



## Outil 9

Les techniques de réhabilitation : consolider les matériaux

## Intervenir sur les enduits : consolider, restaurer ou remplacer

Patrice MOROT-SIR  
Ingénieur  
Directeur technique de l'École d'Avignon, France

L'intervention sur la façade oblige à répondre à de multiples questions. L'inventaire qui suit a pour objectif de lister ces différents points afin de constituer un guide avant travaux. Dans tous les cas, il est nécessaire de bâtir un projet de ravalement, basé sur trois étapes essentielles :

- ▶ l'état des lieux,
- ▶ le choix du ravalement
- ▶ le cahier des charges d'intervention

La mise en place d'un projet d'intervention, la mobilisation d'un architecte permet de couvrir l'ensemble de ces points, sa présence est d'autant plus importantes si des travaux de modifications et d'adaptations du bâti sont prévus.

### L'état des lieux

Le ravalement est une opération qui vise deux objectifs :

- ▶ La **présentation du bâti** ; la façade représente la face vue de la maison et détermine l'ambition de ces propriétaires.
- ▶ La **protection des ouvrages** ; l'enduit, la peinture protègent le mur de la pénétration de l'eau...

L'état des lieux doit donc répondre à ces deux aspects.

#### 1. La présentation des parements :

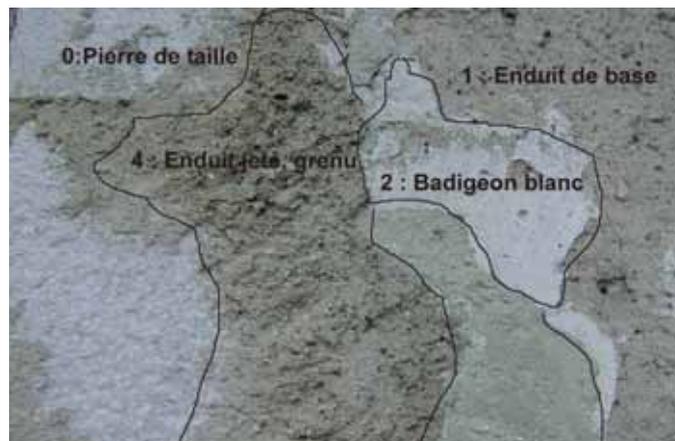
→ Quel bâti ? Quelles modifications ?

À partir de données descriptives il est nécessaire de déterminer le type de bâti que l'on souhaite ravalement :

Par ailleurs ce bâti a certainement fait l'objet de modifications, il est nécessaire ici de les déterminer, et de les évaluer au regard de l'esprit du projet de ravalement souhaité. Il s'agit ici de déterminer les caractéristiques de la maison, les traits qui en font son identité, son histoire (si le bâti ne présente pas de traces significatives, observer les bâtiments aux alentours).

Il faut ensuite les compléter, par les caractéristiques propres du parement de la ou des façades qui font l'objet des travaux :

→ Quel enduit ? Quelle couleur ? Quel badigeon ?



L'observation permet ici de découvrir des traces d'enduits anciens : sous une couche d'enduit jeté au parement grenu on découvre deux sous couches peintes en blanc, ce traitement peint est celui d'une couche de finition.

#### 2. La protection des parements :

→ Quels désordres ? Quels matériaux ? Quelles pathologies ?

Avant de programmer les travaux, il convient de diagnostiquer l'état des façades. Dans le cas d'une réhabilitation totale de l'immeuble, un diagnostic technique de l'ensemble de la construction est préalablement établi. Dans le cas d'un simple ravalement, on s'attachera à examiner les désordres apparents et à sonder la maçonnerie afin d'en détecter d'éventuelles faiblesses. Les **lézardes** qui entaillent l'épaisseur du mur ainsi que les effets de ventre (bombement d'un mur par rapport à la verticale), souvent dues à des poussées, des surcharges, des flexions de poutres ou à des tassements différentiels, nécessitent des interventions lourdes préalablement aux travaux de façade. Selon les cas, la structure sera consolidée par une reprise des fondations, ou la mise en oeuvre de chaînages armés, de contreforts ou de tirants.

Les **fissures** doivent être analysées selon leur dynamique, selon leur vitesse d'évolution : la pose de témoins (plâtre, témoins millimétriques) doit être réalisée dès le constat des fissurations. Si ces dernières sont inactives, l'injection d'un coulis de mortier suffira pour colmater. Si les mouvements de maçonnerie se poursuivent, la structure devra être consolidée.

Les **traces d'humidité** et les décollements d'enduit exigent des

travaux pour remédier aux différentes causes possibles : bouchage des fuites de canalisation, décroûtage des enduits trop étanches (au ciment artificiel), drainage des eaux d'infiltration ou de pluie...

Avant de programmer le ravalement, des sondages en différents points de la façade doivent être effectués. Si le mur sonne creux, ce qui témoigne d'un cloquage et d'un décollement de l'enduit, un décroûtage peut s'avérer nécessaire. Dans le cas où les désordres sont dus à des points d'humidité, un décroûtage des parties altérées et des remèdes ponctuels avant ragréage sont suffisants. Dans le cas où ce phénomène serait dû à une mauvaise adhérence de l'enduit au support, en raison d'une évaporation insuffisante de l'eau contenue dans les murs, un décroûtage total de l'enduit est nécessaire. Ce dernier doit être remplacé par un mortier de chaux naturelle, qui a l'avantage de permettre la respiration des murs tout en les imperméa

9



Lézardes qui entaillent l'épaisseur du mur

### Diagnostic préalable

Avant l'engagement des travaux, il est nécessaire de contrôler l'état sanitaire de l'immeuble, on peut retenir les points suivants :

<b>Toitures</b>	Infiltration d'eau par la couverture, abergement de cheminée, raccords murs pignons - toitures.
<b>Zinguerie, canalisations</b>	Gouttières, descentes d'eaux pluviales, évacuation d'eaux usées (encastrement possible ?)
<b>Toitures</b>	Infiltration d'eau par la couverture, abergement de cheminée, raccords murs pignons - toitures.
<b>Murs et maçonneries</b>	Présence de fissures (actives ou non), bouchement des trous, joints, présence de mousse, dégradation de la pierre.
<b>Bas de mur</b>	Collecte des eaux pluviales, revers pavés, joints entre sol et mur, drainage éventuel, réseau souterrains.
<b>Menuiserie</b>	Vérification du calfeutrement des baies
<b>Divers</b>	Protection contre les animaux (rongeurs, pigeons...)
	Encastrement possible des réseaux, courants forts, ligne individuelle et des courants faibles
	Dépose d'éléments inutilisés (console métallique...)

Le mur que l'on souhaite ravalement possède peu être un enduit en bon état général, dans ce cas la réfection totale n'est pas obligatoire, néanmoins il convient de réaliser un diagnostic spécifique :

- ▶ Vérifier la bonne accroche générale de l'enduit sur le support de maçonnerie en le sonnant avec le doigt ou un outil de petite dimension, s'il sonne creux sur une grande surface le piquage et la réfection s'impose, s'il sonne creux par partie localisée, une injection localisée sur ces zones doit permettre d'assurer son accroche.
- ▶ Vérifier la pulvérulence, la cohésion du mortier en frottant la surface avec une forte pression, si les grains de sable roulent sous les doigts il sera nécessaire de piquer et reprendre l'enduit, cela ne concerne peu être qu'une zone localisée, la reprise partielle est alors possible.
- ▶ Vérifier la faible présence des remontées capillaires, à l'extérieures comme à l'intérieure, dans le cas de remontées et si

l'enduit est réalisé avec un liant hydraulique (chaux artificielle, bâtard chaux-ciment) il sera nécessaire de piquer l'enduit jusqu'à la hauteur de ces remontées afin de reprendre cette zone par un mortier de chaux hydraulique naturelle (NHL), une légère sur-épaisseur, ou un traitement différent du parement permet de transformer cette reprise en soubassement.

- ▶ Vérifier la nature du mortier et du traitement de finition, dans le cas de liant fortement hydraulique (chaux artificielle, bâtard chaux-ciment) on préférera un lait de chaux prêt à l'emploi formulé par un industriel ou une peinture minérale (Norme AFNOR FDT 30-808), dans ce cas les teintes choisies devront s'apparenter aux couleurs des badigeons de chaux.

### Le choix du ravalement

Avant de bâtir un projet de réfection complète des ouvrages de la façade, et notamment de l'enduit, il convient de s'interroger sur l'ambition que l'on a pour la maison, sur l'image que l'on donne à travers elle.

Une réfection totale de l'enduit, du badigeon, des menuiseries... peut donner un aspect neuf, trop neuf en désaccord avec le choix qui ont conduit à l'achat de la maison par exemple. Une modeste maison n'exprime son ancienneté, son histoire, qu'à travers l'état dégradé de ces enduits, de ces peintures. Les imperfections du parement, la « patine du temps », sont parfois les seules données qui donnent à la maison le charme des constructions anciennes.

Ainsi l'objectif d'une opération de ravalement doit être de conserver cet aspect ancien, il faut bâtir un projet respectueux de cette idée.. Le ravalement, opération qui se traduit aujourd'hui trop souvent par une réfection totale de l'enduit après dégroutage complet de l'enduit existant, est de fait une opération plus complexe qui doit être envisagée de manière graduelle :

**Intervention de strict entretien :** les ouvrages en place sont en bon état sanitaire :

- ▶ les menuiseries nécessitent une nouvelle couche de peinture,
- ▶ l'enduit possède une bonne accroche mécanique au support, seul le soubassement est dégradé sur quelques dizaines de centimètres de hauteur ; dans ce cas une réfection sur 90cm de hauteur avec un mortier de chaux, dessinant un soubassement, quelques raccords d'enduit, un badigeon de chaux dilué d'uniformisation, permettra de conserver, de consolider l'enduit ancien, ses imperfections.

**Intervention de conservation/restauration :** les ouvrages en place ne sont pas en bon état sanitaire, cependant la qualité esthétique du parement, la nature des ouvrages (cadres solaires, inscriptions...) oblige à une volonté de conservation :

- ▶ les techniques à employer relèvent de la conservation, elles permettent de fixer la patine, l'usure du temps, tout en redonnant aux ouvrages leur rôle de protection, leurs résistances...
- ▶ ces techniques sont mises en œuvre par des spécialistes, le projet peut prévoir une intervention localisée de ce type sans avoir à l'appliquer sur la totalité des parements.

**Intervention de réfection :** Les ouvrages en place ne permettent pas de remplir leur fonction de protection, les enduits sont décollés, les traces d'humidité sont nombreuses... dans ce cas pas d'hésitation il faut refaire les enduits, gérer les causes de l'humidité. En fonction de la localisation des désordres, cette réfection pourra être partielle, limitée par exemple à la hauteur du rez de chaussée ou à la façade la plus dégradée ou totale si l'ensemble de l'enduit est hors d'usage. Cette décision de réfection totale doit être une conséquence du diagnostic et non pas un a priori.

