : coefficient de réduction (permettant de prendre en compte l'élançement et l'excentricité des charges en pied de mur)		/		/	$\phi_p = 1 - 2 \cdot e_p / u$	0,9
u : épaisseur du mur		0,3 m		0,3 m		0,3 m
e_p : excentricité en pied de mur		/		/	$e_p = \max(M_p / N_p + e_{init} + e_{he} ; 0,05 u)$	0,015 m
e_{init} : excentricité initiale		/		/	$e_{init} = h_{eff} / 450$	0,007 m
e_{he} : excentricité due aux charges horizontales (dont vent)		/		/	négligée	0 m
h_{eff} : hauteur effective du mur		/		/	$h_{eff} = C_h \cdot h$	3 m
h : hauteur réelle du mur		3 m		3 m		3 m
C_h : coefficient de réduction pour la hauteur du mur		/		/		1 /
M_p : moment fléchissant en pied de mur		/		/	négligé	0 kN.m

Plusieurs observations peuvent être faites :

Observation 1

La valeur obtenue par la méthode de l'Eurocode 6 est supérieure à celle obtenue par la formule du guide Socotec. La méthode empirique dite du 'un dixième' réalise souvent l'approximation la plus optimiste.

Observation 2

γ_M est un paramètre très important. Or, sa détermination est assez subjective dans le cas de murs anciens.

Si on fait l'hypothèse que les éléments en pierre sont de catégorie 1 et que la maçonnerie a été réalisée sous le contrôle minutieux d'un bon maître d'œuvre, la valeur de γ_M peut être estimée à 1,7 au lieu de 3 (voir tableau XIV) ! La pression maximale acceptable est donc multipliée par $3/1,7$ ($= 1,76$) ! On obtient 4,08 MPa, ce qui est supérieur à la valeur fournie par la méthode a priori la plus laxiste (méthode dite du 'un dixième').

Observation 3

Faisons maintenant l'hypothèse que la pierre de Saint-Maximin utilisée n'est pas tirée d'une couche dure mais d'une couche ferme (c'est-à-dire moins résistante). C'est, d'ailleurs, sans doute un cas de figure plus fréquent que celui que nous avons étudié en premier (la roche dure de Saint Maximin).

On observe alors qu'on obtient presque deux valeurs identiques pour la méthode Socotec et la méthode Eurocode 6. De façon générale, les résultats des trois méthodes se resserrent.

Tableau XVI : Comparaison des trois méthodes pour la roche ferme de Saint-Maximin

	méthode 1 : Règle du 'UN DIXIEME'	méthode 2 : Guide SOCOTEC	méthode 3 : EUROCODE 6
σ_{Rd} = contrainte admissible	$\sigma_{Rd} = f_b / 10$ 2,2 MPa	$\sigma_{Rd} = 4f_m / (10w_m)$ 1,4 MPa	$\sigma_{Rd} = \phi_p \cdot f_d$ 1,37 MPa
f_d : résistance corrigée à la compression de la maçonnerie	/	/	$f_d = f_k / \gamma_M$ 1,52
γ_M : coefficient partiel de sécurité (qui tient compte des différentes incertitudes liées à la mise en oeuvre et à la caractérisation de la résistance des matériaux)	/	/	3 /
f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie	/	/	$f_k = K \cdot (f_b)^{0,7} (f_m)^{0,3}$ 4,56 MPa
K : coefficient réducteur appliqué aux résistances	/	/	0,36 /
f_b : résistance moyenne normalisée à la compression des pierres	22 MPa	22 MPa	22 MPa
f_m : résistance moyenne à la compression du mortier des joints	3,5 MPa	3,5 MPa	3,5 MPa
w_m : épaisseur des joints prise en compte	1 cm	1 cm	1 cm
ϕ_p : coefficient de réduction (permettant de prendre en compte l'éclatement et l'excentricité des charges en pied de mur)	/	/	$\phi_p = 1 - 2 \cdot e_p / u$ 0,9
u : épaisseur du mur	0,3 m	0,3 m	0,3 m
e_p : excentricité en pied de mur	/	/	$e_p = \max(M_p / N_p + e_{init} + e_{he} ; 0,05 u)$ 0,015 m
e_{init} : excentricité initiale	/	/	$e_{init} = h_{eff} / 450$ 0,007 m
e_{he} : excentricité due aux charges horizontales (dont vent)	/	/	mégligée 0 m
h_{eff} : hauteur effective du mur	/	/	$h_{eff} = C_h \cdot h$ 3 m
h : hauteur réelle du mur	3 m	3 m	3 m
C_h : coefficient de réduction pour la hauteur du mur	/	/	1 /
M_p : moment fléchissant en pied de mur	/	/	mégligé 0 kN.m

4.3 MODELISATION GLOBALE

Nous évoquerons un modèle élastique linéaire et un modèle qui est à la fois anisotropique et élastoplastique.

4.3.1 Exemple de modèle élastique linéaire

Une modélisation de quatre travées de la cathédrale de Strasbourg a été réalisée en 1996 à l'aide du code de calcul aux éléments finis CESAR-LCPC (mis au point par les laboratoires des Ponts et Chaussées). Une modélisation complète aurait nécessité un système informatique plus puissant que celui dont disposaient ces chercheurs.

La loi de comportement adoptée pour ce modèle est élastique linéaire, ce qui implique la détermination préalable de deux caractéristiques mécaniques : module de Young E et coefficient de Poisson ν .

Des carottages dans des pierres déposées ont permis d'établir que le grès utilisé par les bâtisseurs a une résistance en compression de 60 Mpa et un poids volumique de 20kN/m^3 .

Il a ensuite été reconstitué un petit muret expérimental. Après y avoir inséré des capteurs, ce muret a été placé dans une presse et soumis à différents types de contraintes.

Module de Young

Les mesures expérimentales montrent que le module de Young (en compression) se situe autour de 5000 MPa. Il s'agit en fait du module de Young instantané (le muret expérimental est neuf). Mais les murs de la cathédrale datent de plusieurs siècles. C'est donc le module de Young différé qu'il faut prendre en compte. Les chercheurs ont estimé que ce second module 'devait' être cinq fois plus petit que le premier : 1000 MPa. C'est là une des grandes faiblesses de la méthode. Les modélisateurs concèdent, d'ailleurs, dans leur conclusion que « le choix du module est particulièrement difficile car il doit représenter au mieux une maçonnerie hétérogène, non linéaire, qui comporte des fissurations, a vieilli et s'est adaptée au cours du temps ». Or ce module est crucial, notamment pour estimer les redistributions des réactions au niveau des appuis dans le cas où survient ponctuellement un tassement des fondations.

Coefficient de Poisson

Les mesures sur le muret expérimental aboutissent à une valeur située autour de 0,12. Cette valeur est majorée pour tenir compte de l'ancienneté de la structure. Le coefficient de Poisson ν a été fixé à 0,15.

L'hypothèse d'un modèle informatique élastique linéaire permet d'utiliser les formules :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\tau = G \cdot \gamma$$

où :

- σ est la contrainte de compression (ou de traction).
- ε est la déformation liée à la compression (ou à la traction).
- τ est la contrainte de cisaillement.
- γ est la déformation liée au cisaillement.
- G est le module de cisaillement ou module d'élasticité transversale
avec $G = E / (2(1 + \nu))$

Contraintes de compression

Au terme de la modélisation, il apparaît que la contrainte de compression maximale σ_{Ed} est égale à 1,28 MPa et se manifeste au pied des piliers.

