



Outil 6

Comprendre les processus de dégradation des matériaux

Reconnaissance des types d'humidité : causes et lésions produites

Soledad GARCÍA MORALES
Docteur architecte
Université polytechnique de Madrid, Espagne

Introduction

Le bâtiment de construction traditionnelle méditerranéenne n'est pas une construction imperméable ni étanche. Cette affirmation élémentaire peut servir de cadre de référence pour aborder brièvement l'étude des problèmes que l'eau peut produire lorsqu'elle est au contact de ce type de constructions. En effet, aussi bien les fondations que les murs ou les matériaux de couverture ont été conçus et exécutés au fil des siècles en tenant compte du fait que leurs matériaux pouvaient absorber l'humidité, ce qui impliquait qu'ils devaient aussi pouvoir la laisser s'évaporer. L'équilibre entre les deux flux (celui d'absorption et celui de désorption), qui est déterminé par les conditions climatiques et microclimatiques, est ce qui a constitué le succès d'une certaine solution typologico-constructive.

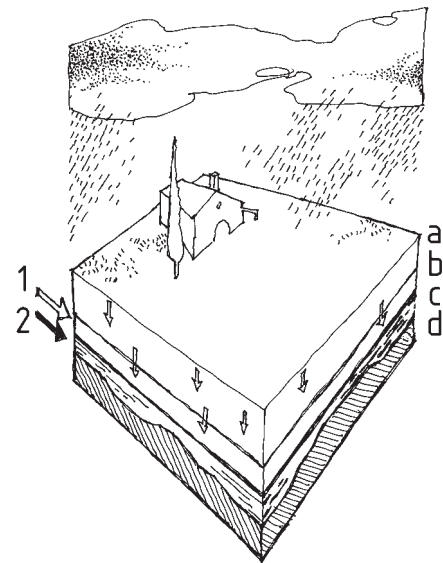
Quelles sont les *sollicitations hydriques* auxquelles est soumis l'ensemble du bâtiment et de ses éléments ? Une première classification divise les types d'humidité en fonction de l'origine de l'eau : vient-elle du terrain, de la pluie ou de l'usage ? Cette division peut cependant être davantage nuancée si l'on introduit le facteur du mode de pénétration : à pression ou sans pression, de manière intermittente ou constante, etc. Comme on le verra, cette nuance est intéressante parce que les critères d'intervention seront clairement orientés en fonction de la réponse que l'on obtiendra à ces questions.

1. Humidité provenant du terrain

Les types les plus fréquents d'humidité provenant du terrain sont les suivants :

- ▶ l'eau de la nappe phréatique ;
- ▶ l'eau de la couche capillaire ;
- ▶ l'eau de la couche d'imbibition (eau de pluie absorbée par le terrain) ;
- ▶ l'eau de pluie coulant en surface qui filtre par le revêtement, donnant lieu à une « fausse » humidité du terrain ;
- ▶ les faux niveaux phréatiques, aussi connus comme « eaux perdues » ou « eaux dispersées ».

Pour définir complètement les états pathologiques éventuels dont ces formes de présence d'humidité sont à l'origine, il est tout



Strates du terrain (1. Strate phréatique ; 2. Strate capillaire ; a. Zone d'imbibition ; b. Couche de terrain humide ; c. Eaux souterraines ; d. Terrain imperméable).

d'abord nécessaire de définir les états de sollicitation, c'est-à-dire les facteurs que l'on va considérer comme des *charges hydriques* sur le terrain. Les plus fréquents sont les suivants :

- ▶ la quantité d'eau que le terrain contient ;
- ▶ la pression que l'eau exerce.

2. Quantité d'eau dans le terrain

Le mode normal pour exprimer la quantité d'eau du terrain est son contenu en eau exprimé en pourcentage, qui représente la masse d'eau par unité de masse de terrain sec :

$$w = M_w / M_s (\%)$$

Ce contenu est défini en mesurant la perte d'eau que subit le sol en le séchant pendant 24 heures dans un four à 105-110 °C (Norme BS 1377). Ces valeurs oscillent en général autour de 5 %

pour le gravier et le sable, et autour de 50 % pour les terrains cohésifs de grain fin (argiles).