Le choix d'un mortier de chaux (aérienne – CL- ou hydraulique naturelle – NHL- ) s'impose pour les maçonneries anciennes :

Le liant habituellement utilisé pour les mortiers, comme pour les badigeons était la chaux, les chaux devrait-on dire. Ce matériau est particulièrement adapté aux constructions anciennes par ces propriétés mécaniques et physiques :

- ▶ de faible résistance, il permet à l'enduit d'accompagner les mouvements du bâti sans créer de larges fissures, comme les liants très résistants, mais en développant un important réseau de micro-fissuration imperceptible à l'œil et sans conséquence pour son imperméabilité à l'eau.
- ▶ par sa structure poreuse, le mortier de chaux est imperméable à l'eau mais perméable à la vapeur d'eau. Cette propriété va permettre l'évacuation des remontées capillaires, chauffées par le soleil les eaux ascensionnelles vont se transformer en vapeur et s'évacuer du mur, on parle de respiration du mur.

Ces mortiers sont projetés manuellement sur le mur avec la truelle, ils peuvent être projetés également à la Tyrolienne (moustiquette) ou au « sablon », dans ce cas il faut resserrer le parement à la truelle ou à la taloche. Ils peuvent également être appliqués à la machine à projeter, dans ce cas il est nécessaire d'adapter le mortier à l'aide d'adjuvants dont les dosages sont spécifiques aux machines employées et au type de mortier ; il s'agit en général d'entraîneur d'air et de plastifiant (vérifier leur compatibilité avec le mortier de chaux). L'usage de la machine à projeter est plus ou moins intéressant selon la finition à réaliser, bien adapté aux finitions lissées à la truelle ou talochée, le gain de temps est moins

évident pour les enduit jeté puis recoupé à la truelle, il convient de réaliser des essais préalables.

**Le choix du liant**

Le choix du type de ravalement une fois effectué, il faudra alors déterminer le liant. L'observation des paramètres suivants permettra d'affiner ce choix :

*La nature du support*

Murs anciens ou contemporains, moellons de calcaire tendre, mi-fermes ou pierres froides, murs de terre ou de torchis sont autant de matériaux différents qui nécessitent un liant plutôt qu'un autre, pour la réalisation du dégrossis.

*L'environnement du chantier*

Les conditions climatiques, le calendrier de réalisation du chantier, la nature des approvisionnements interviennent dans le choix du liant. La prise en compte de ces facteurs est indispensable lors de la réalisation du corps d'enduit.

*Le résultat souhaité, la finition*

La couche de finition d'un enduit s'effectue toujours aujourd'hui dans un souci d'esthétisme. Sont à considérer entre autres le grain de la texture, la couleur de l'enduit et la présence ou non de modénature.

Le croisement de ces trois éléments doit permettre d'orienter le choix du liant à utiliser.

**A. Observations du support, et gobetis :**

La surface brute, recevant l'enduit, possède des caractéristiques propres d'accroche, de porosité et d'affinité avec l'eau. Celles-ci sont déterminantes dans le choix du liant, servant à la réalisation du gobetis. Dans les tableaux suivants, la mention chaux aérienne réunit les chaux aériennes éteintes pour le bâtiment et les chaux en pâte.

Dans le cas où une chaux aérienne est utilisée, la réalisation d'un enduit à deux couches est possible. La première couche correspond au corps d'enduit et fait environ 10 mm d'épaisseur ; la seconde couche, qui forme la finition, est alors plus fine ; elle peut être appliquée sur la précédente encore fraîche mais ferme (application à mezzo-fresco).

Type de support		Travaux à réaliser	Liant courant
Bâti ancien	Maçonnerie de moellons tendres-mi fermes	Dépoussiérage	Chaux aérienne ou NHL
		Humidification,	
		Gobetis	
	Brique terre cuite	Dépoussiérage	NHL, chaux aérienne
		Humidification abondante	
		Gobetis	
	Pierres froides de petits ou grands appareils	Dépoussiérage	Bâtard NHL+ XHA NHL
		Humidification	
		Salissure	
		Humidification	
		Gobetis	
	Pisé, adobe, bauge	Dépoussiérage	Chaux aérienne
		Humidification (brouillard)	
		Lait de chaux	
		Gobetis/corps d'enduit (enduit réalisé en deux couches)	
	Torchis, pans de bois caché	Dépoussiérage	Chaux aérienne
Humidification (brouillard)			
Lait de chaux			
Grillage			
Gobetis/corps d'enduit			

## B. Environnement du chantier et corps d'enduit ou dressage :

- ▶ Les possibilités d'approvisionnements en chaux peuvent être un facteur de choix obligé.

### ▶ Le climat

Il intervient également dans le choix du liant. En effet, en cas de températures excessives, d'un vent sec important ou de températures très basses il est préférable d'employer une chaux hydraulique naturelle à une chaux aérienne, afin de bénéficier d'une prise plus rapide. Le choix d'une période adéquate (printemps, automne), où la mise en place de protections (filet coupe vent, bâchage...) est susceptible d'inverser ce choix.

### ▶ Le calendrier de chantier

Dans le cas de travaux à réaliser dans un laps de temps court, il est conseillé d'utiliser une chaux hydraulique naturelle à une chaux aérienne (sauf à réaliser un enduit à deux couches et application à mezzo-fresco). En effet, dans des conditions

climatiques normales, le délai de prise entre gobetis, corps d'enduit et finition peut-être divisé par deux. La couche de finition peut, quant à elle, être réalisée avec une chaux aérienne. La prise de la couche de finition se continue une fois l'échafaudage déposé.

## C. Résultat souhaité, couche de finition

La couche de finition a comme rôle principal de mettre en valeur et de présenter le parement du mur. Le résultat final est une combinaison entre :

- ▶ **le grain de l'enduit** : la surface pouvant être très lisse ou à forte aspérité (surface grenue),
- ▶ **la couleur** : celle-ci est obtenue par une peinture à la chaux réalisée a fresco, a secco ou simplement à l'aide de l'agrégat et le liant du mortier,
- ▶ **la modénature** : l'enduit est simplement regravé en faux appareils de pierre ou possède des reliefs importants.

Les couches de finition jetées à la truelle, au balai, doivent être appliquées sur une couche (corps d'enduit ou finition) préalablement resserrée ; en effet, la couche jetée ne peut assurer de fonction d'étanchéité.

La coloration des enduits est réalisée à l'aide du mélange agrégat/liant, ou par une peinture à la chaux.

- ▶ Dans le cas d'une coloration à l'aide d'agrégat, il est important de savoir que les chaux hydrauliques naturelles possèdent une légère coloration (gris-beige parfois légèrement ocrée). Les chaux aériennes, elles, sont beaucoup plus blanches. Les choix d'une chaux plutôt qu'une autre peut mettre ou non l'agrégat en valeur et agit directement sur la couleur de l'enduit. Les chaux très blanches ont tendance à "casser la couleur", mais il n'y a pas de règle arrêtée ; un essai préalable est conseillé.
- ▶ Dans le cas d'une coloration par une peinture à la chaux, son application, à l'aide d'une technique à sec, peut s'effectuer indépendamment sur un enduit réalisé avec une chaux aérienne ou hydraulique naturelle.
- ▶ Dans le cas d'une application à fresque, le liant de la couche de finition doit généralement être une chaux aérienne.

## Constitution d'un cahier des charges

- ▶ Avant toute chose : l'observation  
Etablissement d'un relevé photographique (ensemble des façades traitées, détails encadrement, détails chaîne d'angle, détails passées de toiture et soubassement)

Grain de l'enduit	Nature des travaux	Liant	Observations
Grenu	Rejointoiement	Chaux aérienne ou éventuellement hydraulique naturelle	Le choix d'une chaux hydraulique naturelle peut-être intéressante dans le cas de pierre froides ou de joints vifs.
	Enduit jeté truelle	Chaux aérienne ou hydraulique naturelle	L'aspect, la rugosité de l'enduit est lié essentiellement à la nature de l'agrégat.
Fin	Enduit taloché	Chaux aérienne ou hydraulique naturelle	L'utilisation d'une taloche en bois limite les remontées de laitance.
Très fin	Enduit lissé à la truelle	Chaux aérienne	Faire le choix d'un sable fin. La prise lente permettra de revenir serrer l'enduit.
	Enduit taloché regarni	Chaux aérienne	La pâte de chaux utilisée peut être colorée avec des pigments.

- ▶ Sur le plan de la démarche
  - Contact avec un homme de l'art, architectes, maître d'œuvre.
  - Etablissement d'un projet, relevé, maquette colorée
  - Choix et parti d'intervention
  
- ▶ Sur le plan des ouvrages
  - 1 Dans le cas de modification de baies, respecter les proportions et l'ordonnement général (fenêtre plus haute que la large, dans le cas des grandes baies à rez-de-chaussée, il est nécessaire de réaliser un projet détaillé, avec une mise en situation sur le relevé de la façade).
  - 2 Détermination de la façade principale et élaboration d'un projet où la finition de l'enduit crée une hiérarchie.
  - 3 Enduit de chaux (aérienne ou hydraulique naturelle) finition grenue (jetée-recoupée, jetée), lissée à la truelle, talochée, etc. La coloration est celle du mélange du sable et de la chaux, si elle n'est pas satisfaisante, elle peut être modifiée par un lait de chaux très dilué teinté d'ocre et de terre
  - 4 Le nu de l'enduit se confond avec celui des pierres d'encadrement, si ce n'est pas le cas l'enduit recouvre une partie de la pierre et est recoupé afin de dessiner un chambranle régulier.
  - 5 Le pied de la façade peut être souligné par un soubassement de couleur et/ou de texture différente de l'enduit, cela permet le cas échéant de ne refaire l'enduit que sur la partie ou il est dégradé par les remontées capillaires et les rejaillissements.
  - 6 Les pierres de la chaîne d'angle sont apparentes ou cachées par l'enduit, une fausse chaîne d'angle harpée peut souligner les extrémités de la façade principale.
  - 7 Un badigeon blanc peut être utilisé sur une ou plusieurs façades, il peut être légèrement teinté d'ocre jaune ou de terre de sienne naturelle.
  - 8 Les menuiseries sont peintes, les volets et les portes de couleur à dominante sombre (vert, marron) ou dans une large gamme de couleur grise. Les fenêtres sont de même couleur, plus claire ou dans une large gamme de gris. Le bois apparent est à déconseiller,
  - 9 La serrurerie équipant la baie est peinte dans la même teinte que la menuiserie.

## Traitement de l'humidité dans l'architecture traditionnelle

Soledad GARCÍA MORALES  
Docteur architecte  
Université polytechnique de Madrid, Espagne

### 1. Critères d'intervention dans le cas d'humidité provenant du terrain

Les critères d'intervention pourraient être schématisés de la manière indiquée ci-dessous, ordonnés en fonction de leur degré d'efficacité.