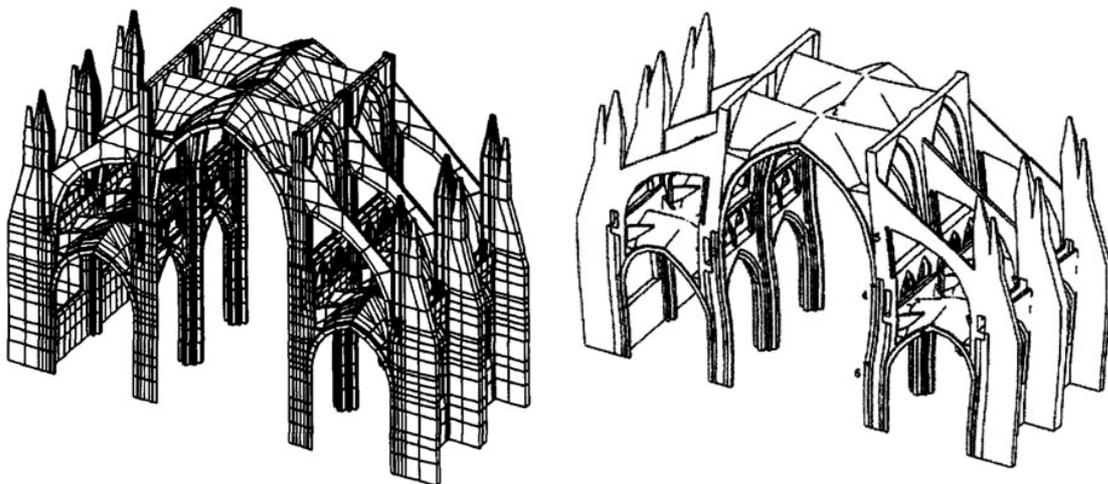


Figure 57 : Modélisation de deux travées de la cathédrale de Strasbourg
(maillage et déformée)

[d'après Godart (1996), pp. 49 et 54]

4.3.2 Modèles anisotropiques et élastoplastiques

Les modèles anisotropiques tiennent compte du fait que certains matériaux, de part leur nature ou leur mise en œuvre, ne se comportent pas de la même façon dans toutes les directions.

Les modèles élastoplastiques, quant à eux, intègrent non seulement les déformations élastiques (réversibles) mais aussi les déformations plastiques (permanentes).

Ces méthodes s'appuient souvent sur des algorithmes conçus au cas par cas. Leurs applications sont plutôt réservées à des bâtiments d'exception (type Monuments Historiques).

Un exemple est fourni par la restauration des voûtes de la caserne Villars (construite en 1755 à Moulins dans l'Allier) qui a été menée conjointement par François Voinchet, architecte en chef des Monuments Historiques, et Gilbert Lamboley, ancien élève de l'Ecole Polytechnique. Il s'agit de structures hors norme : « les voûtes sont des coupes élancées et dissymétriques (devant enjamber les fenêtres, elles sont presque horizontales à leur contact avec le mur de façade), constituées de files de briques hourdées au plâtre, composant autant d'arcs juxtaposés qui franchissent la portée dans le sens de la diagonale du carré de la pièce à couvrir. Chacune de ces files vient retomber sur une 'dent' en pierre de taille engagée dans le mur, dont l'ensemble évoque une sorte de crémaillère ».

Le modèle informatique retenu est élastoplastique et anisotropique. Il tient compte de la disposition des briques et est visualisé grâce au progiciel 'Systus'.

On peut affirmer qu'il est économiquement irréaliste, pour l'instant, d'intégrer de tels outils à des études peu onéreuses sur des maçonneries anciennes courantes.

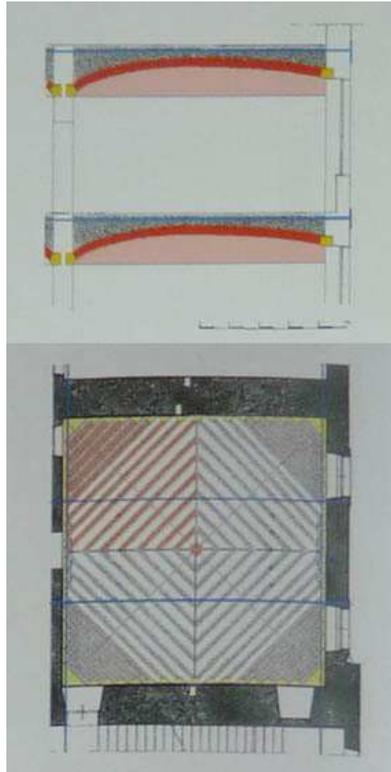


Figure 58 : Plan et coupe d'une voûte de la caserne Villars
[d'après Voinchet (2003), p. 160]

5 STRUCTURE : FISSURES ET DESORDRES

Une fois que l'on a une idée des contraintes auxquelles est soumise une maçonnerie ancienne, on peut commencer la phase active du processus de conservation structurelle.

Cette ultime phase se fait en trois séquences :

- observation et interprétation des fissures
- confirmation des hypothèses par des mesures précises
- correction des désordres structurels.

5.1 DIAGNOSTIC

Il convient de distinguer les fissures superficielles de celles qui sont traversantes (on parle de fissures 'infiltrantes' si l'eau passe), c'est-à-dire de celles qui concernent l'épaisseur totale d'un mur. Une fissure n'est pas forcément alarmante : elle signifie souvent que le bâtiment a su s'adapter aux variations de contraintes.

Notons, à ce propos, que la plupart des fissures sont causées par des phénomènes sur lesquels l'homme n'a aucune prise tels que les variations saisonnières de la température ou du taux d'humidité. Ces chocs cycliques induisent, par dilatation ou rétraction, des cassures liées aux différences de comportement entre les pierres et le mortier (ou entre la surface de la pierre et son corps interne).

Il faut distinguer microfissures, fissures et lézardes...

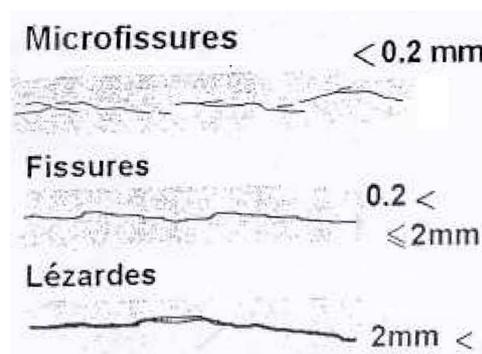


Figure 59 : Typologie des 'fissures'
[d'après Bajoux (2013a), chap.14, p.3]

La description d'une fissure répertorie les caractéristiques suivantes : localisation, tracé, orientation, largeur, suintement...

Il faut faire un relevé précis des fissures pour essayer d'en comprendre les causes. Par exemple, on aboutira à des conclusions différentes selon que les fissures sont plus larges en montant ou en descendant.

L'essai de classification des fissures exposées dans les paragraphes suivants ne peut être exhaustif.

5.1.1 Fissures dues à des tensions internes

Ces fissures peuvent avoir pour origine l'action d'un plancher ou d'une charpente. Parfois, la cohésion interne de la maçonnerie est mise à mal par deux murs perpendiculaires qui ne sont pas assez solidarisés : on parle de 'mauvais harpage'. Enfin, il arrive aussi que des fissures témoignent de brusques variations des sollicitations structurelles ou de déformations liées à la dilatation naturelle des matériaux mis en œuvre.

5.1.1.1 Action des planchers

La poussée horizontale d'un plancher peut conduire à une désolidarisation progressive des deux parements d'un mur s'ils sont liés par un nombre insuffisant de boutisses. A terme, la face extérieure finit par s'écrouler.

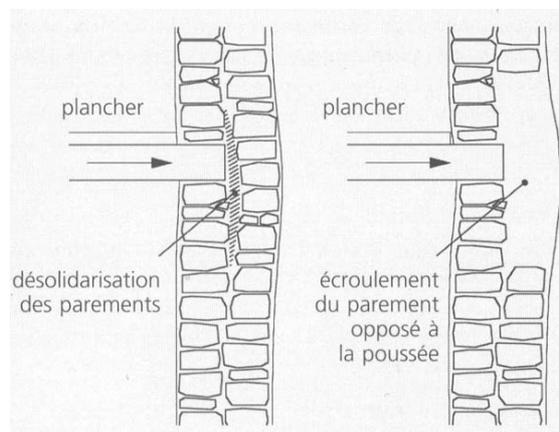


Figure 60 : Bouffement dû aux poussées d'un plancher

[Coignet (2010), p.70]

5.1.1.2 Action des charpentes

Les arbalétriers (ou les chevrons) d'une toiture ont naturellement tendance à exercer sur les têtes de mur une poussée dirigée vers l'extérieur. Si aucun dispositif (des tirants métalliques par exemple) ne reprend cette action, des fissures apparaissent peu à peu en haut des pignons.