Une autre manière pour évaluer le degré d'humidité est le degré de saturation S_r . Il s'agit du pourcentage de trous du sol pleins d'eau par rapport au total du volume poreux de celui-ci. Le degré de saturation n'est pas un terme comparatif de certains sols par rapport à d'autres, mais il permet de mettre en rapport le contenu d'humidité avec la forme de la pénétration, parce que le degré de saturation augmente dans la mesure de l'importance de la pression avec laquelle l'eau est introduite au travers du terrain.

On utilisera indistinctement les deux expressions pour décrire les états de sollicitation.

6

3. Pression de l'eau dans le terrain

La pression de l'eau dans un terrain est exprimée par les termes de *pression de pore* (et avec l'unité n), qui est définie comme étant l'excès de pression dans le pore, au-delà de la pression atmosphérique.

4. Sollicitations dues au niveau de la nappe phréatique

Les sols situés sous le niveau de la nappe phréatique sont saturés, c'est la *strate saturée* : leur degré de saturation S_r est de 100 %. L'eau dans cette strate a une certaine pression et sera à l'origine, dans le cas où elle entrera en contact avec un élément constructif enterré, de sollicitations intenses dans lesquelles l'apparition des lésions pourra se produire avec un écoulement goutte à goutte ou par un ruissellement de l'eau sur le parement.

Les strates en contact avec la nappe phréatique s'humidifient par capillarité depuis celle-ci, ce sont *les strates mouillées*. Leur degré de saturation est proche de 100 % à la limite avec la nappe phréatique, et il décroît à mesure que l'on s'éloigne d'elle. Le degré dépend de nombreux facteurs (porosité, tension superficielle, etc.) : il y a des terrains peu capillaires, dont la zone mouillée a une faible épaisseur (terrains de gros grains et de trous supérieurs à 0,5 mm), alors que d'autres, dont les pores sont plus fins, contiennent de l'eau sur plusieurs mètres de profondeur.

La profondeur de cette zone de saturation partielle, la *zone capillaire*, constitue le *niveau capillaire*, et elle ne peut être mesurée que de manière approximative à l'aide de formules empiriques en fonction de la perméabilité K .

Au-dessus du niveau capillaire, il existe en outre une couche de terrain humide, qui ne contient pas d'eau liquide mais de la vapeur d'eau qui se diffuse dans l'atmosphère, c'est la *zone d'évaporation*. La teneur en humidité est continue, et elle présente des degrés de saturation décroissants vers l'extérieur. Il peut aussi

avoir une humidité discontinue sous forme de traces d'eau aux points de contact entre les grains.

En ce qui concerne les pressions d'eau dans ce type de sollicitation, on dit qu'il existe une pression lorsque le terrain est détrempe, c'est-à-dire en dessous du niveau de la nappe phréatique.

Au-dessus du niveau de la nappe phréatique, la strate capillaire s'humidifie par succion (pression négative) du fait de l'attraction superficielle entre le terrain et l'eau (tension inter-faciale).

Le niveau de la nappe phréatique en tant que sollicitation implique une présence d'eau avec une certaine pression agissant sur une vaste zone des fondations ou sur les parties enterrées du bâtiment. Il s'agit d'une sollicitation non ponctuelle en extension, et non occasionnelle en durée. Elle n'apparaît pas seulement aux moments de pluie, bien qu'une période de précipitations plus longues elle ait des répercussions sur l'augmentation du débit.

L'humidité provenant de la nappe phréatique apparaît généralement dès le moment de l'excavation, lorsque l'on atteint la strate de terrain saturé, et que l'eau commence alors à couler par la surface de ruissellement en inondant les tranchées. Ce type de lésions est fréquent dans les bâtiments proches de cours d'eau, ou construits précisément sur une couche aquifère superficielle. La nécessité fonctionnelle ou symbolique forçait à l'occasion à situer les constructions dans ces lieux, et évidemment l'humidité