1. Comme critère général, il est souhaitable d'éliminer la cause ou le foyer de présence de l'eau, si c'est possible, comme dans les cas suivants :
  - a. Les avaries dans les systèmes de canalisations municipaux, qui peuvent être confondues avec des problèmes de capillarité. La meilleure intervention est celle qui localise l'avarie et lui apporte une solution.
  - b. Les filtrations des eaux de pluie depuis le trottoir, qui affectent les murs d'enveloppe des bâtiments autour des revêtements. (Fig. 1) Il s'agira dans ce cas de concevoir la jonction entre le trottoir et le bâtiment d'une manière adéquate, en imperméabilisant le trottoir si cela s'avère nécessaire.
  - c. Les poches d'eau « suspendues » dans le terrain, qui se remplissent à l'occasion de pluies intenses, ou d'inondations, etc. et qui, du fait qu'il n'existe aucun drainage, retiennent l'eau pendant très longtemps. La meilleure solution consiste à mettre en place un drainage qui « crèvera » la poche, afin que l'eau ait toujours une sortie et ne soit pas retenue. Remplir la poche de béton n'est en général pas une bonne solution si l'on ne met pas en place parallèlement un drainage qui convient.
2. Dans la plupart des cas, cependant, il n'est pas possible d'éliminer la source de l'humidité parce qu'il s'agit des eaux de pluie, ou de la nappe phréatique, ou encore de l'eau de la strate capillaire. Dans ces derniers cas, il sera souhaitable d'essayer d'éviter le contact de l'eau avec le bâtiment, en traçant parallèlement un parcours pour celle-ci. Il faut insister sur le fait qu'il n'est pas suffisant, en général, de mettre des obstacles ou d'empêcher le contact (effet barrière) sinon qu'il faut se souvenir que l'eau est toujours en mouvement et que le mieux est de concevoir le chemin qu'elle devra suivre pour assurer l'efficacité de la solution.
  - a. Dans le cas de l'humidité provenant d'une strate d'imbibition, alimentée par des pluies plus ou moins proches, le plus souhaitable est de concevoir un parcours pour l'eau



1

(canalisation superficielle, drainage, etc.) qui protège le mur en empêchant le contact prolongé de l'eau avec les fondations ou avec le socle. (Dans les figures 2 et 3, on peut voir la solution qui a été adoptée pour l'évacuation des eaux de pluie qui étaient retenues dans l'atrium de l'église de Santa María de Arévalo [prov. d'Avila, Espagne]. Projet : Isabel García Muñoz et Soledad García Morales.)

En principe, plus l'eau est recueillie et canalisée superficiellement et moins la solution présente de risques, car il est plus facile de cette manière de trouver un point vers lequel la conduire. On peut le faire dans les cas où le bâtiment est situé dans un environnement revêtu et où les pentes peuvent être déterminées de manière claire.

Il est souhaitable que les canaux, ou les lignes d'écoulement, mis en place pour l'évacuation soient situés le plus loin possible de la façade que l'on souhaite protéger. Si le revêtement est construit sur une couche de remplissage ou de terrain très perméable, il faut imperméabiliser le canal pour éviter de possibles filtrations qui finiraient par atteindre le socle ou les fondations. En règle générale, il faut se souvenir que l'eau ne

court pas seulement sur les revêtements mais qu'elle pénètre aussi par les fissures entre les carreaux ou les éléments des socles, et qu'elle poursuit son chemin en dessous de ceux-ci, de telle manière qu'il faut étudier chaque cas.

Lorsque l'on ne peut pas recueillir les eaux de pluie superficiellement (parce que l'on se trouve dans un environnement non revêtu, ou qui l'est seulement partiellement), il faut alors construire un drainage périphérique pour recueillir et conduire l'eau à l'extérieur. Le drainage est en réalité un « lit de rivière souterrain » artificiel, dessiné de telle façon qu'il est très facile pour l'eau de l'emprunter. Cela implique de prendre en considération les points suivants :

- Le drainage doit avoir un point clairement déterminé où il pourra déboucher. La profondeur de raccordement à ce point doit être la condition la plus importante dans le tracé du drain. S'il n'est pas possible de donner une sortie naturelle à l'eau du drainage, on pourra penser à un puits (éloigné du bâtiment et suffisamment important) duquel on pourra extraire l'eau par pompage lorsque cela sera nécessaire. Si cette option n'est pas non plus possible, il est préférable de ne pas faire de drainage.
- Le canal souterrain ou tube de drainage doit avoir une pente de 2 %, au moins. Dans certains cas, on pourra admettre une pente moindre (1 %), mais il faudra alors prévoir le nettoyage périodique du tube de drain, en prévoyant les regards d'eau correspondants.
- Tout drainage proche d'un mur enterré ou de fondations doit être séparé de celui-ci par une plaque imperméable ayant une étanchéité suffisante pour résister à l'eau sous pression. La plaque doit couvrir la totalité du parement enterré, et pas seulement la hauteur du tube de drainage. Si les fondations sont faites de maçonnerie irrégulière, et que l'on ne peut pas les imperméabiliser du fait de leur irrégularité, il convient de séparer le drainage par un mur enterré parallèle à la fondation, et d'imperméabiliser ce dernier.
- Comme l'imperméabilisation d'un mur enterré signifie que l'évaporation de celui-ci est empêchée, dans le cas où il y aurait de l'humidité due à la capillarité en plus des pluies, il sera nécessaire de construire une chambre d'aération indépendante, en plus du drainage (voir le chapitre correspondant à la conception des chambres d'aération).
- La tranchée creusée pour le drainage doit être ensuite remplie d'un agrégat propre (sable et gravier) qui agira comme un filtre afin que l'eau parvienne au tube de drainage sans argile ni boue ; en effet, ceux-ci pourraient s'y déposer, ce qui risquerait de l'obturer. Il convient aussi de protéger l'imperméabilisation pendant le déversement de l'agrégat, afin qu'elle ne soit pas perforée. Cette protection peut se faire de nombreuses manières différentes : en

recouvrant l'imperméabilisation avec un mur de bloc, ou avec une planche, ou encore avec un tissu moderne de géotextile, par exemple.

- Le drainage ne doit pas être recouvert d'un revêtement dur, mais d'un revêtement perméable (gravier, par exemple, ou pavés à joints ouverts).
- b. S'il s'agit d'humidité de capillarité ascendante, pour tenter d'éviter le contact du terrain avec le mur enterré ou avec la fondation, il est souhaitable de créer une chambre d'aération. (Fig. 4) La chambre d'aération a pour mission d'empêcher le



2



3

contact des matériaux de construction avec le terrain, étant donné que l'on intercepte de cette manière la succion capillaire, mais il faut aussi la construire en respectant les conditions suivantes :

- La chambre de ventilation doit être la plus sèche et la mieux protégée possible. Il faut éviter qu'y entrent les eaux de pluie, ou de l'eau provenant de toute autre source d'humidité (avaries, tout-à-l'égout, etc.).
- Elle doit toujours être ventilée. Or, il n'est pas simple de bien ventiler une chambre d'aération, parce que cela signifie en effet de prévoir que l'air puisse pénétrer avec facilité (par un



4

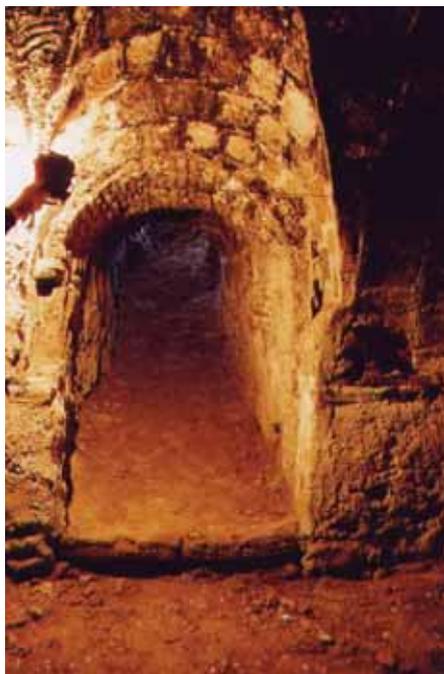
nombre suffisant de grilles), parcourir la chambre, puis sortir d'un autre côté. Les chambres de ventilation sont, conceptuellement, comme les conduites d'air conditionné, et il n'est pas toujours simple de faire en sorte que l'air se déplace sans une aide mécanique. Si une chambre d'aération n'a pas une rénovation de l'air suffisante, l'humidité évaporée provenant du terrain sature l'air situé à l'intérieur, et lorsque l'humidité relative en elle a atteint 100 % il se produit une condensation sur toutes ses parois (Fig. 5), ce qui entraîne le fait que l'humidité recommence à affecter le mur ou les fondations. En conséquence, s'il n'y a pas de garantie qu'une chambre d'aération sera bien ventilée, il vaut mieux ne pas la construire.

- Lorsque l'on conçoit une chambre d'aération, il convient de tenir compte du fait que l'air humide est moins dense que l'air sec, et par conséquent qu'il a tendance à monter. On peut profiter de ce principe physique pour disposer correctement les grilles. L'air sec doit entrer par le bas, et l'air humide sortir par le haut.
- L'air de rénovation des chambres d'aération doit être pris à l'extérieur, et être évacué aussi par l'extérieur. Les chambres d'aération dans lesquelles seul l'air de l'intérieur du bâtiment se déplace ne sont pas efficaces.
- On peut faire une chambre d'aération soit à l'intérieur soit à l'extérieur du bâtiment, afin de ventiler aussi bien les murs que les socles ou les fondations, mais dans tous les cas la ventilation doit se faire comme nous l'avons indiqué au point précédent : vers l'extérieur.
- Les caves, les cryptes, les sous-sol, etc. bien ventilés fonctionnent comme des chambres d'aération des étages qui sont au-dessus d'eux. Il convient de maintenir les trous qui y existent, de la façon dont ils ont été conçus. (Fig. 6) Traiter un sous-sol comme espace habitable, en fermant ses ouvertures, implique une étude du bâtiment dans son ensemble, afin d'éviter les répercussions négatives découlant de cette intervention.



5

- c. Lorsque l'on se trouve face à un problème dû à la nappe phréatique, la solution est compliquée, parce que le bâtiment traditionnel n'est imperméable dans aucune de ses parties, et que pour éviter l'entrée d'eau de la strate phréatique la seule solution consiste à avoir recours à des systèmes constructifs apportant une certaine étanchéité. La seule solution, qui est celle qui était construite traditionnellement, est la canalisation d'une partie de la strate phréatique. Ce système de canaux (Fig. 7) est la base d'une culture méditerranéenne experte en conduction de l'eau. Il demeure encore de nos jours quelques exemples de ces bâtiments sillonnés de réseaux de canaux, de citernes et de puits. Lorsque l'on découvre dans un bâtiment des vestiges de canalisations, le plus sensé consiste à étudier le



6



7

9

système afin d'en récupérer l'usage dans la mesure du possible. Habituellement, ce qui a bien fonctionné depuis le début continue à donner de bons résultats. Cela exige cependant des études archéologiques et hydrologiques rigoureuses, mais c'est une perspective intéressante pour récupérer le patrimoine ethnologico-architectural. Parfois, la seule solution est la construction d'un puits drainant à l'intérieur (ou mieux encore, à l'extérieur) du bâtiment, et l'extraction de l'eau par pompage. (Fig. 8)

3. Dans certains cas, il n'est pas possible d'empêcher le contact ni de canaliser l'eau provenant du terrain avant que celle-ci n'entre en contact avec le mur ou le socle. Le travail consiste alors à **tenter de favoriser au maximum l'évaporation** de ces éléments :

- ▶ par l'utilisation de revêtements à base de mortiers ayant une grande perméabilité au passage de la vapeur ;
- ▶ par la ventilation des locaux ou des pièces dans lesquels se trouvent des éléments humides.