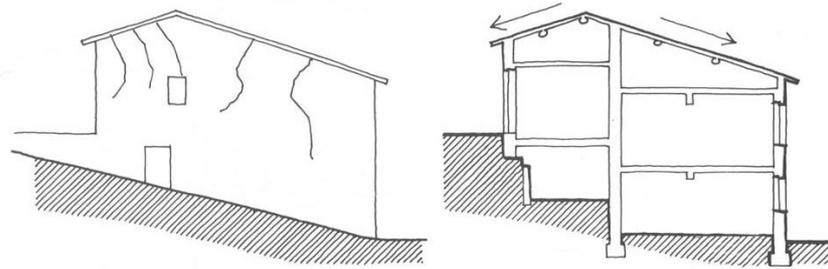


Figure 61 : Fissures dues à l'action d'une charpente
[d'après, Coignet (2010), p.80]

5.1.1.3 Mauvais harpage

Un autre type de fissures caractéristiques est celui dû à une mauvaise interpénétration des pierres entre elles. Ceci s'observe, en particulier, près des angles si les harpages ou les chaînages internes sont déficients ou inexistant. On parle de 'fissures en coups de sabre'

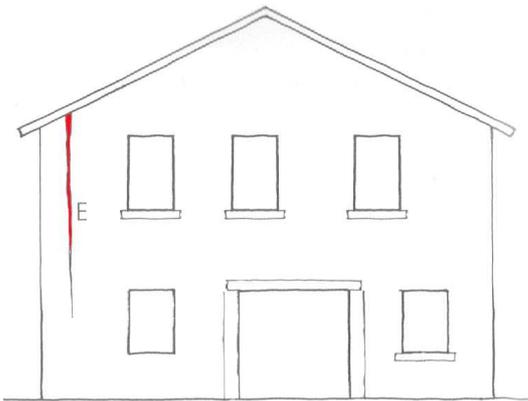


Figure 62 : Fissure due à un mauvais harpage
des murs à angle droit
[d'après Coignet (2010), p.80]

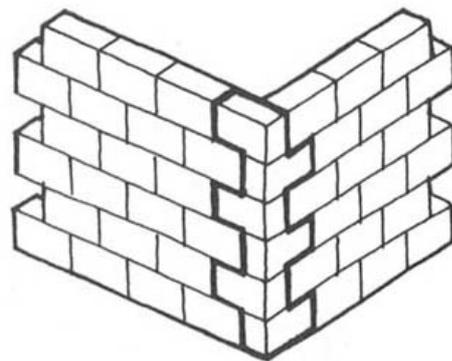


Figure 63 : Chaîne d'angle appareillée en harpage
[Coignet (2010), p.50]

La première illustration ci-dessus représente une dissociation progressive entre le mur latéral gauche et le mur de façade.

5.1.1.4 Variations brutales des contraintes structurelles

La présence d'un joint de rupture est nécessaire lorsque sont juxtaposées des zones traversées par des descentes de charge contrastées, sinon il n'est pas rare qu'une fissure se substitue au joint manquant.

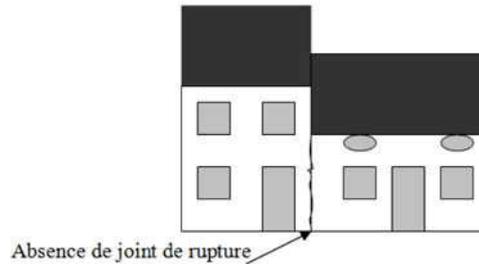


Figure 64 : Fissure due à l'absence d'un joint de rupture
[Bajeux (2013a), chap.14, p.6]

5.1.1.5 Déformations liées à la dilatation

La présence de joints de dilatation est indispensable lorsqu'un bâtiment atteint une échelle telle que les écarts de température induisent des dilatations non négligeables. Comme nous l'avons remarqué au paragraphe précédent, il n'est pas rare qu'une fissure apparaisse à l'endroit où aurait dû se trouver un joint qui a été omis.

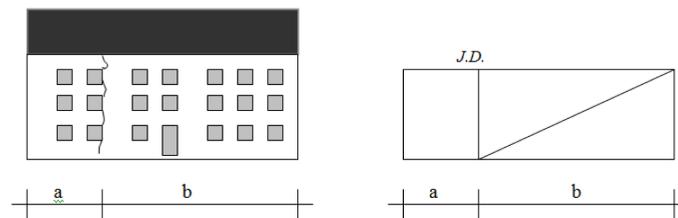


Figure 65 : Fissure due à l'absence d'un joint de dilatation
[Bajeux (2013a), chap.14, p.6]

5.1.2 Fissures dues au sol

Nous évoquerons les fissures dues aux tassements et aux glissements de terrain.

5.1.2.1 Tassements

Dans le cas de tassements assez importants, le rééquilibrage des tensions se traduit par la naissance de fissures. Ces fissures sont généralement perpendiculaires aux efforts de traction. On parle de 'tassements différentiels'.

A l'angle d'un mur

Lorsque le tassement à l'angle d'un mur conduit à une fissure, celle-ci est généralement plus large en haut qu'en bas car elle s'accompagne d'un mouvement de rotation dont le centre est au niveau du sol.

Cas n°1 : le tassement est très ponctuel ($L/h < 1/2$). La fissure coupe généralement le bord vertical du mur.

Cas n°2 : le tassement concerne une partie un peu plus large ($L/h = \text{env. } 1/2$). La fissure tend à former un angle de 45° avec l'horizontale.

Cas n°3 : le tassement se produit sur une grande longueur ($L/h > 1/2$). La fissure principale est souvent légèrement inclinée dans la direction opposée au lieu du tassement.

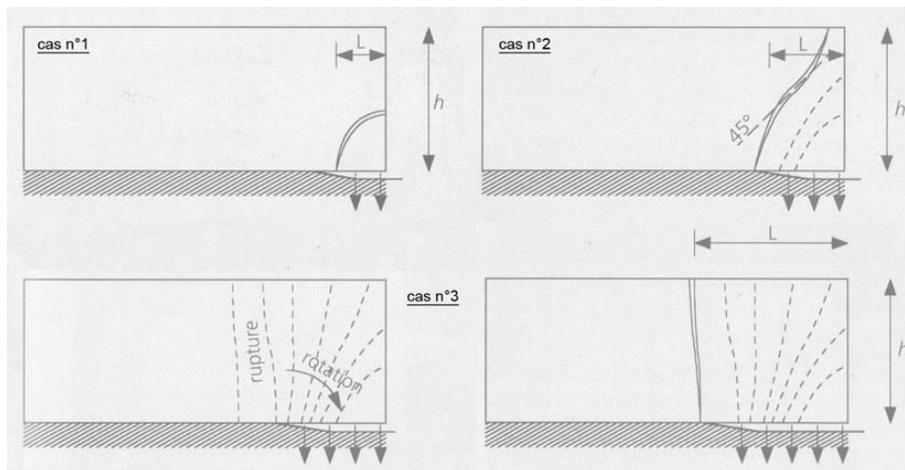


Figure 66 : Tassement à l'extrémité d'un mur
[d'après Coignet (2010), p.67]

Au milieu d'un mur

Si le tassement se produit au milieu du mur, on peut observer trois cas (qui correspondent à un élargissement progressif de la zone concernée).

Cas n°1 : on observe une fissure qui est liée à la formation d'un arc de décharge.

Cas n°2 : il apparaît des fissures qui forment un V renversé.

Cas n°3 : la section de mur comprise entre les fissures tend à se désolidariser sur toute sa hauteur.

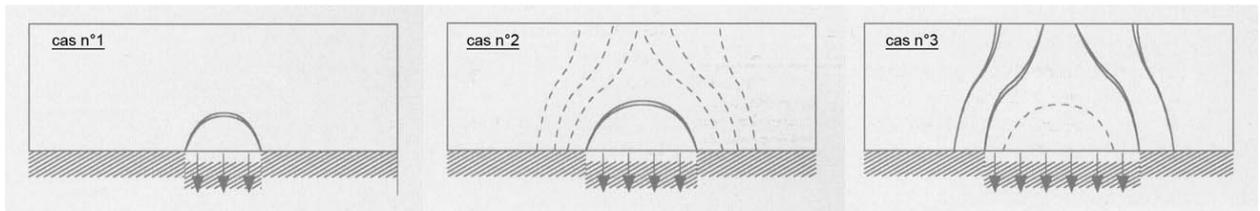


Figure 67 : Tassement au milieu d'un mur
[d'après Coignet (2010), p.67]

Sous un trumeau

Dans l'architecture classique, les fenêtres sont souvent alignées verticalement.

Elles sont séparées par des trumeaux superposés qui forment une structure que l'on peut comparer, en schématisant, à une sorte de colonne.