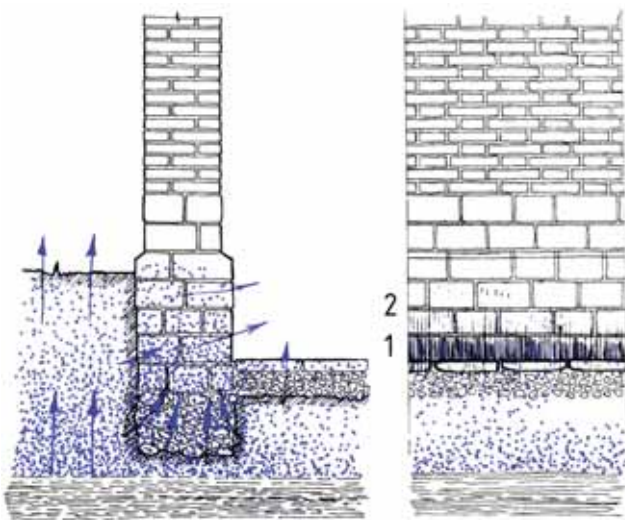
Canaux et canalisations d'eau du niveau de la nappe phréatique dans un ermitage espagnol.

devenait un facteur permanent. C'est pour cela qu'il était fréquent de construire des systèmes de conduction et de drainage de ces courants, de telle manière que les lésions étaient réduites au minimum. La longue tradition permettait très souvent de domestiquer l'eau grâce à des inventions magistrales par leur simplicité et leur sagesse. Les galeries, puits, conduites, citernes, roues à eau, etc. ne sont que quelques noms d'éléments faisant partie d'une longue « culture de l'eau ». Nos ancêtres savaient bien que l'eau, si elle court, fait peu de dommages. De fait, les systèmes n'ont cessé de fonctionner qu'au moment où les engorgements, les déviations ou les ruptures ont gâché les solutions qui avaient été conçues à l'origine. Lorsque cela se produit, la proximité du niveau phréatique par rapport aux fondations enterrées ou au sous-sol peut se présenter sous diverses formes, qui seront les types de sollicitation que nous exposerons ci-dessous.

- I. Sollicitation phréatique pure
- II. Sollicitation de « capillarité pure »
- III. Sollicitation due au terrain seulement « humide »

I. Sollicitation phréatique pure

C'est le résultat de l'enfoncement de l'enveloppe ou des fondations jusqu'au niveau phréatique lui-même. Comme il s'agit d'un flux permanent, et que les pressions de l'eau sont importantes, c'est le problème le plus grave. Dans le mur enterré, et/ou le socle, s'il existe, on voit apparaître les zones indiquées ci-dessous (qui se distinguent par leur contenu en eau).



Sollicitation due à la strate capillaire dans les fondations d'un ouvrage en pierre de taille (1. Zone mouillée ; 2. Zone humide).

Les zones de pénétration ponctuelle de l'eau sous pression. Les joints, les fissures, les trous, etc. sont les points faibles quant à la résistance au passage de l'eau sous pression. C'est pour cela que la pénétration commence dans ces zones (ce sont les écoulements d'eau).

Les zones de matériau saturé d'eau. Autour des points de pénétration, et dans les zones les plus proches de l'eau, le matériau se sature.

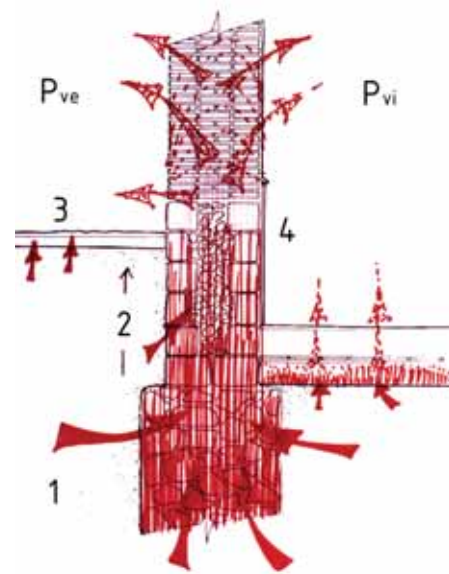
Les zones de matériau mouillé. Autour des précédents.