Toutefois, il s'agira toujours d'interventions qui ne constitueront pas une solution définitive du problème mais qui seront parfois la seule possibilité, dans l'attente de nouvelles techniques de construction. Il s'agit de conserver le mieux possible les bâtiments dans lesquels il y a une humidité irrémédiable, et l'étude préalable à l'intervention doit apporter des réponses aux questions telles que : comment réagiront les matériaux lorsque sera accéléré le mode stable d'évaporation ? ou bien, où sera évacuée l'eau évaporée ? (Il faudra éviter qu'elle s'évapore dans

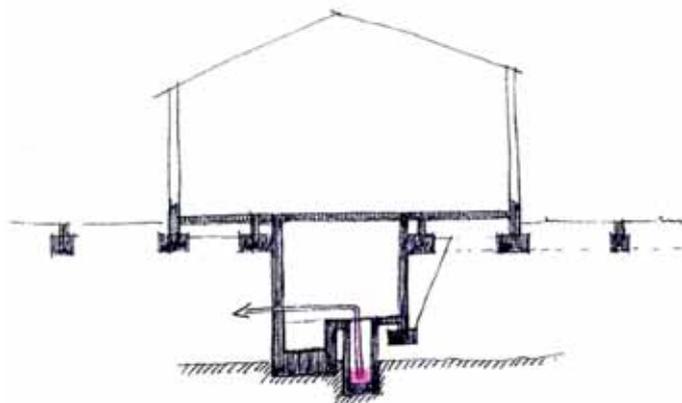
des endroits qui pourront produire, par exemple, des condensations dans un autre lieu ; le cas typique étant la ventilation d'une cave ou d'une crypte : si l'on n'analyse pas le bâtiment dans son ensemble, l'humidité peut se condenser sous le plafond, ou dans les voûtes, car l'air humide a tendance à monter, et il pourra alors s'y accumuler.)

## 2. Critères d'intervention dans le cas d'humidité de condensation hygroscopique

Comme nous l'avons déjà vu, ce type d'humidité se produit lorsque dans le bâtiment se trouvent des matériaux qui présentent un comportement hydrique anormal, par la présence en eux de sels hygroscopiques. C'est la raison pour laquelle la réaction du matériau face à la présence d'humidité (y compris sous forme de vapeur) est disproportionnée : on verra apparaître de grandes taches, qui devraient être dues à des foyers intenses d'humidité, alors qu'il n'existera parfois qu'une petite évaporation depuis un terrain humide, ou parfois même la seule présence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère.

Lorsque l'on fait le diagnostic et que l'on détecte que le problème est dû aux sels hygroscopiques, les critères d'intervention sont les suivants :

- a. Il est important de vérifier avant tout qu'il n'y a pas de foyer d'humidité, ou que celui qui existe est si petit qu'il ne requiert pas d'intervention.



8

b. Après avoir vérifié ce premier point, si l'élément a une valeur artistique, historique, etc., on peut tenter d'éliminer les sels superficiels. Les opérations de dessalage de parements ou de sculptures sont habituelles chez les restaurateurs. Il s'agit de mettre en contact avec la surface à traiter des petits morceaux de papier de cellulose ou d'argile imprégnés d'eau distillée. L'eau du papier dissout les sels de la surface de l'élément à traiter, et l'évaporation postérieure fait que les sels se déplacent et viennent adhérer au papier, où ils cristallisent en séchant. On peut alors retirer facilement le pansement. L'intervention est répétée autant de fois que nécessaire.

c. Avec ce système, on peut éliminer de petites quantités de sels déposés dans la partie du mur la plus proche de la surface. Il s'agit d'un système délicat et coûteux, qui exige l'intervention d'un spécialiste, et une supervision continue pour éviter la détérioration du matériau. Ce n'est pas, par conséquent, une solution qui peut être utilisée pour de grandes surfaces sans grande valeur.

Si l'on ne considère pas souhaitable de procéder au dessalage, la seule solution est l'élimination des matériaux contaminés : piquage des revêtements et, parfois aussi, du mortier de joints dans les maçonneries de brique. Dans certains cas, les sels se trouvent seulement sur les enduits et, en les assainissant avec cette méthode, l'humidité disparaît. Lorsqu'il ne s'agit pas de murs revêtus mais de maçonneries dans lesquelles la brique ou la pierre est apparente, le piquage des matériaux ne peut se faire que dans les mortiers, ce qui améliore un peu l'apparence de la lésion mais ne l'élimine pas en totalité.

Dans certains bâtiments, une pratique commune consistait à substituer de nouvelles briques ou pierres de taille aux anciennes. Dans ce cas, l'humidité due à l'hygroscopicité disparaît complètement, évidemment, mais ce n'est pas une possibilité d'intervention généralisable actuellement.

d. Lorsqu'aucune des interventions ci-dessus n'est possible, il faut savoir que la tache ne disparaîtra pas. Toutefois, s'il n'y a pas d'autre foyer d'humidité que la vapeur de l'atmosphère, la lésion n'est pas importante, en dépit de son aspect esthétique. Le projet et le type de bâtiment devront être déterminants dans la décision de l'intervention la plus adéquate.

### 3. Critères d'intervention dans le cas d'humidité due à des infiltrations d'eaux de pluie

Lorsque le diagnostic révèle ce type de problème, le plus sûr consiste à tenter de traiter l'infiltration le plus près possible de l'endroit où elle se produit. Cela veut dire qu'il convient de vérifier :

- ▶ par où entre l'eau ;
- ▶ quel chemin elle suit ;
- ▶ pour quelle raison elle apparaît là où elle le fait.

Le plus efficace consiste à vérifier le premier point à l'aide des techniques *ad hoc*. La solution du problème n'est en général pas difficile à trouver parce qu'il s'agit d'un exercice de construction : concevoir une solution adaptée à chaque cas.

#### Par la couverture

Comme les filtrations se produisent habituellement à cause d'une mauvaise conception de la solution originale ou du vieillissement des matériaux employés, l'intervention tentera de résoudre ce qui sera opportun dans chaque cas.

Il convient ici de faire une réflexion quant au caractère perméable de nombreuses couvertures méditerranéennes, toits plats ou terrasses. Dans ces couvertures, en effet, l'efficacité est obtenue à base de couches de mortier soigneusement sélectionnées et dimensionnées en fonction du microclimat, dont le rôle est d'évacuer rapidement l'excès d'eau, en même temps qu'elles en absorbent une partie afin que l'évaporation postérieure rafraîchisse l'atmosphère intérieure. La quantité d'eau absorbée ne doit jamais atteindre le parement intérieur : pour ce faire, l'expérience et la tradition constructive ont mis en place dans chaque lieu la conception la plus adaptée.

La solution n'atteint pas son but lorsque l'on prétend, sans l'analyser, faire de la terrasse traditionnelle une terrasse imperméable, par l'interposition de plaques imperméables ou de matériaux ne présentant pas une absorption suffisante (carreaux céramiques ou hydrauliques modernes, par exemple, dont le coefficient d'absorption est trop faible). Le changement de concept dans le fonctionnement de la couverture exige d'analyser le nouveau comportement ; en effet, on produit aujourd'hui de grandes plaques d'écoulement qui n'étaient pas faites ainsi auparavant. La conception de ces plaques implique de répondre à

des problèmes différents de ceux de la couverture traditionnelle (par exemple les joints, les points de rencontre du pan de mur et du canal d'écoulement des eaux, etc.) qui ne requièrent pas tant d'attention dans la couverture perméable. En outre, l'introduction de plaques imperméables rend plus difficile, voire empêche, l'évaporation, ce qui entraîne la perte de contribution de la terrasse au confort hygrothermique, et il peut même se produire des problèmes de condensation lorsque la vapeur est prise dans les zones froides.

Tout cela signifie que la solution de l'humidité due à des filtrations d'eaux de pluie requiert une connaissance en profondeur de la réalité constructive elle-même ainsi que typologique des bâtiments sur lesquels on souhaite intervenir. Elle exige aussi une étude en laboratoire des matériaux anciens et modernes pour découvrir leurs caractéristiques hydriques et rendre compatible leur usage avec les nouveaux besoins.

#### Par le mur

Une partie de ce qui a été dit ci-dessus pour la couverture est aussi applicable à l'étude des murs soumis à l'action de la pluie, ainsi qu'à la conception des éléments de protection nécessaires.

D'une part, la pluie qui tombe sur un mur produit une plaque d'égouttement et, d'autre part, elle est absorbée par les matériaux. L'équilibre entre la quantité d'eau absorbée et la quantité égouttée est une caractéristique des différentes solutions constructives et il répond, comme dans le cas de la couverture, à

une pratique de nombreuses années (voire même de siècles), qui a adapté la construction aux matériaux disponibles et aux facteurs climatiques présents dans la zone. (Fig. 9)

Comme dans le chapitre précédent, la modification de ces pratiques sans connaissance de leur justification peut être la cause de l'échec.

Il faut aussi se souvenir qu'un mur détérioré n'est plus le mur qui a été construit en son temps. Par exemple : l'arrondissement des arêtes dans les pierres de taille peut modifier complètement la proportion d'eau absorbée par un mur, et exiger une intervention dans laquelle le rejointoiement n'est parfois pas suffisant, et le mur peut exiger une substitution de pierres ou un enduit.

Comme on peut le voir, l'analyse de l'incidence des eaux de pluie sur les bâtiments perméables est nécessaire pour une conception correcte des solutions, et elle n'admet pas le simple échange de « recettes » ou de solutions-types. Mais cette difficulté se convertit pour nous en une source d'intérêt et son étude, en un réservoir de connaissances.



## Consolidation des monuments de grès du site du patrimoine mondial de Pétra

### 1 Abstract

Le but principal de cette recherche est l'évaluation de l'effectivité d'un certain nombre de produits consolidants du grès. La méthodologie de la présente recherche est basée sur des tests de laboratoire devant permettre d'évaluer la mesure dans laquelle différents préservateurs répondent à des conditions prédéterminées.

Quatre types de produits ont été sélectionnés pour cette étude. Il s'agit de variations d'esters d'acide salicylique et de produits à base de silicate. Des échantillons de grès du site du patrimoine mondial de Pétra ont été traités par ces produits consolidants puis testés par une série de tests standard de laboratoire.