Si les fondations et les chaînages horizontaux (au niveau des planchers ou des linteaux) sont insuffisants ou affaiblis, le sol au contact de ces piles verticales de trumeaux va avoir tendance à se tasser.

Ce phénomène est moins fort si l'immeuble possède un sous-sol car la hauteur du mur enterré contribue à répartir plus régulièrement les charges vers les fondations.

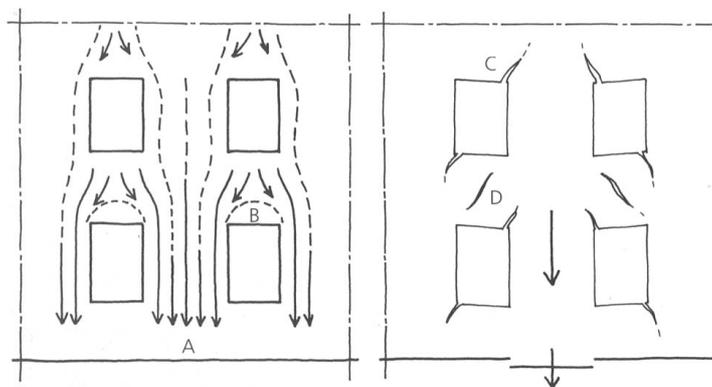


Figure 68 : Tassement sous un trumeau
[Coignet (2010), p.48]

5.1.2.2 Glissements de terrain

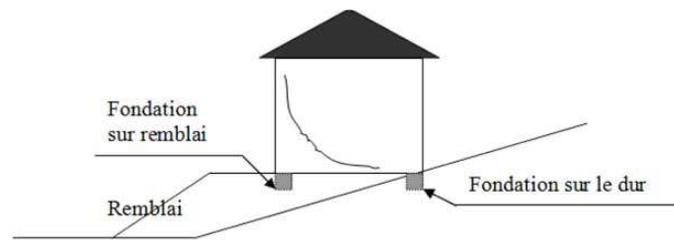


Figure 69 : Fissure due à un glissement de terrain

[Bajeux (2013a), chap.14, p.5]

En cas de glissement progressif du terrain, les fissures ont généralement une largeur plus importante en bas qu'en haut. Elles prennent la forme d'un arc qui témoigne de la dissociation croissante du pan de mur qui est porté par la fondation défaillante.

5.2 MESURE

Les fissures sont mesurées en utilisant des outils variés, des plus sommaires aux plus perfectionnés : fissuromètres, témoins, jauges, capteurs...

5.2.1 Fissuromètres

La méthode la plus évidente consiste à mesurer manuellement l'évolution de la fissure avec des instruments tels que des réglettes graduées ou des fissuromètres. La précision des résultats est de l'ordre du dixième de millimètre.

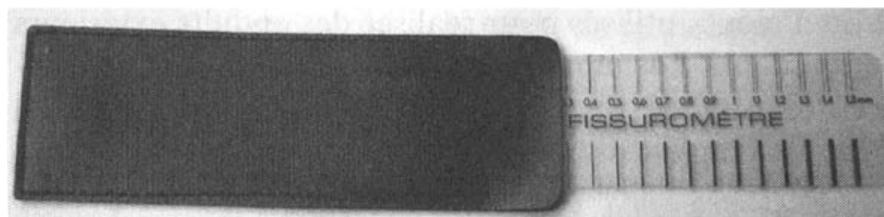


Figure 70 : Exemple de fissuromètre

[Virolleaud (2011), p.301]

5.2.2 Témoins

Ces témoins prennent la forme de 'patins' en plâtre ou en mortier (constitué de plâtre et de chaux) qui chevauchent l'axe de la fissure. Ils sont datés, ce qui permet de mettre en évidence un éventuel élargissement de la fissure et de définir la direction des mouvements de dissociation au sein de la structure défaillante : déplacements latéraux, verticaux, obliques ...

Il s'agit, cependant, d'une méthode sommaire qui ne fournit que des informations restreintes.



Figure 71 : Exemples de patins de plâtre chevauchant des fissures
[Bajeux (2013a), chap.14, p.9]

5.2.3 Jauges

Les deux éléments constituant la jauge sont fixés de part et d'autre de la fissure. La jauge 'Saugnac' est assez répandue. La précision des résultats est de l'ordre du dixième de millimètre.

Certains modèles, comme la jauge G3, permettent aussi de mesurer un désaffleurement, c'est-à-dire le décalage de niveau ou de nu entre deux pans de mur contigus.

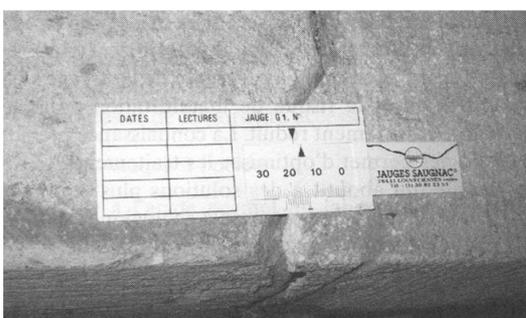


Figure 72 : Jauge Saugnac type G1
[Virolleaud (2011), p.475]



Figure 73 : Jauge Saugnac type G3
[<http://www.saugnac-jauges.fr/documentation-jauge-G3.php>]

5.2.4 Capteurs

Ces dispositifs présentent deux avantages.

D'une part, ils permettent de faire en continu des enregistrements de données, grâce à leur autonomie énergétique.

D'autre part, ils peuvent aussi mesurer des paramètres tels que l'humidité et la température, ce qui permet de ne pas confondre les fissures d'origine structurelle et les fissures d'origine thermo-hygrométrique.

La récolte des données se fait soit par transferts périodiques (espacés de quelques semaines ou mois) vers un ordinateur, soit par transmissions radio.



Figure 74 : Fissuro-thermo-Logger ® F10TN (proposé par la société SITES)
[source : http://sitessa.bao.stockho.com/Images/Upload/doc_pj/fic_f10tn_v03fr.pdf]

L'exemple d'appareil que nous présentons ci-dessus n'a pas de câble et son autonomie s'étend sur une année. Il enregistre simultanément l'ouverture de la fissure et la température ambiante. Les données enregistrées sont collectées en branchant un ordinateur portable sur le capteur.

Dans le graphe ci-après, l'ouverture initiale de la fissure correspond arbitrairement au niveau 0. Mais l'ouverture minimale de la fissure est inférieure à ce seuil, ce qui explique l'obtention de mesures négatives.

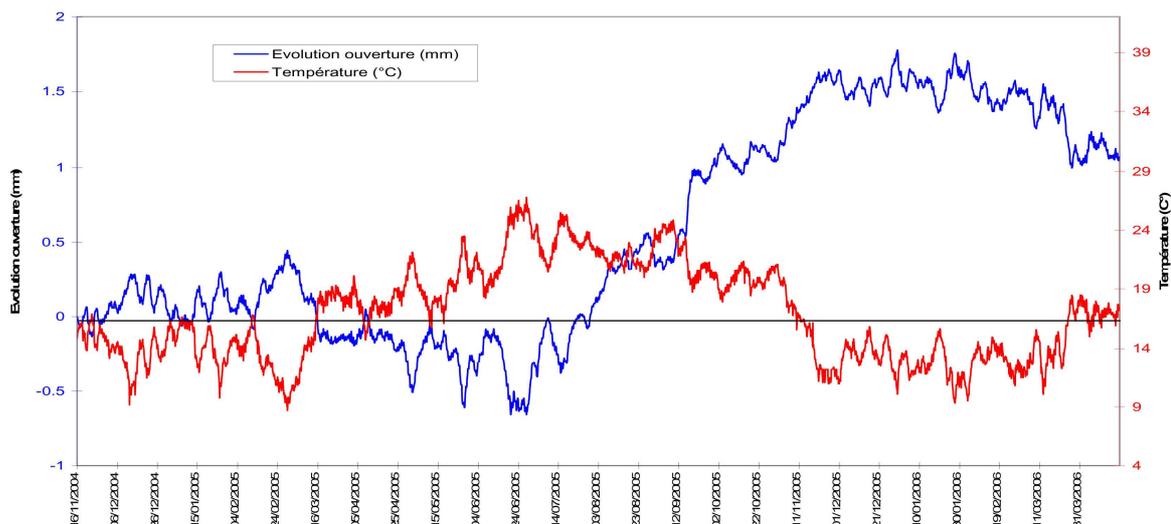


Figure 75 : Exemple de graphe obtenu à partir du logiciel de collecte des données
(proposé par la société SITES)

[source : http://sitessa.bao.stockho.com/Images/Upload/fic_f10tn_v05fr.pdf]

On sait que, généralement, l'ouverture des fissures est inversement proportionnelle à la température. Sous l'action de la chaleur, les matériaux se dilatent, ce qui tend à resserrer les fissures en été.