Les zones de matériau humide. Celles qui entourent les zones mouillées. Les zones seulement humides ne présentent pas, parfois, la tache caractéristique mais seulement un léger obscurcissement, pas toujours appréciable à simple vue.

Le degré de contenu en eau produit par la nappe phréatique se manifeste en permanence, sans coïncider avec de quelconques déchargements d'appareils, des pluies récentes, des ruptures de canalisation, etc. Les seules variations sont de type saisonnier, et elles produisent des oscillations dans la hauteur du niveau de l'eau du terrain.

II. Sollicitation de capillarité pure

Dans ce cas, les fondations, ou le mur, sont implantées non dans la strate saturée et sous pression mais dans la strate immédiatement supérieure qui, comme nous l'avons décrit, n'a



La hauteur atteinte par l'humidité de capillarité dépend de divers facteurs (P_{ve} . Évaporation extérieure (+ convection) ; P_{vi} . Évaporation intérieure (augmentation humidité relative) ; 1. Zone capillaire superficielle ; 2. Sens du flux ; 3. zone imperméabilisée ? ; 4. L'eau remonte au-dessus du socle).



Remonte capillaire.

que de l'eau retenue par capillarité, sans pression. La pénétration se produit alors par des mécanismes de tamponnement capillaire. Il se produit une succion capillaire depuis le terrain vers le mur. La diminution de l'énergie superficielle libre du système qui se produit lorsque l'eau abandonne le terrain et s'étend dans les pores des matériaux des fondations est le mécanisme déclenchant du phénomène, par ailleurs si habituel, qui est à l'origine des traces d'humidité des murs de sous-sol ou de rez-de-chaussée même s'il n'y a pas d'eau retenue ni de terrain saturé à proximité.

Ce type de sollicitation produit un degré d'humidité dans les fondations ou le mur de sous-sol, le socle, etc., qui se caractérise par un contenu en eau *moindre* que dans le cas d'eau sous pression. Les matériaux en contact avec le terrain ne parviennent pas à saturer d'eau, et par conséquent la distribution qui découle de ce contact est moins extensive et moins intensive. Et même, si l'épaisseur du mur est suffisamment importante, la tache humide ne sera pas perceptible sur la partie visible du mur. Cela signifie que l'eau se déplace par capillarité et passe sous forme de vapeur *dans le mur*, poursuivant ensuite son chemin par diffusion de vapeur.

Cette sollicitation reçoit le nom de *capillarité pure* parce que dans ce cas l'eau qui pénètre manque de pression positive : il s'agit simplement d'un mécanisme de *succion*. Pour interrompre la pénétration, il suffirait d'empêcher le contact du terrain avec les fondations en créant *une chambre d'aération* dans laquelle l'eau pourrait s'évaporer et être éliminée avant de toucher le bâtiment. Les zones qui apparaîtront dans le mur sont les suivantes :

- ▶ la zone mouillée ; et
- ▶ la zone humide.

et elles présenteront les mêmes conditions que dans les cas précédents.

La hauteur atteinte par l'humidité de capillarité dépend de divers facteurs. En principe, la tache cesse d'augmenter au moment où la quantité d'eau qui est absorbée depuis les fondations devient égale à la quantité d'eau que le mur évapore. C'est pour cela que plus la capacité d'évaporation du mur est importante moins la hauteur le sera. Comme la vitesse d'évaporation dépend de l'humidité relative de l'environnement, de la température, de la porosité et de la perméabilité des matériaux, etc., ce seront ces paramètres qui définiront la sollicitation. Si le flux d'évaporation est important, l'eau n'atteint pas des hauteurs importantes. En supposant que la perméabilité du matériau soit constante, plus l'humidité relative de l'environnement extérieur sera faible, et plus l'extension de la zone mouillée et de la zone d'évaporation sera faible aussi. Dans le cas contraire, si l'on imperméabilise le soubassement d'un mur grâce à un revêtement empêchant l'évaporation, l'eau remonte en général au-dessus de la zone

impermeabilisée, à la recherche d'une nouvelle surface d'évaporation pour atteindre un nouvel équilibre.