### 2 Introduction

Située dans la Jordanie actuelle et cachée au beau milieu de montagnes presque impénétrables à l'est de la vallée qui relie le golfe d'Aqaba et la mer Morte, se trouve l'ancienne ville de Pétra, l'un des sites archéologiques les plus éblouissants visuellement au monde avec des monuments de grès absolument spectaculaires. Du fait de sa très grande importance, Pétra a été inscrite sur la liste du patrimoine mondial dès 1985.

Les signes de dégradation sur les monuments du site du patrimoine mondial de Pétra, qui ont été taillés dans la roche, sont nombreux et alarmants. On considère que plus de 80 % des façades délicatement ciselées et décorées ont été perdues pour toujours. Depuis que les Nabatéens ont quitté Pétra pour ne plus y revenir, tous les bâtiments de la ville ont commencé à se dégrader et les monuments de pierre ont été réintégrés dans le cycle de la nature et laissés sans protection vis-à-vis des forces de l'érosion et de la dilapidation. La menace de nouvelles pertes du tissu ainsi que de détails architecturaux irremplaçables est imminente et réelle. En conséquence, des mesures urgentes de conservation devraient être mises en œuvre pour freiner la détérioration ainsi que la réduction de cet important patrimoine culturel mondial.

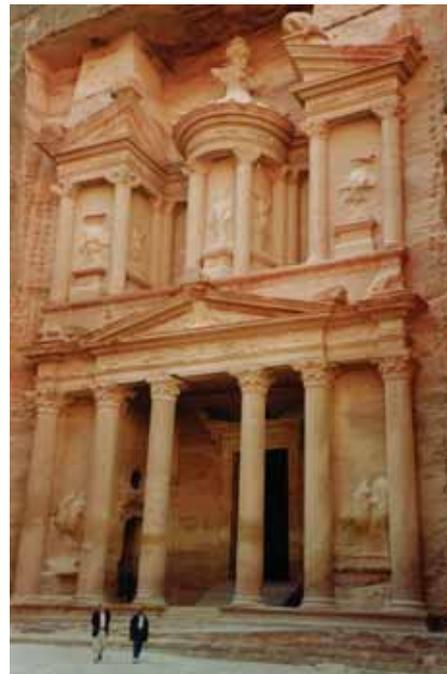
Il serait terriblement irresponsable d'appliquer des matériaux n'ayant pas fait leurs preuves à des constructions d'une importance et d'une valeur historiques comme celles de Pétra. Toutefois, ces constructions ont le plus urgent besoin de traitement. En conséquence, des procédures fiables pour une évaluation rapide des préservateurs ainsi que des produits

Ziad AL-SAAD

Docteur en Conservation et en Archéométrie  
Doyen de la faculté d'Archéologie et d'Anthropologie  
de Yarmouk University, Irbid, Jordanie

Fandi WAKED

Architecte  
Faculté d'Archéologie et d'Anthropologie de Yarmouk University,  
Irbid, Jordanie



Pétra (Jordanie)

consolidants potentiels sont tout à fait essentielles.

Il n'existe pas de préservateur ou de produit consolidant universellement applicable. Toutefois, avec l'aide d'un programme de tests préalables, le risque de prendre des mesures non souhaitables est minimisé.

Des tests de laboratoire sont importants parce que les expérimentations ne peuvent pas être menées avec les objets eux-mêmes. Les scientifiques doivent conclure sur la base de simples modèles pour une situation complexe sur un monument. Mais le fonctionnement des matériaux sur un monument et la réponse de ces mêmes matériaux à l'influence environnementale sont tellement différents que tous les problèmes de conservation ne peuvent pas être anticipés au cours d'une expérience de laboratoire seule sans un test de terrain (Snethlage *et al.*, 1990). En conséquence, un test *in situ* doit être mené parallèlement au programme de tests de laboratoire.

Lorsque l'on souhaite étudier un produit pour un problème particulier que l'on doit appliquer à un certain type de pierre, il est

essentiel de faire une série de tests prenant en considération la nature de la pierre, son comportement à l'érosion ainsi que le but ultime du processus de conservation. Les tests sont menés sur des échantillons de pierre traitée en comparaison avec des échantillons de pierre non traitée.

On doit remarquer que le test des méthodes de conservation n'a qu'une signification exclusivement comparative. Avant tout, on doit considérer le fait que les simulations menées en laboratoire ne sont que des approximations des mécanismes naturels de détérioration. Ce projet est basé sur la conception d'un régime de tests qui pourrait être utilisé effectivement pour évaluer une série de produits consolidants et de préservateurs de pierre commercialement disponibles et qui seraient prometteurs. Le but est de sélectionner les matériaux convenables qui peuvent être utilisés pour protéger les monuments menacés et érodés de Pétra.

### 3 Critères de performance

Lorsque l'on fait le choix du produit consolidant le plus adapté à un traitement particulier, divers facteurs doivent être pris en considération (Amoroso et Fassina 1983 : 244). Sur la base de l'expérience et de la connaissance accumulées au cours des ces dernières décennies, il y a presque un consensus quant aux conditions que doit remplir un produit consolidant de pierre. Il s'agit de :

1. l'augmentation de la force cohésive de la pierre traitée ;
2. l'obtention d'une pénétration substantielle de la pierre traitée, accompagnée du dépôt du produit consolidant dans toute l'épaisseur de la zone érodée de la pierre ;
3. l'absence d'interactions délétères chimiques ou physiques entre le produit consolidant et la pierre ;
4. la création d'un profil de dureté continu ;
5. un faible coefficient d'expansion thermique ;
6. la compatibilité avec la nature de la pierre ;
7. la perméabilité à la vapeur d'eau / l'imperméabilité à l'eau (le cas échéant) ;
8. la facilité d'utilisation ;
9. la sécurité et l'économie de l'utilisation (tant pour le travail que pour le matériau) ;
10. l'effectivité à long terme.  
(Torraca, 1988 : 87), (Price, 1975 : 352), (Amoroso et Fassina, 1983 : 243), (Clifton, 1984 : 153-54), (Weber et Zinsmeister, 1990 : 54), (Weber, 1980 : 379).

## 4 Matériaux et méthodes

### 4.1- Produits consolidants

Quatre produits consolidants pour la pierre disponibles sur le marché ont été sélectionnés dans le cadre de cette étude.

Trois des produits consolidants sont basés sur les esters d'acide salicylique : Wacker OH, Wacker H et Funcosil ; le quatrième étant Befix qui est un produit basé sur le silicate (Remmers : 1995 ; Sanotec : 1995 ; Wacker-Chemie : 1995). Les produits ont besoin soit d'eau soit d'un solvant, et ils ont été appliqués à la brosse ou à l'aide d'un spray à des morceaux ou à des cubes du cœur de la roche de grès prélevés dans une carrière de Pétra.

### 4.2 Programme de test en laboratoire

Les méthodes de test en laboratoire décrites ci-dessous ont été utilisées dans cette étude.

#### 4.2.1 Valeur d'assimilation du produit consolidant (profondeur de pénétration)

Le but principal de ce test est l'évaluation des propriétés de pénétration d'un produit de consolidation. Des échantillons de 4,1 cm de diamètre et de poids connu ont été utilisés dans ce test. Les produits consolidants ont été additionnés à la pierre par la méthode de capillarité montante. Les échantillons ont été placés chacun sur une éponge saturée de l'un des différents produits consolidants. L'augmentation de poids ainsi que la hauteur de montée du produit consolidant ont été enregistrés comme une fonction du temps. Les lectures ont été faites après 30, 60, 120, 300, 600, 1200, 1800 et 2400 secondes.

#### 4.2.2 Valeur d'assimilation de l'eau par capillarité

Pour effectuer des mesures d'absorption de l'eau, quinze échantillons de 4,1 cm de diamètre de différentes longueurs et de poids connu ont été utilisés. Les tests ont été effectués conformément à la norme DIN 52617. Les échantillons ont été traités avec les différents produits consolidants par aspersion à l'aide d'un spray. Quelques échantillons non traités ont été conservés comme témoins. Chaque échantillon de test a été placé individuellement sur une sorte de tampon saturé d'eau pour permettre à l'eau de pénétrer depuis la surface inférieure des échantillons par succion capillaire. Après 30, 60, 120, 300, 600, 1800, 2400 et 6000 secondes le niveau ainsi que la quantité d'eau absorbée ont été mesurés et enregistrés par augmentation de hauteur et de poids.

#### 4.2.3 Absorption d'eau par immersion totale

Des échantillons non traités et traités du grès de Pétra ont été immergés dans l'eau. L'absorption d'eau représentée par le pourcentage de gain de poids a été enregistrée après 10, 30, 60 minutes et après 24 heures. La valeur à 10 minutes et la capacité



Pétra (Jordanie)



Pétra (Jordanie)



Pétra (Jordanie)

initiale d'absorption donnent un aperçu du comportement de la pierre quant à l'absorption dans la phase initiale d'une averse.

#### 4.2.4 Perméabilité à la vapeur d'eau

Pour effectuer ce test, six échantillons ont été utilisés. De chaque échantillon, deux tranches, d'une épaisseur de 7 et de 10 mm, l'une pour la coupe sèche, l'autre pour la coupe humide, ont été prélevées. Le test a été mené conformément à la norme DIN 52615.

#### 4.2.5 Test de cristallisation du sel

Ce test a été mené conformément à la norme DIN 5211. Cinq échantillons ont été utilisés pour ce test. Des échantillons traités et non traités ont été immergés dans une solution de sulfate de sodium pendant 16 heures. Les échantillons ont ensuite été retirés de la solution et chauffés dans un four pendant 5 à 7 heures à une température de 110 °C. On considère qu'un cycle est constitué d'une procédure d'immersion suivie d'une période de chauffage. Les spécimens ont été soumis à une série de cycles ; après chaque cycle, ils ont été examinés visuellement et leurs pertes de poids ont été enregistrées.

#### 4.2.6 Mesures de la résistance à la compression

Des mesures de la résistance à la compression ont été effectuées conformément à la norme DIN 1164. Les produits consolidants testés ont été appliqués pour doubler des spécimens de prisme de pierre de 65 x 150 x 25 mm. Des spécimens doublés de prisme de pierre non traités ont aussi été testés. La résistance à la compression a été mesurée sous une presse hydraulique (compression maximum 10 t). (Sattler, L., et Snethlage, R. : 1990)

#### 4.2.7 Résistance au dommage dû au gel et au dégel

Ce test a été effectué pour évaluer l'effectivité des différents traitements de consolidation pour améliorer la résistance de la pierre aux dommages dus au gel et au dégel. Les tests ont été effectués en suivant les méthodes indiquées dans la procédure A de la méthode ASTM C 666. Des échantillons traités avec différents produits consolidants en même temps qu'un échantillon témoin non traité ont subi des cycles d'élévation et de baisse de températures situées entre -18 °C et 22 °C avec un cycle horaire de 4 heures.