On observe en effet ce phénomène sur le graphe. Mais le graphe permet de neutraliser l'impact de la température en faisant des comparaisons adéquates. Il s'agit de trouver un point du calendrier où la température a été presque identique d'une année sur l'autre. Le mois de février peut convenir : le 4 février 2005 et le 19 février 2006, la température était approximativement de 14°C à l'endroit où ont été réalisées les mesures (notons que cet endroit n'était probablement pas situé à l'extérieur).

On observe l'augmentation suivante :

4 février 2005 : fissure proche de 0,1mm

19 février 2006 : fissure proche de 1,4mm

On peut donc émettre l'hypothèse que la fissure tend à s'élargir année après année. Avant de tirer une conclusion définitive, il faudrait néanmoins savoir, entre autres, si le taux d'humidité était identique en février 2005 et en février 2006. Rappelons, en effet, que les matériaux de construction gonflent lorsque le taux d'humidité est élevé et se rétractent lorsque le temps est sec.

5.3 ACTIONS

Nous distinguerons les techniques selon qu'elles concernent les superstructures (c'est-à-dire les parties du mur situées au-dessus du sol) ou les infrastructures (c'est-à-dire les parties du mur situées sous le sol).

5.3.1 Interventions en superstructure

Le renforcement structurel peut être réalisé, par exemple, en utilisant une ou plusieurs des techniques suivantes : remplacement de pierres en voie de désagrégation, injection de mortiers ou de résines, ajout d'un tirant, insertion de tiges métalliques ou composites...

5.3.1.1 Remplacement de pierres

Lorsque la pierre est atteinte au cœur, il est préférable qu'elle soit totalement remplacée (on parle de 'relance de blocs' ou de 'relancis'). Les caractéristiques de la nouvelle pierre doivent, si possible, être identiques à celles des pierres avoisinantes (notamment la teinte, la porosité et la granulométrie). Dans le cas contraire, l'action des agents extérieurs (intempéries, dépôts divers, microorganismes) induira peu à peu une différence d'aspect.

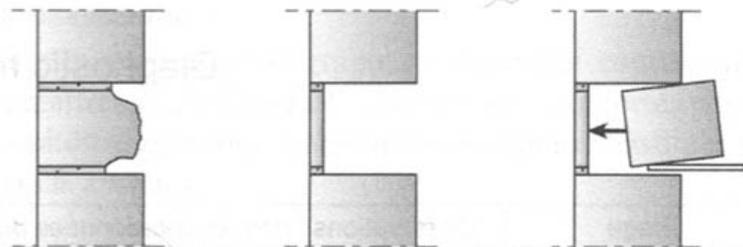


Figure 76 : Remplacement d'une pierre

[Virolleaud (2011), p.454]

5.3.1.2 Injections

Cette méthode concerne les murs en pierre qui sont constitués de deux parements enserrant une masse de matériaux divers appelée 'blocage'.

Les injections ont pour objectif de consolider le blocage mais cela ne doit pas aboutir à créer des points durs qui risqueraient de déséquilibrer les parties saines attenantes. La composition chimique des injections doit donc être savamment dosée.

L'exécution se fait en plusieurs passes. On divise le mur en tranches horizontales et on commence par celle du bas puis on remonte. Pour chacune des tranches, le processus est le

même : rejointoiement préalable (pour éviter que le coulis ne ressorte du mur), injections sous faible pression.

Il faut distinguer deux cas :

1^{er} cas : blocage initial aggloméré par un mortier de chaux et de sable

Au Moyen Age, c'est la méthode qui était retenue pour les édifices assez prestigieux (châteaux, cathédrales...).

Dans ce cas, il convient de faire des injections à base de chaux hydraulique naturelle et de sable. La composition des injections devra être aussi proche que possible de celle du mortier initial.

2^{ème} cas : blocage initial constitué de terre malaxée, de cailloux et de sable

Cette méthode était très répandue pour les monuments réalisés avec de faibles moyens.

Dans ce cas, les injections sont généralement réalisées avec des coulis à base de résine ou de bentonite (qui est une argile colloïdale).

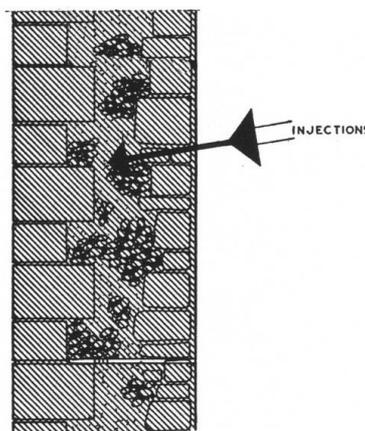


Figure 77 : Injection de coulis
[d'après Duval (1990), p.49]

5.3.1.3 Pose de tirants ou d'ancrages

L'objectif est généralement de contrebuter des poussées horizontales ou des flambements.

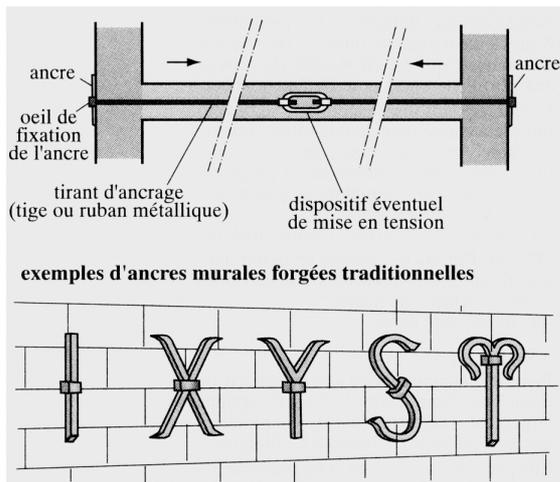


Figure 78 : Ancrage de deux murs parallèles
[De Vigan (2003), p.72]

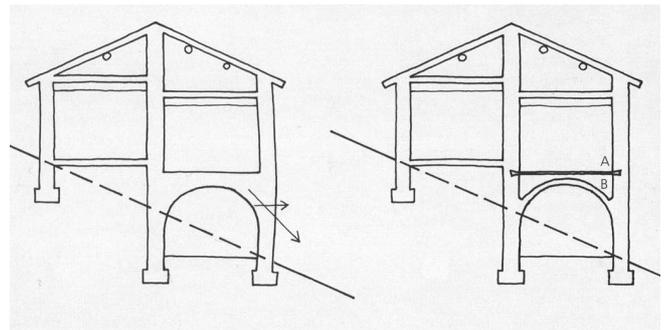


Figure 79 : Mise en place de tirants (A) ancrés dans les murs conjointement avec un allègement des planchers par substitution de béton en vermiculite (B)
[d'après Coignet (2010), p.93]

5.3.1.4 Insertions de tiges métalliques ou composites

L'objectif est de consolider un mur sans procéder à un remplacement des pierres fissurées. Ces remplacements sont en effet très coûteux.

La méthode est la suivante :

- forage de trous de 30 mm de diamètre
- mise en place d'armatures de 20 mm de diamètre
- injection d'un coulis dans l'espace vacant entre l'armature et le trou, afin de solidariser les divers morceaux de pierres fissurées.
- ragréage en surface (après consolidation) au droit des trous pour les dissimuler

Plusieurs procédés coexistent :

- le bureau d'études Renofors a mis au point le système 'Béta'. Les armatures sont en fibres de verre et le coulis en résine.
- la société Fondelile utilise des barres d'acier inoxydable nervuré à haute limite d'élasticité.

Afin de renforcer leur efficacité, les armatures peuvent être précontraintes. Cela suppose que les armatures soient traversantes et que l'on puisse installer à leurs deux extrémités des ancrages

De plus en plus souvent, les composants métalliques sont remplacés par des équivalents en matière composite qui ont une meilleure résistance à l'humidité.