Dans un mur traditionnel, bien ventilé, la tache ne dépasse pas en général 30 à 40 cm. Lorsque la hauteur est plus importante, c'est le plus souvent parce qu'il y a un problème supplémentaire (contamination hygroscopique des matériaux, la plupart du temps) qui masque la capillarité.

L'enveloppe (mur extérieur) du bâtiment ne sera pas la seule partie affectée par l'humidité de capillarité ascendante sinon que tout élément dont les fondations s'enfoncent jusqu'à la strate capillaire devra présenter des lésions de ce type.

L'eau ne monte pas de manière uniforme sur toute la section du mur. S'il s'agit, par exemple, d'un mur de maçonnerie avec du mortier, il est fréquent que la succion soit plus facile par le mortier que par la maçonnerie, ou même par la superficie de contact entre les pierres et le mortier, lorsqu'il y a une mauvaise adhérence entre eux. Les lignes ou les surfaces par lesquelles l'eau monte avec une plus grande facilité sont les joints sans appareil. C'est pour cela qu'il est fréquent de trouver de plus grandes hauteurs de l'humidité au niveau des joints verticaux qui sont créés entre des maçonneries distinctes, lorsqu'il n'y a pas d'assemblage entre elles (par exemple, entre des murs de maçonnerie et des contreforts de pierres de taille, s'ils n'ont pas été appareillés).

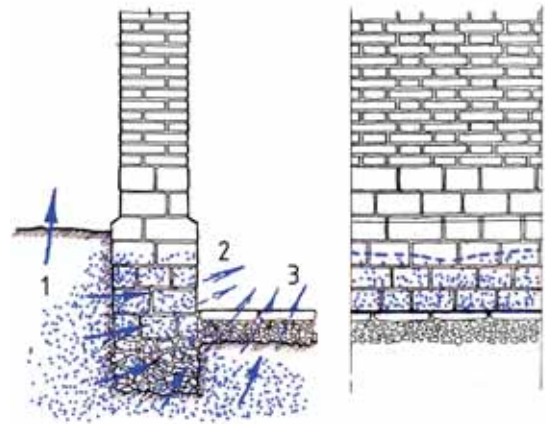
III. Sollicitation due au terrain seulement humide

Après avoir expliqué la manière dont l'eau provenant de la nappe phréatique monte par capillarité à un niveau supérieur (niveau capillaire), et de là se répand sous forme de vapeur au travers des strates sèches, à la recherche de l'air libre (processus d'évaporation), il suffit de décrire comment la présence d'un terrain humide, ou d'autres sources de vapeur d'eau, peut affecter les murs.

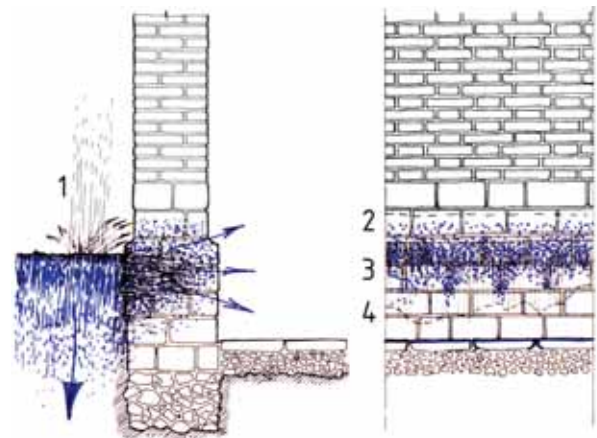
Il s'agit d'un cas fréquent, car tout terrain possède un certain degré d'humidité due :

- ▶ à l'eau qui s'évapore depuis une strate mouillée vers l'atmosphère ;
- ▶ à l'eau de pluie filtrée qui, à la fin de la précipitation, cherche à s'évaporer ; et
- ▶ à l'eau rémanente dans le terrain, provenant de fuites, de l'arrosage, etc.

L'eau retenue à l'origine dans le terrain par capillarité peut se déplacer s'il y a une différence de pressions de vapeur entre le terrain et l'air libre : l'eau se diffuse sous forme de vapeur (on dit que *le terrain évapore*). Un mur ou un socle enterré dans une strate humide se convertit au moins en évaporateur de cette humidité. Tout le monde sait parfaitement que les grottes, les cryptes, etc. sont des lieux humides et frais même lorsque l'on n'y



Sollicitation due au terrain seulement humide (1. Terrain humide ; 2. Évaporation ; 3. Matériaux humides).