## 5 Résultats et discussion

Les profondeurs de pénétration des solutions de Wacker H, de Wacker OH, de Funcosil OH, et de Befix concentré (1:1 Befix, 1:3 Befix et 1:6 Befix) dans les échantillons de grès ont donné des variations qui se sont situées entre 57,50 mm et 27,00 mm. La meilleure pénétration a été obtenue par le produit Wacker H suivi

du produit Wacker OH. Cela est dû, pour l'essentiel, à leur faible viscosité et à leur poids moléculaire bas.

Les valeurs d'assimilation d'eau par capillarité des différents échantillons de pierre non traitée étaient élevées et variées ; en effet, elles allaient de 3,26 à 7,69 kg/m<sup>2</sup>h<sup>0.5</sup>. Cela est dû, pour l'essentiel, à la différence de nature du grès qui peut avoir différentes porosités, ainsi qu'à l'étendue de l'érosion que les pierres ont subi. Tous les produits consolidants ont réduit l'absorption d'eau par capillarité dans des mesures différentes. Les coefficients d'absorption d'eau calculés indiquent que l'ordre de réduction était : Wacker H = Befix 1:1 > Befix concentré > Wacker OH > Funcosil OH > Befix 1:3 > Befix 1:6 > non traité. Le produit Wacker H donne un effet d'imperméabilité à l'eau dû pour l'essentiel à ses composants alcoxysilanes. Les alcoxysilanes ont l'avantage de donner à la pierre un degré d'imperméabilité à l'eau grâce à leur groupe alkyl qui est un groupe méthyle dans la plupart des cas (Larson J. H. S. : 1982). Des mélanges d'ester silicique et de méthyltrialcoxysilane sont effectués dans la pierre par un processus de condensation aussi bien pour consolider la surface de la pierre friable que pour la protéger en la rendant imperméable à l'eau. Le produit Befix est une solution aqueuse consistant en une partie organique et une partie de silicate réactif. La partie de silicate réactif réagit aux ions de calcium et de magnésium dissouts de la surface de la pierre pour former un nouveau composé de silicate compact et stable qui, avec sa partie organique, donnera un effet hydrophobe.

Grâce à la perte de poids avec le temps dans l'expérience de la coupe humide et à l'augmentation de poids dans l'expérience de la coupe sèche, la diffusion de la vapeur d'eau a pu être calculée en kg/m<sup>2</sup>.

L'échantillon non traité a une perméabilité élevée à la vapeur d'eau qui se manifeste par son faible coefficient de résistance à la diffusion. Il est tout à fait évident, au vu des résultats, que le traitement de la pierre avec les différents produits consolidants permet d'obtenir une baisse de la perméabilité de la pierre. Toutefois, les résultats de la baisse de la perméabilité due au traitement ne sont pas remarquables. La plus grande baisse de perméabilité à la vapeur d'eau a été causée par le traitement avec le produit Wacker H (28 %) alors que la plus faible baisse a été due au traitement avec le produit Funcosil OH (8 %). Le traitement avec les produits Wacker OH et Befix 1:6 ont permis d'obtenir une baisse presque semblable dans les deux cas, de 8 % et 10 % respectivement.

Les résultats obtenus montrent que le traitement avec le produit Befix a donné la plus grande augmentation de la résistance à la compression, alors que le traitement avec le produit Wacker OH a donné l'augmentation la plus faible. Toutefois, il est tout à fait évident que les produits consolidants de pierre testés ont été effectifs quant à l'augmentation de la résistance à la compression. L'augmentation de la résistance à la compression des échantillons

traités avec les produits Wacker H, Wacker OH et Funcosil OH est tout à fait comparable. Ceci est dû au fait que les produits consolidants contiennent des esters d'acide salicylique comme composants réactifs qui sont responsables de la consolidation de la pierre. Les esters d'acide salicylique agissent comme des produits consolidants de la pierre en déposant un gel de silice, qui est un liant naturel de la pierre, dans les pores de la pierre érodée. Ce dépôt mène ensuite à une amélioration de sa force de cohésion. Le produit Befix donne sa force de consolidation par un mécanisme différent. Sa partie inorganique réactive réagit avec les ions de calcium et de magnésium dissouts de la pierre érodée. Ceci a pour résultat la formation de nouveaux composants de silicate stables.

L'échantillon traité avec le produit Funcosil OH a présenté la plus grande résistance à la cristallisation des sels. Toutefois, il a souffert du développement de microfissures et d'une réduction en poudre. La plus faible durabilité a été présentée par l'échantillon traité avec le produit Wacker OH alors que la meilleure résistance a été présentée par l'échantillon traité avec le produit Funcosil OH. Ce résultat est curieux parce qu'aussi bien le produit Wacker OH que le produit Funcosil OH sont pour l'essentiel des silicates d'éthyle. Toutefois, il semble que pour obtenir des résultats comparables des deux traitements avec le produit Wacker OH ceux-ci devraient être renouvelés après un certain temps.

## Conclusion

Les résultats obtenus démontrent que les produits consolidants de pierre testés ont des capacités de consolidation acceptables mais variables. Il n'y a de tendance constante pour aucun des matériaux testés. Dans certains tests, un produit peut donner un résultat très positif. Cela ne correspond pas à tous les tests dans lesquels des résultats positifs sont obtenus. Tous les produits consolidants testés ont leurs mérites mais aussi leurs défauts. Il est tout à fait évident que le produit consolidant parfait et universel qui pourrait résoudre tous les problèmes n'existe pas. Par exemple, les produits consolidants appliqués comme solutions basiques (Wacker OH, Wacker H et Funcosil OH) ont en général une meilleure profondeur de pénétration que ceux qui sont appliqués comme solutions aqueuses (Befix). D'autre part, l'utilisation de solvants hautement volatiles et inflammables, tout spécialement dans des climats chauds, peut avoir de sérieux impacts négatifs sur les humains de même que sur l'environnement. En outre, l'évaporation des solvants entraîne à la surface de la pierre une considérable quantité du produit consolidant ce qui, en conséquence, affaiblit son efficacité.

Les produits consolidants ayant des effets hydrophobes (Wacker H et Befix) ont de meilleures capacités quant à la réduction de l'assimilation d'eau de la pierre lorsqu'on les compare avec les

autres produits consolidants. Ces matériaux, d'autre part, réduisent dans une mesure légèrement plus grande la perméabilité à la vapeur d'eau de la pierre. Si l'on considère les exemples mentionnés auparavant, il est évident qu'une évaluation des résultats quant à la durabilité du traitement est très difficile à effectuer parce que plusieurs facteurs s'influencent mutuellement. L'importance d'un seul facteur peut difficilement être quantifiée ; une performance différente du traitement peut affecter un ensemble de caractéristiques pouvant aller de l'imperméabilité optimisée à l'eau à la capacité d'absorption du matériau non traité. Les mêmes effets peuvent être causés pour des pierres hétérogènes, l'influence principale présentant des variations en fonction de la distribution des diamètres des pores. La conclusion principale de cette étude est que, même s'il n'existe aucun produit consolidant de la pierre qui pourrait satisfaire et répondre à toutes les conditions, le fait d'employer des produits consolidants pour la pierre durement érodée et menacée est de très loin mieux que ne rien faire. Ceci n'est vrai cependant que si un soin extrême est pris pour optimiser toutes les variables impliquées. Chaque objet et chaque matériau présente des problèmes particuliers auxquels on doit répondre en fonction des circonstances. Ceci ne peut être fait que par une conception soignée des programmes de tests *in situ* en utilisant les résultats obtenus par les programmes de tests de laboratoire.

## Références

SNETHLAGE, R., WENDLER, E., et Sattler, L. (1990), *The Application of Laboratory Processes and Studies to Real Structures*, Proc. Sympo. "Analytical Methodologies for the Investigation of damaged Stones", du 14 au 21 septembre 1990, Pavie, Italie.

AMOROSO, S., ET FASSINA, V. (1983), *Stone decay and conservation*, *Materials Science Monographs*, 11, Elsevier, Amsterdam, Pays-Bas.

PRICE, C. A. (1975), *The Decay and Preservation of Natural Building Material*, *Chemistry in Britain*, 350-353, 11(10).

CLIFTON, J. R. (1984), *Adhesives and Consolidants*, réimpression de contributions au Congrès de Paris du 2 au 8 septembre 1984 (éd. N.S. Brommelle, Elizabeth M. Pye, Perry Smith et Garry Thomson), International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, Londres, Angleterre, p. 151-155.

TORRACA, G. (1988), *Porous Materials. Building Materials Science for Architectural Conservation*, troisième édition, Rome, Italie.

WEBER, H. ET ZINSMEISTER, K. (1990), *Conservation of Natural Stone*, Expert Verlag, Ehningen, p. 53-84.

WEBER, H. (1980), *Stone renovation and consolidation using silicones and silicic esters*. Wacker-Chemie GmbH, Munich, Allemagne, p. 385-375.

REMMERS (1995), *Funcosil Facade Protection and Restoration Systems*, Remmers Bauchemie GMBH, Allemagne.

SANOTEC AUSTRIA (1995), *Innovation, Research and Development for the Protection of*

*the Environment, Special Products for Buildings, Construction, Preservation and Treatment*, rapport Sanotec Austria Technical, Autriche.

WACKER (1995), *Wacker Silicones for Masonry Protection*, Wacker-Chemie GmbH, Allemagne.

SATTLER, L., ET SNETHLAGE, R. (1990), *Durability and Stone Consolidation Treatments with Silicic Acid Ester*, Proc. Sympo. "Analytical Methodologies for the Investigation of damaged Stones", du 14 au 21 septembre 1990, Pavie, Italie.

## Traiter et protéger le bois

Comme nous l'avons dit, le bois se dégrade sous l'action des agents biotiques et abiotiques dont l'attaque peut aller jusqu'à le détruire entièrement.

On peut agir pour l'éviter. En premier lieu, on devra analyser les causes de la dégradation pour protéger le bois correctement. On devra également tenir compte des caractéristiques du bois employé, de sa durabilité naturelle, de son imprégnabilité aux produits protecteurs, de l'emplacement de la pièce en bois (on le verra plus loin dans les classes de risque) et à partir de ces données, on pourra sélectionner le traitement le plus approprié.

### Classes de risque

Avant de passer aux traitements, on commencera par déterminer le risque auquel une pièce en bois est exposé dans une construction. La notion de classe de risque est associée à la probabilité qu'un élément en bois, structurel ou pas, subisse les attaques d'agents biotiques en fonction de sa mise en œuvre, présente ou future. L'humidité étant fondamentale dans la plupart des attaques biotiques, les classes de risque sont définies comme suit.

**Classe de risque 1** : sans risque d'humidité. L'élément en bois massif est sous abri, protégé de l'intempérie et il n'est pas exposé à l'humidité. Dans ces conditions, le bois se maintiendra au-dessous de 20 % d'humidité. Il n'y a pas de risque d'attaques de champignons et ce n'est qu'occasionnellement que des attaques de termites ou d'insectes de cycle larvaire (vrillettes) pourront se produire.