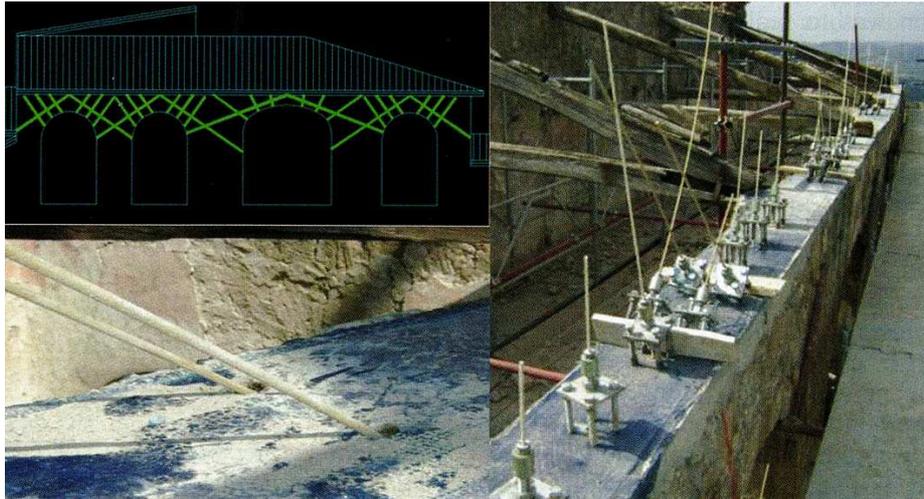


Figure 80 : Renforcement avec des barres précontraintes en fibres de verre

Lieu : Monastère de la Sainte Trinité à Orvieto

[Agnéloni (2011), p.274]

Le brochage est une version simplifiée de la méthode décrite ci-dessus. Elle s'applique à une pierre isolée et vise à rassembler ses fragments.



Figure 81 : Opération de brochage en cours

[Vincent Foussard]

Un procédé plus rustique consiste à insérer, de part et d'autre d'une fissure verticale, des agrafes de solidarisation qui agissent comme des 'coutures'. Chacune d'elles est généralement constituée d'un fer à béton inoxydable recourbé en U. Sur la face intérieure du mur, les deux branches du U sont insérées dans des trous faits à la perceuse (trous situés à environ 30 cm de l'axe de la fissure). Le scellement est réalisé avec un mortier sans retrait (type 'Clavex').

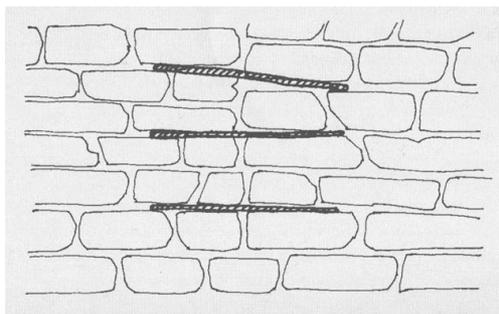


Figure 82 : Réduction d'un 'coup de sabre'
par des agrafes en fer à béton pliées en forme de U
[Coignet (2010), p.104]

5.3.2 Interventions en infrastructure

L'objet de ce paragraphe est de présenter différents procédés pour renforcer des fondations défectueuses.

Nous n'évoquerons que brièvement ces techniques car elles s'éloignent un peu de notre thème d'étude et font partie, plus spécifiquement, du domaine de la géotechnique.

5.3.2.1 Modification d'une semelle de fondation

Après avoir calculé la descente des charges et la résistance du sol support, il peut apparaître que la fondation existante est sous-dimensionnée. Quelle que soit la méthode retenue pour corriger ce défaut, les excavations ne devront pas atteindre un niveau inférieur à celui de la semelle existante afin qu'aucune décompression du sol-support ne puisse se produire. Les superstructures doivent, par ailleurs, être étayées et il faut veiller à ce que les fouilles soient hors d'eau pendant toute l'opération.

5.3.2.1.1 Remplacement d'une semelle de fondation

La semelle existante est démolie et remplacée section par section. Des ferraillements en saillie sont laissés en attente. Les sections successives sont courtes et le phasage doit, si possible, veiller à ce que deux sections contigües ne soient pas réalisées de façon trop rapprochée dans le temps (on parle d'une méthode en 'touches de piano').

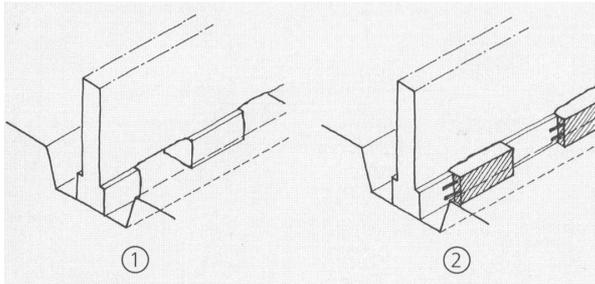


Figure 83 : Remplacement complet d'une semelle
[Coignet (2010), p.95]

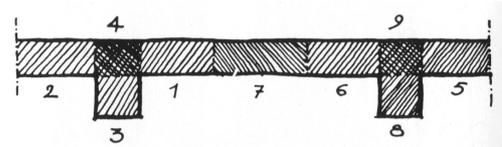


Figure 84 : Phasage d'un remplacement complet
[d'après Froidevaux (1986), p.158]

5.3.2.1.2 Elargissement d'une semelle de fondation

Il est ajouté, de part et d'autre de la fondation conservée, deux demi-semelles distinctes en béton armé. Leur liaisonnement est réalisé par des sortes de boutisses qui peuvent être mises en œuvre de deux manières :

- à travers de courts percements réalisés dans la fondation existante (méthode 1)
- à travers de courts percements réalisés dans le mur que porte la fondation (méthode 2)

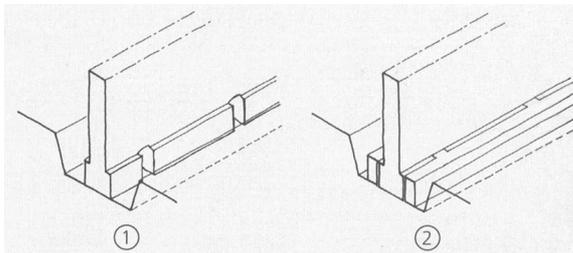


Figure 85 : Elargissement d'une semelle : méthode 1
[Coignet (2010), p.94]

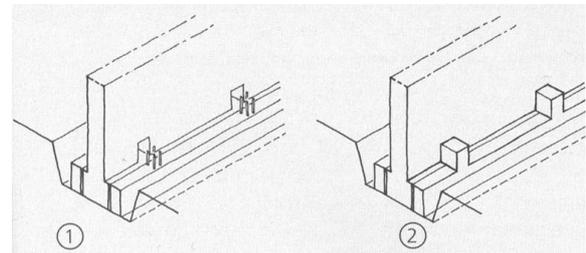


Figure 86 : Elargissement d'une semelle : méthode 2
[Coignet (2010), p.95]

5.3.2.2 Puits et pieux

Ces techniques sont proposées lorsqu'il est possible d'atteindre un sol qui présente une résistance suffisante et qui n'est pas trop éloigné des fondations existantes.

Deux méthodes sont à distinguer :

1^{er} cas : reprise par 'puits'

Après l'installation d'étais provisoires et la réalisation d'une excavation, on crée un 'puits' en béton (ou en grosse maçonnerie) entre le bon sol et les éléments porteurs principaux. Ces

puits sont reliés entre eux par des arcs en moellons ou des longrines en béton armé afin de supporter les maçonneries intermédiaires en superstructure.

Cette méthode est généralement proscrite en terrain aquifère ou en sol tourbeux car elle ne peut être mise en œuvre en présence d'eau.

2^{ème} cas : reprise par pieux

Cela consiste à forer des pieux de part et d'autre du mur et à relier les têtes par des longrines ou par une semelle engravée dans la base des superstructures conservées (voir ci-dessous).

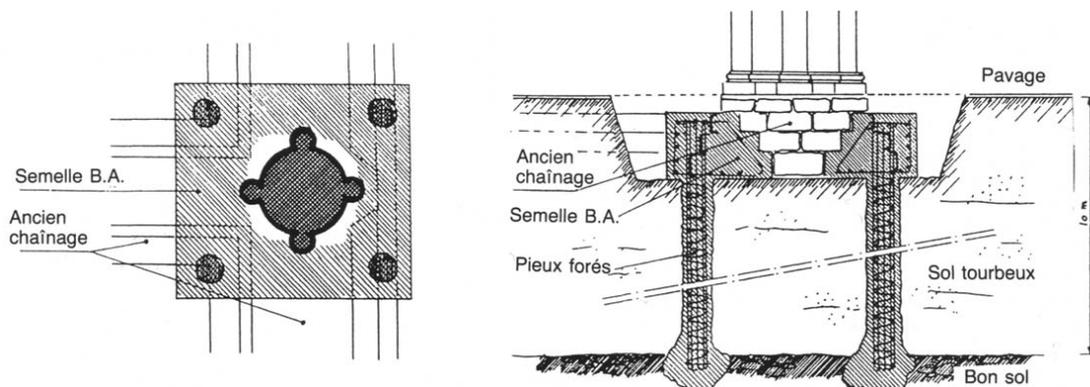


Figure 87 : Consolidation par micro-pieux en béton armé (Eglise de Chambly)

[Froidevaux (1986), p.161]

5.3.2.3 Injections dans le sol

Lorsque le bon sol est trop profond pour être atteint, une alternative peut consister à faire des injections sous la fondation. Néanmoins, la réussite du processus est parfois difficile à évaluer. Plusieurs risques sont à signaler : interruption de la solidarité granulométrique du sol, cisaillement d'une couche géologique...

Deux méthodes sont possibles :

Méthode 1 : cimentation

Elle est appropriée aux sols graveleux ou sableux à gros éléments car elle permet d'ajouter le liant qui transformera en béton le sol sur lequel s'appuie la fondation. Avant injection, il est préférable de ceinturer la zone par des palplanches.

Méthode 2 : silicatation

Le procédé le plus cité est celui dit 'de Joasten' qui peut même être utilisé dans des sols humides. Il est surtout adapté à des sols composés de sables assez fins.

Cette méthode consiste à durcir le sol grâce à la réaction entre deux produits injectés successivement : des silicates alcalins instables et un sel non alcalin. L'ensemble aboutit, en théorie, à la création d'une sorte de grès.

CONCLUSION

Au terme de cette étude, il apparaît qu'une méthodologie pour la conservation des murs anciens en maçonnerie de pierre fait appel à des champs disciplinaires nombreux et entremêlés : géologie, chimie, métrologie, structure ... Cette constatation n'est pas seulement valide pour les bâtiments complexes (type Monuments Historiques) mais aussi pour les maçonneries courantes (bénéficiant d'un budget limité de réhabilitation) autour desquelles nous avons centré nos réflexions.

On voit que les facteurs de dégradation d'une maçonnerie sont nombreux : la phase de diagnostic est donc primordiale.

Le sens de l'observation et l'expérience du maître d'œuvre jouent un rôle crucial.

Mais ce savoir n'est pas suffisant et doit s'appuyer, lorsque le budget le permet, sur deux types de prestations complémentaires afin d'aboutir à des conclusions réellement pertinentes.

D'une part, l'intervention de laboratoires spécialisés doit être intégrée le plus en amont possible, notamment pour l'analyse des échantillons.

D'autre part, il doit être utilisé des appareils de mesure performants (jauges, capteurs). Leur évolution est constante et les professionnels doivent se tenir informés en permanence des progrès techniques dans ce domaine.

L'analyse structurelle des maçonneries anciennes est complexe car beaucoup de données sont inconnues (méthodes de mise en œuvre, présence de tirants métalliques) ou difficiles à évaluer (état des contraintes internes). Les différentes méthodes existantes (calculs sommaires ou modélisations élaborées) sont néanmoins précieuses pour repérer les zones les plus sollicitées. Les approximations obtenues doivent ensuite être confortées par des mesures précises (par exemple, selon la méthode dite de 'relaxation des contraintes').

Comme nous le présentions, les traitements de surface et les renforcements en profondeur sont indissociables : le mauvais entretien des surfaces conduit à des infiltrations qui causent des désordres structurels majeurs (notamment en permettant à des sels de pénétrer en profondeur). Réciproquement, un ravalement s'avère peu durable si des désordres internes naissants ne sont pas traités (fissures structurelles, par exemple).

Le traitement des surfaces fait sans doute l'objet des recherches les plus nombreuses. L'enjeu financier est de taille puisque le ravalement des façades en pierre est obligatoire et constitue un marché considérable. Face aux conséquences parfois désastreuses des traitements antérieurs, l'objectif est de remplacer les techniques agressives par des méthodes douces.

Pour ce qui est des réparations structurelles, on assiste, plutôt qu'à l'irruption de procédés inédits, au perfectionnement de techniques éprouvées. On observe, par exemple, la progression constante, au détriment de l'acier inoxydable, des méthodes utilisant des résines et des matériaux composites. Ces matériaux nouveaux sont principalement façonnés sous forme d'armatures en fibres (de verre ou de carbone) renforcées par des polymères.

BIBLIOGRAPHIE

ABDUNUR C., 1985. Mesure de contraintes sur ouvrages d'art par une méthode de libération miniaturisée. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, numéro 138.

AFNOR (Agence Française de Normalisation), 2008. *NF DTU 20.1 : Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs*. Afnor Editions, Saint-Denis.

AFNOR, 2013. *Eurocode 6 : calcul des ouvrages en maçonnerie*. Afnor Editions, Saint-Denis.

AGNELONI E., CASADEI P., 2011. Case studies on advanced composite materials for civil engineering and architectural applications. *Structural Engineering International*, volume 21, numéro 3, 271-278.

ANAH (Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat), 1984. *Guide du diagnostic des structures*. Ministère de l'Urbanisme et du Logement.

BAJEUX G., 2013a. *Connaissance du bâti ancien, techniques de réhabilitation (cours CCV124)*. Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris.

BAJEUX G., 2013b. *Technologie de la construction (cours CCV113)*. Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris.

BANK L., 2006. *Composites for construction*. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, 551 p.

BROMBLET P., VERGES-BELMIN V., 2000. Le nettoyage de la pierre. *Monumental*, 220-273.

BROMBLET P., VIEWEGER T., 2003. *Le laser de nettoyage de la pierre et la restauration des sculptures*. Laboratoire de recherche des Monuments Historiques, Champs-sur-Marne, 10 p.

COIGNET J., COIGNET L., 2010. *Maçonnerie de pierre*. Eyrolles, Paris, 120 p.

DENFER J., 1891. *Maçonnerie*. Baudry et Cie, Paris, 412 p.

DE VIGAN J., 2003. *Dicobat*. Arcature, Paris, 1177 p.

DUVAL G., 1990. *Restauration et réutilisation des monuments anciens : techniques contemporaines*. Mardaga, Bruxelles, 286 p.

FISCH R., GIEBELER G. et al., 2012. *Rénover le bâti. Maintenance, reconversion, extension*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 277 p.

FROIDEVAUX Y.-M., 1986. *Techniques de l'architecture ancienne*. Mardaga, Bruxelles, 194 p.

GODART B., 1996. Modélisation de la cathédrale de Strasbourg à l'aide du code de calcul aux éléments finis CESAR-LCPC. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, numéro 206 (novembre-décembre), 41-62.

HUREZ M., JURASZEK N. et al., 2009. *Eurocode 6, dimensionner les ouvrages en maçonnerie, guide d'application*. Eyrolles, Paris, 312 p.

LAMBOLEY G., VOINCHET F., 2003. La restauration des voûtes de la caserne Villars (Moulins, Allier). *Monumental*, 155-161.

LAURENT J.-M., 2005. *Pierre de taille*. Eyrolles, Paris, 167 p.

PINÇON G., 1988. *Amélioration acoustique des logements*. CATED (Centre d'Assistance Technique et de Documentation), 176 p.

SOCOTEC (Bureau de contrôle), 2009. Fiche 7.70 : Evaluation de la résistance des maçonneries anciennes. *Guide Socotec de la maintenance et de la réhabilitation*. Le moniteur, Paris, 1200 p.

VERITAS (Bureau de contrôle), 2012. *La technique du bâtiment existant*. Le Moniteur, Paris, 829 p.