Exemples : planchers en bois, escaliers, portes, éléments structurels en général éloignés de toute source d'humidité, structures à l'intérieur des bâtiments.

**Classe de risque 2** : risque accidentel d'humidité. L'élément en bois est sous abri, protégé des intempéries mais il peut présenter occasionnellement un taux d'humidité supérieur à 20 % dans une partie de la pièce ou dans sa totalité, ce qui pourra favoriser le développement de champignons. Le risque d'attaque d'insectes xylophages est similaire au groupe précédent.

Exemples : bois humidifiés par des fuites d'eau dans les conduits, des infiltrations en toiture ou des structures de piscine couverte où l'humidité ambiante est importante en permanence avec des condensations occasionnelles.

Joaquín MONTÓN

Architecte technique

Professeur au département des Constructions architecturales II, de l'École polytechnique supérieure de l'édification de Barcelone (Université polytechnique de Catalogne), Espagne



Pulvérisation de poutres de bois anciennes avant leur remise en œuvre.

**Classe de risque 3** : risque d'humidité ambiante. L'élément structurel se trouve à nu, mais il n'est pas en contact avec le sol. Il est exposé à une humidification fréquente de sorte qu'il a toujours plus de 20 % d'humidité. Il est prédisposé à l'apparition de pourritures et à l'attaque d'insectes xylophages.

Exemples : menuiseries extérieures, ponts réservés aux piétons ou aux voitures, pergolas, mobilier urbain.

**Classe de risque 4** : risque d'humidité permanente. L'élément en bois est en contact avec le sol ou immergé en eau douce ; il est donc exposé en permanence à une humidification supérieure à 20 %, d'où un risque permanent de pourriture et d'attaques de termites.

Exemples : constructions immergées en eau douce et poteaux en contact direct avec le sol, clôture, pieux, traverses de chemin de fer.

**Classe de risque 5** : contact permanent avec l'eau de mer. Situation dans laquelle le bois structurel est en contact permanent avec de l'eau salée. Dans ces circonstances, le bois a toujours plus de 20 % d'humidité, d'où le risque d'attaque par des agents biotiques marins dans les parties submergées et toute sorte d'attaques biotiques dans les parties non submergées très humides.

Exemples : constructions en contact avec l'eau salée, jetées, pilotis, etc.

### Durabilité naturelle et imprégnabilité

La durabilité naturelle est la propriété de résistance intrinsèque du bois aux agents destructeurs déjà cités. Certains bois sont très durables, d'autres le sont beaucoup moins.

L'imprégnabilité est la capacité du bois à absorber un liquide à l'intérieur. Le bois d'aulx est plus facilement imprégnable que le duramen. Certains bois sont très faciles à imprégner, d'autres ne le sont pas.

### Produits protecteurs

Ce sont des produits qui, appliqués au bois, ont des propriétés insecticides et fongicides. On peut aussi englober les produits de protection contre les agents atmosphériques et contre le feu.

Les traitements diffèrent selon les cas et tous les produits ne sont pas équivalents. Il faudra donc choisir, dans chaque cas, le produit approprié et la bonne méthode d'application.

### Caractéristiques des produits protecteurs

Les caractéristiques idéales des protecteurs du bois peuvent se résumer de la manière suivante :

1. Ils seront toxiques pour les champignons et les insectes (insecticides et fongicides) mais non toxiques pour les personnes et les animaux à sang chaud ;
2. Ils auront un pouvoir résiduel important qui sera résistant au délavage, à l'évaporation ou à la sublimation ;
3. Ils seront chimiquement stables pendant longtemps ;
4. On les trouvera facilement et en abondance sur le marché ;
5. Leur emploi ne présentera pas de risques particuliers ;
6. Ils seront faciles à appliquer ;
7. Ils ne seront pas corrosifs pour les métaux ;
8. Ils pénétreront bien dans le bois ;
9. Ils n'augmenteront pas l'inflammabilité du bois ;
10. Après leur application, le bois pourra être peint ou verni ;
11. Ils ne dégageront pas de mauvaises odeurs ;
12. Ils seront incolores si l'on veut que le bois traité conserve sa teinte naturelle.

Aucun produit protecteur ne réunit toutes les qualités précédentes. Il conviendra donc de choisir les plus utiles et les plus appropriés à chaque cas particulier.

### Types de produit protecteur

**Protecteurs hydrosolubles.** Ce sont des mélanges de sels minéraux dissous dans de l'eau, qui utilisent l'eau comme véhicule pour pénétrer dans le bois. Leur concentration varie en fonction



Pulvérisation superficielle de pièces de bois de faible épaisseur.



Pulvérisation superficielle d'un noeud structurel.

du niveau de protection souhaité. Les procédures d'application utilisées doivent assurer la pénétration en profondeur, comme l'autoclave. On les applique sur le bois humide ou mouillé pendant le traitement, ce qui implique un séchage postérieur qui peut faire apparaître des déformations et des gerces. Ces produits teignent généralement le bois.

**Protecteurs hydrodispensables.** Ce sont des mélanges de principes actifs non solubles dans l'eau, auxquels on ajoute un agent émulsifiant. Les principes actifs sont des composés organiques. Ces méthodes apportant une pénétration superficielle, on les applique habituellement par badigeonnage, par pulvérisation ou par immersion brève.

Ce sont des produits intermédiaires entre les protecteurs hydrosolubles et les produits contenant un dissolvant organique. On les applique sur le bois humide ou mouillé pendant le

traitement, ce qui implique un séchage postérieur. Le bois traité avec des protecteurs hydrodispersables ne change généralement pas de couleur et il admet donc une finition postérieure. Ils sont compatibles avec les colles, ne sont pas corrosifs pour les métaux ni pour les matières plastiques. L'inflammabilité du bois n'augmente pas et les éléments en contact avec le produit ne sont pas tachés.

**Protecteurs contenant un dissolvant organique.** Ils contiennent des composés organiques de synthèse et utilisent un dissolvant organique pour pénétrer dans le bois. Ces produits traitent le bois superficiellement et en profondeur. Ils ont un pouvoir de pénétration très important et s'appliquent aussi bien au bois neuf qu'au bois déjà en œuvre, mais toujours sur du bois sec (moins de 20 % d'humidité). Ils ne teignent pas le bois. Certains de leurs principes actifs –DDT, dieldrine, lindane– de même que le dissolvant organique sont peu respectueux de l'environnement et parfois très toxiques.

**Protecteurs organiques naturels.** Ce sont des dérivés de la distillation du goudron de houille (créosotes), de bois ou de la pyrolyse du pétrole. De par leurs caractéristiques, les systèmes d'application les plus appropriés sont ceux qui utilisent l'immersion chaude ou froide et sous pression en autoclave. Ils sont très efficaces contre les agents xylophages du fait de leur haute toxicité ; ils se fixent bien dans le bois (ce qui prolonge l'effet du traitement) et ne sont pas corrosifs pour les métaux. Ils dégagent de mauvaises odeurs pendant un certain temps, tachent le bois en surface et n'admettent pas de finition immédiatement postérieure. À cause de leur odeur et de la toxicité de certains composants, leur emploi est interdit à l'intérieur ; par contre, ils sont très intéressants pour traiter le bois en contact avec la terre, comme les traverses de chemin de fer et les poteaux.

#### Types de protection contre les agents biotiques

Les types de protection du bois en fonction de la profondeur de pénétration du produit sont classés comme suit :

**Protection superficielle :** elle correspond à une pénétration moyenne du protecteur de 3 mm, avec un minimum de 1 mm en tout point de la surface traitée. Les traitements sont à appliquer par badigeonnage, par pulvérisation ou par immersion brève. Les produits appropriés sont les hydrodispersables et ceux qui contiennent des dissolvants organiques.

**Protection moyenne :** elle correspond à une pénétration moyenne de plus de 3 mm, sans arriver à 75 % du volume imprégnable. Les méthodes de traitement appropriées sont l'immersion prolongée et certains traitements en autoclave. Les protecteurs utilisés sont les sels hydrosolubles et les protecteurs qui contiennent des dissolvants organiques.

**Protection profonde :** elle correspond à une pénétration moyenne du protecteur supérieure ou égale à 75 % du volume.

Les systèmes d'application sont en autoclave de type vide-pression.

Comme on le voit, la plupart des systèmes d'application –immersion brève ou prolongée– et les systèmes en autoclave ne conviennent qu'au bois neuf, de substitution ou aux éléments que l'on peut démonter pour les traiter.

Pour résoudre les problèmes qui se posent dans la réhabilitation, sur le bois déjà en œuvre, il est préférable d'utiliser l'application au pinceau ou la pulvérisation et, pour des pénétrations profondes, l'injection avec ou sans pression.

Dans le tableau suivant, nous indiquons le type de protection exigé en fonction de la classe de risque.

Classe de risque	Type de protection
1	Aucune (protection superficielle recommandée)
2	Superficielle (protection moyenne recommandée)
3	Moyenne (protection profonde recommandée)
4	Profonde
5	Profonde

#### Types de traitement protecteur

On appelle traitement toute application d'un produit protecteur du bois, selon la procédure appropriée, pour empêcher l'attaque d'agents de dégradation (traitement préventif) ou bien éliminer les agents qui l'ont déjà attaqué (traitement curatif).

On peut les appliquer sur le bois avant ou après sa mise en œuvre. Les traitements peuvent être préventifs ou curatifs.

#### Traitements préventifs

Ils s'appliquent sur le bois humide ou sec, avant ou après la mise en œuvre, pour éviter l'attaque d'agents destructeurs biotiques ou abiotiques.

Bois avant la mise en œuvre

- ▶ Traitement superficiel par immersion brève
- ▶ Traitement superficiel par pulvérisation ou aspersion
- ▶ Traitement superficiel avec pinceau
- ▶ Traitement en profondeur par immersion prolongée
- ▶ Traitement en profondeur par double vide
- ▶ Traitement en profondeur par imprégnation sous pression en autoclave

Bois déjà en œuvre

- ▶ Traitement superficiel par pulvérisation ou aspersion
- ▶ Traitement superficiel avec pinceau
- ▶ Traitement en profondeur par injection sous pression

### Traitements curatifs

Ce sont des traitements spécifiques pour les bois, neufs ou vieux, déjà attaqués par des organismes xylophages. Ils ont pour finalité d'éliminer l'agent agresseur (agents biotiques), de freiner la détérioration amorcée par les agents abiotiques et de protéger le bois contre de nouvelles attaques.

On n'appliquera des traitements curatifs qu'aux éléments en bois déjà mis en œuvre et attaqués.

Bois déjà en œuvre

- ▶ Traitement superficiel par pulvérisation ou aspersion
- ▶ Traitement superficiel appliqué au pinceau
- ▶ Traitement en profondeur par injection sous pression

### Traitements spécifiques contre les agents biotiques

**Traitement contre les champignons.** On s'intéressera aux parties du bâtiment qui réunissent des conditions favorables à la manifestation de ces attaques, c'est-à-dire les zones à risque d'humidité, notamment les zones encastrées dans les murs ou en contact avec eux et avec le terrain. On effectuera dans ce cas un traitement curatif, en profondeur, par injection avec un protecteur contenant un dissolvant organique. Il faudra également éliminer la source d'humidité.