VIROLLEAUD F., 2011. *Le ravalement : guide technique, réglementaire et juridique*. Le Moniteur, 652 p.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Essai de classification entre cailloux, moellons et pierres de taille.....	8
Figure 2 : Exemples d'appareils à épaisseur simple.....	9
Figure 3 : Dénomination des pierres selon leur emplacement.....	9
Figure 4 : Deux parements distincts mais proches.....	10
Figure 5 : Parements séparés par un blocage épais.....	10
Figure 6 : Murs avec chaînages verticaux et horizontaux.....	10
Figure 7 : Deux types de montages en délit.....	15
Figure 8 : Auscultation sonore appliquée à un bloc de béton.....	16
Figure 9 : Dénomination des joints.....	18
Figure 10 : Typologie des joints.....	19
Figure 11 : Exemples de joints de hourdage.....	19
Figure 12 : Cycle de la chaux.....	22
Figure 13 : Schéma de l'assemblage de deux tirants.....	25
Figure 14 : Assemblage de deux tirants.....	25
Figure 15 : Ferrosan Hilti PS 200.....	25
Figure 16 : Utilisation du 'Ferrosan'.....	25
Figure 17 : Origines de l'eau agissant sur un mur en pierre.....	27
Figure 18 : Méthode dite 'de la pipe Karsten'.....	29
Figure 19 : Dispositif de mesure de la capillarité pour trois échantillons de pierre.....	30
Figure 20 : Exemple d'image obtenue par thermographie.....	32
Figure 21 : Ustensiles requis par la méthode dite de la 'bombe à carbure'.....	32
Figure 22 : Résistance d'une maçonnerie à la pluie selon la nature des pierres.....	34
Figure 23 : Protection par bandes de zinc.....	37
Figure 24 : Relevé vertical en zinc.....	37
Figure 25 : Protection d'une saillie par bandes de zinc.....	37
Figure 26 : Pose de bandes de plomb sur un balcon.....	38
Figure 27 : Protection en plomb d'un balcon.....	38
Figure 28 : Exemple de remontées capillaires.....	38
Figure 29 : Exemple de drain près d'une fondation.....	39
Figure 30 : Coupure de capillarité.....	40
Figure 31 : Insertion d'une coupure de capillarité.....	40
Figure 32 : Injection de résine après percement de trous.....	40

Figure 33 : Exemples de siphons atmosphériques	41
Figure 34 : Série de siphons atmosphériques	41
Figure 35 : Formation du sulfin sur des pierres calcaires	43
Figure 36 : Coupe schématisant une désquamation	44
Figure 37 : Photographie de désquamation	44
Figure 38 : Processus d'alvéolisation.....	45
Figure 39 : Alvéolisation de pierres calcaires	45
Figure 40 : Chaînage métallique corrodé ayant fait éclater une façade	46
Figure 41 : Exemples de résidus en bois insérés dans la maçonnerie	47
Figure 42 : Brossage d'une façade en pierre	50
Figure 43 : Procédé Thomann-Hanry (photo 1)	54
Figure 44 : Procédé Thomann-Hanry (photo 2)	54
Figure 45 : Appareil à cuve pour l'hydrogommage	55
Figure 46 : Mise en œuvre de l'hydrogommage	55
Figure 47 : Echelle du pH	56
Figure 48 : Utilisation d'un laser à rayon ponctuel	57
Figure 49 : Aire de travail nécessaire à l'emploi du laser	57
Figure 50 : Exemples de rejointoiement	60
Figure 51 : Exemple de moulure reconstituée.....	61
Figure 52 : Réparation d'une corniche	61
Figure 53 : Implantation d'un placage	62
Figure 54 : Mise en place d'une agrafe métallique	62
Figure 55 : Méthode de la libération des contraintes par sciage	65
Figure 56 : Vue en plan d'un mur appareillé	73
Figure 57 : Modélisation de deux travées de la cathédrale de Strasbourg	79
Figure 58 : Plan et coupe d'une voûte de la caserne Villars	81
Figure 59 : Typologie des 'fissures'	82
Figure 60 : Bouffement dû aux poussées d'un plancher	83
Figure 61 : Fissures dues à l'action d'une charpente	84
Figure 62 : Fissure due à un mauvais harpage	84
Figure 63 : Chaîne d'angle appareillée en harpage	84
Figure 64 : Fissure due à l'absence d'un joint de rupture	85
Figure 65 : Fissure due à l'absence d'un joint de dilatation.....	85
Figure 66 : Tassement à l'extrémité d'un mur	86

Figure 67 : Tassement au milieu d'un mur	87
Figure 68 : Tassement sous un trumeau	87
Figure 69 : Fissure due à un glissement de terrain	88
Figure 70 : Exemple de fissuromètre	88
Figure 71 : Exemples de patins de plâtre chevauchant des fissures.....	89
Figure 72 : Jauge Saugnac type G1	89
Figure 73 : Jauge Saugnac type G3	89
Figure 74 : Fissuro-thermo-Logger ® F10TN (proposé par la société SITES)	90
Figure 75 : Exemple de graphe obtenu à partir du logiciel de collecte des données	91
Figure 76 : Remplacement d'une pierre	92
Figure 77 : Injection de coulis.....	93
Figure 78 : Ancrage de deux murs parallèles	94
Figure 79 : Mise en place de tirants (A) ancrés dans les murs.....	94
Figure 80 : Renforcement avec des barres précontraintes en fibres de verre.....	95
Figure 81 : Opération de brochage en cours.....	95
Figure 82 : Réduction d'un 'coup de sabre'	96
Figure 83 : Remplacement complet d'une semelle	97
Figure 84 : Phasage d'un remplacement complet	97
Figure 85 : Elargissement d'une semelle : méthode 1	97
Figure 86 : Elargissement d'une semelle : méthode 2	97
Figure 87 : Consolidation par micro-pieux en béton armé (Eglise de Chambly).....	98

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Dureté (classification générale)	14
Tableau II : Dureté des calcaires	14
Tableau III : Résistance à la compression et à la traction	16
Tableau IV : Caractéristiques principales des pierres calcaires	17
Tableau V : Composition des mortiers traditionnels selon l’Eurocode 6	20
Tableau VI : Caractéristiques comparées des liants selon Louis Vicat.....	21
Tableau VII : Résistance à l’écrasement de différents mortiers anciens.....	24
Tableau VIII : Coefficients de capillarité.....	30
Tableau IX : Prescriptions générales concernant le gel	35
Tableau X : Action d’un hydrofuge sur la capillarité et l’absorption d’eau	36
Tableau XI : Action d’un hydrofuge du point de vue de l’indice ITV.....	36
Tableau XII : Règle du ‘un dixième’	67
Tableau XIII : Minoration de la capacité portante en fonction de l’élancement.	69
Tableau XIV : Coefficient γ_M associé à la maçonnerie.....	72
Tableau XV : Comparaison des trois méthodes pour la roche dure de Saint-Maximin.....	75
Tableau XVI : Comparaison des trois méthodes pour la roche ferme de Saint-Maximin	77

RESUME

L'étude d'un mur en maçonnerie ancienne de pierre implique de suivre une méthode abordant successivement ou conjointement : la composition du mur (type de pierres, nature des joints, présence de métal), le rôle destructeur de certains agents extérieurs (eau et sels notamment), la conservation des parements (dans le cadre des ravalements) et enfin la pérennité des capacités structurelles.

Pour chacun de ces thèmes, la méthodologie suit généralement une progression similaire : observation, quantification, action.

L'observation est menée par le maître d'œuvre secondé, si possible, par des laboratoires spécialisés qui prélèvent et analysent des échantillons.

La quantification s'appuie sur des appareils de mesure (jauges, capteurs) et sur la modélisation des structures (visant, notamment, à une évaluation des capacités porteuses).

Les actions font appel à des disciplines scientifiques variées (chimie, résistance des matériaux, géotechnique...) et doivent tenir compte des innovations constantes dans ces domaines.

Mots-clés : mur, maçonnerie, pierre, méthodologie, ancien, conservation, ravalement.

SUMMARY

The study of an old stonework wall requires the use of a method that either successively or simultaneously examines: the composition of the wall (type of stones, nature of joints, presence of metal), the destructive role of certain external agents (water and salts in particular), the conservation of facings (within the scope of renovation works) and finally the durability of the structural capacities.

For each of these subjects, the methodology generally follows a similar pattern: observation, quantification, action.

Observation is carried out by the project manager, assisted, if possible, by specialist laboratories that take samples and analyse them.

Quantification is based on the use of measuring equipment (gauges, sensors) and the modelling of structures (in particular with a view to obtaining an evaluation of load-bearing capacities).

Actions involve calling upon various scientific disciplines (chemistry, resistance of materials, geotechnics, etc...) and must take into account the constant innovations taking place in these fields.

Keywords: wall, masonry, stone, methodology, old, conservation, renovation.