**Traitement contre les insectes de cycle larvaire.** Dans les endroits où l'on détectera une attaque d'une certaine intensité, on devra appliquer un traitement curatif, profond, par injection, et dans les autres parties susceptibles d'être attaquées, un traitement préventif superficiel suffira.

**Insectes sociaux. Termites.** Normalement, en traitant le bois en cas d'attaque de termites (*Réticulitermes*), on ne parviendra pas à éliminer la termitière qui se trouve généralement à une certaine distance du bâtiment. On essaiera donc d'isoler le bâtiment et

Type de traitement – Méthode de traitement – Type de protecteur					
Classe de risque	Exposition humidification	Type de protection	Produits	Quantité appliquée	Méthode de traitement
1 Sans contact avec le sol Sous abri	Aucune	Pas nécessaire	–	–	–
		Recommandable Superficielle	Organiques Hydrodispersables	80-120 ml/m <sup>2</sup> 80-120 ml/m <sup>2</sup>	Pinceau Pulvérisation Immersion
2 Sans contact avec le sol Sous abri	Occasionnelle	Superficielle	Hydrosolubles	50 g/m <sup>2</sup> 3,5 kg/m <sup>3</sup>	Pinceau Pulvérisation Immersion
		Recommandable Moyenne	Organiques Hydrodispersables	250 ml/m <sup>2</sup> 250 ml/m <sup>2</sup>	Pinceau Pulvérisation Immersion
3 Sans contact avec le sol À l'extérieur	Fréquente	Moyenne	Hydrosolubles	3,5-10 kg/m <sup>3</sup>	Immersion autoclave
			Produits double vide	5-15 kg/m <sup>3</sup>	Autoclave
		Recommandable Profonde	Hydrosolubles	3,5-14 kg/m <sup>3</sup>	Autoclave
4 En contact avec le sol ou l'eau douce	Permanente	Profonde	Produits double vide Créosote	25 kg/m <sup>3</sup>	Autoclave
			Hydrosolubles	– 8-15 kg/m <sup>3</sup>	Autoclave
5 En eau salée	Permanente	Profonde	Hydrosolubles	8-15 kg/m <sup>3</sup>	Autoclave



Équipement personnel pour traitements chimiques.



Injection profonde à l'aide de perforations alternées.

d'éliminer les insectes qui se trouvent à l'intérieur. Les difficultés de ces opérations dépendront de la complexité de la construction. En premier lieu, on devra dresser une barrière chimique tout autour du bâtiment pour l'isoler, en injectant le produit insecticide dans le terrain et au pied des murs. On traitera ensuite en profondeur tous les bois : piliers, poutres, ferme, menuiseries des portes et fenêtres, etc. Ces traitements sont coûteux et très agressifs pour le bois.

Un nouveau traitement mis au point récemment donne, semble-t-il, d'excellents résultats. Il consiste à poser des appâts de cellulose traités avec un inhibiteur de la chitine. Ce traitement semble arriver à éliminer complètement la termitière. Il est moins agressif que le système traditionnel car il n'est pas nécessaire de percer le bois et de placer des valves à injection tous les 30 cm sur toutes les pièces ligneuses.

#### Traitements contre les agents de dégradation abiotiques

**Traitements contre la photo-dégradation.** On utilisera des vernis ou, mieux encore, des lasures, c'est-à-dire des produits huileux de finition du bois, neuf ou vieux, à pore ouvert. La principale caractéristique des lasures est qu'elles ne forment pas de pellicule à la surface du bois, d'où l'absence de dégradation. Leur action protectrice insecticide et fongicide est moins puissante que celle des fonds protecteurs, mais les pigments minéraux qu'elles contiennent (oxydes métalliques résistants à la photo-dégradation) réfléchissent les rayons ultraviolets responsables du grisaillement du bois.

**Traitements contre le feu.** On pourra intervenir par l'ignifugation profonde de produits qui réduisent l'inflammabilité, retardent la combustion comme le sulfate d'ammonium, le borax et quelques autres. Une autre possibilité consiste à recouvrir le bois de matériaux ayant un bon comportement au feu, tels que les peintures ignifuges ou intumescentes et le plâtre, entre autres, mais qui ont l'inconvénient de cacher le bois.

## Les méthodes et les substances pour le traitement et la réparation des éléments de bois. Expériences égyptiennes

Les recherches qui ont été faites dans le traitement et la remise en état des éléments de bois en Égypte constituent des contributions remarquables à la longue expérience de la conservation de l'héritage de ces éléments. Parallèlement, elles ont permis de déterminer des méthodes ainsi que des solutions appropriées pour la restauration lorsque les éléments de bois ont été exposés à des facteurs de détérioration et de destruction tels que les facteurs chimiques, physiques, biologiques et environnementaux. De ce fait, il est utile de connaître les principes de base que les restaurateurs égyptiens avaient l'habitude de prendre en compte et qui résultaient d'une longue expérience dans un domaine essentiel :

1. Effectuer le processus de réparation et de restauration uniquement pour les éléments qui ont vraiment besoin de ce processus et qui ont été exposés à la destruction ou à la perte de certaines de leurs parties ;
2. Effectuer une étude détaillée des différents aspects de la destruction avec une documentation précise du cas afin de déterminer les types de destruction ou de dommages ainsi que la manière dont ils affectent le cas ;
3. Effectuer les expérimentations préliminaires avec les substances utilisées dans le traitement sur un échantillon du même type de bois que l'élément historique ;
4. Utiliser de façon précise les nouvelles substances chimiques afin de s'assurer que les éléments de bois qui ont été traités ne seront pas à nouveau menacés à l'avenir ;
5. Disposer d'un spécialiste de la restauration très qualifié et possédant une longue expérience qui devra être choisi afin d'effectuer la restauration et la remise en état ;
6. Utiliser les toutes dernières technologies pour aider à effectuer le traitement ou la restauration dans les meilleures conditions.

Les dommages qui peuvent affecter les éléments de bois peuvent être résumés de la manière suivante :

1. Gauchissement ou fentes résultant directement des changements des contenus d'humidité suite à des modifications des conditions de l'environnement ;
2. Infection due aux insectes ou aux champignons.

Wahid EL-BARBARY

Architecte

Directeur général des projets de secteur du Conseil suprême des Antiquités, Égypte



### Les meilleures méthodes de traitement du gauchissement et des fentes

**1. Les méthodes mécaniques.** Leur efficacité a été prouvée pour des bois d'une très faible épaisseur décorés à l'aide de substances ou non décorés. Le gauchissement et les fentes dans ces cas représentent d'importants dangers qui menacent les substances nourricières et risquent d'endommager les couleurs. Ces méthodes requièrent des périodes convenables dans de bonnes conditions pour éviter que l'élément ne gauchisse à nouveau dans le cas où il serait exposé aux mêmes conditions environnementales qui avaient constitué la cause précédente.

**2. Les méthodes chimiques.** Leur efficacité a été prouvée dans les cas où elles ont permis de conserver une quantité d'humidité interne à l'élément de bois comparable à la quantité d'humidité externe, de l'environnement, et ceci en utilisant des cires mélangées pour stabiliser ces cas de relation entre l'élément et son environnement. Il s'agit dans ces cas-là de renforcer l'élément de bois par l'application d'une peinture ou la réalisation d'injections en utilisant des huiles essentielles qui aident à faire baisser la quantité d'humidité dans le bois. Toutefois, les opérations d'injection ont plus de chance d'être couronnées de succès que la peinture parce qu'elles conservent la quantité d'humidité dans les parties principales du bois qui sont exposées aux fissurations causées par les tensions et les contraintes, et ce plus particulièrement par temps sec.

Les polymères (aux taux industriels mélangés dans des compositions organiques) sont aussi utilisés dans les parois des

cellules de bois d'éléments gauchis. Ces polymères peuvent être des produits au phénol-formaldéhyde, qui donnent les meilleurs résultats en stabilisant la forme du bois courbé, et ceci du fait de leurs qualités qui leur permettent d'atteindre la partie profonde des éléments de bois.

**3. Le renforcement des éléments de bois affaiblis.** Les restaurateurs tendent à utiliser des substances chimiques modernes du fait de leur efficacité sur le long terme pour conserver les éléments de bois. Toutefois, comme nous l'avons mentionné auparavant, il y a deux manières de renforcer les éléments de bois affaiblis :

1. La méthode mécanique ;
2. La méthode chimique.

La plupart du temps, il est suffisant d'utiliser les méthodes chimiques. Toutefois, dans certains cas, l'élément de bois requiert aussi un traitement mécanique, qui permet d'augmenter le degré de stabilité et de redonner de la force au corps de l'élément. Cela dépend en fait des conditions mêmes de l'élément de bois.

**Traitement des éléments de bois infectés par des insectes**

**Premièrement** : la résistance par les moyens naturels

La résistance dépend des facteurs climatiques qui permettront de faire cesser l'activité des insectes.

1. Chaleur
2. Lumière
3. Humidité
4. Pression atmosphérique

**Deuxièmement** : la résistance par les moyens mécaniques

1. Utiliser des pièges pour attirer les insectes.
2. Construire des barrières et des trous dans les lieux de passage des insectes.
3. Ramasser les œufs des insectes à la main.
4. Tuer l'hôte dont dépendent les insectes pour leur nourriture.

**Troisièmement** : résistance par les moyens chimiques

Cette méthode est considérée comme étant la meilleure. Il s'agit d'utiliser des pesticides ayant des caractéristiques spéciales qui comprennent l'effet continu pour une période convenable, et qui ne sont pas dangereux pour l'élément de bois. L'utilisation de cette méthode doit durer au moins deux années consécutives pour s'assurer que les insectes ont bien été exposés au produit à tous les stades de leur développement.

Cette méthode chimique de résistance est utilisée à l'aide de trois techniques concrètes :

1. La pulvérisation du pesticide à l'aide d'un pulvérisateur doté de pompes spéciales, lorsque l'usage d'une brosse est difficile ;
2. L'immersion dans le pesticide liquide ;
3. L'enfumage.

**Traitement des éléments de bois infectés par des champignons**

Les champignons sont eux-mêmes affectés par l'humidité, par les températures élevées ainsi que par la lumière dans l'environnement. Ces éléments affectent en effet leur capacité de génération. Les éléments de bois peuvent donc être enfumés en utilisant des pesticides. Il en existe deux catégories :

1. Les pesticides qui sont solubles dans l'eau ;
2. Les pesticides qui ne sont pas solubles dans l'eau ; et il est préférable d'utiliser ces derniers.

**Les pesticides utilisés doivent remplir les conditions suivantes :**

1. Ils doivent avoir une haute efficacité et un effet relativement long ;
2. Ils doivent être capables d'atteindre facilement les cellules des petits insectes ;
3. Ils ne doivent pas laisser de traces sur l'élément de bois traité.