L'eau de pluie absorbée par le terrain (1 Pluie ; 2. Zone humide ; 3. Zone mouillée ; 4. Zone humide).



Détérioration des revêtements.

voit aucune trace d'humidité.

Les contenus en humidité sont moindres que dans les autres cas, et l'on a seulement une zone :

- ▶ *la zone de matériau humide*, qui peut parfaitement ne présenter aucune trace d'humidité, sinon seulement la détérioration des matériaux ou des revêtements.

5. Sollicitations dues à l'eau de pluie directement absorbée par le terrain

6

Les diverses formes de sollicitation de ce chapitre peuvent être réunies en deux groupes :

- ▶ la sollicitation de l'eau de pluie absorbée par les terrains perméables ; et
- ▶ la sollicitation des eaux dispersées.

IV. L'eau de pluie absorbée par le terrain

Lorsque le terrain est perméable à l'eau de pluie, les strates supérieures l'absorbent et filtrent vers le bas (*eau filtrée*), en fonction de la perméabilité. Sur son chemin, l'eau mouille le terrain en définissant des degrés de haut en bas. Une partie de l'eau est retenue dans le terrain par capillarité, alors que l'autre partie filtre vers les strates inférieures imperméables.

Dans les terrains qui sont très perméables, l'eau est absorbée rapidement. Dans les terrains argileux, la filtration est lente et l'eau parcourt de grandes distances à l'horizontal, du fait de sa difficulté à pénétrer dans le terrain. Pour cette même raison, le contact avec le mur enterré ou avec les fondations est plus important dans le cas d'un terrain imperméable.



L'eau de pluie absorbée par le terrain.

Par conséquent, le contenu en eau d'un terrain dans ses différentes couches est variable tant que les échanges avec l'atmosphère (pluie et évaporation) ne sont pas empêchés par le revêtement du sol.

On peut assimiler cette sollicitation à celle de capillarité pure, car elle produit les mêmes zones dans le mur :

- ▶ une zone mouillée ; et
- ▶ une zone humide.

à la différence près qu'il s'agit ici d'un phénomène qui coïncide avec les précipitations et, en général, d'apparition rapide, qui disparaît avec l'évaporation du terrain. En outre, les taches présentent une zone plus intense qui coïncide avec la cote du revêtement du sol ou avec la zone dans laquelle l'eau est retenue. On peut observer comment la détérioration des peintures murales a commencé depuis le haut, dans la ligne qui coïncide avec le terrain situé de l'autre côté du mur.

V. Les eaux dispersées

Parfois, la composition des strates du terrain ne permet pas à l'eau tombée à l'occasion des précipitations d'atteindre la nappe phréatique. L'eau pénètre tout d'abord par une première strate perméable, atteint ensuite une couche imperméable sous la première, et se répand enfin sur la surface de celle-ci en constituant des lignes de courant qui se trouvent *au-dessus de la nappe phréatique*. On les appelle les *eaux dispersées*, et ce sont des courants qui se forment rapidement et qui suivent des lignes de peu de résistance dans le terrain (fissures dans des terrains rocheux, lignes de fracture, zones sableuses dans des terrains argileux, cavités ou tranchées artificielles, zones de remplissage, etc.), sans parvenir à constituer une strate détrempée. En suivant ces lignes, de grandes quantités d'eau peuvent atteindre des points éloignés en peu de temps, ce qui produit des sollicitations



Les eaux dispersées.

localisées d'eau ayant un débit et une pression variables en fonction du type de précipitation qui en est à l'origine.

Dans une strate avec des eaux dispersées, on trouve des contenus variables en eau ; plus importants dans la ligne du courant, et moindres dans les zones plus éloignées. Il peut se créer des poches avec des pressions importantes, ce qui constitue un type de sollicitation dangereux, qui se confond parfois avec la nappe phréatique.

Un type de terrain dangereux de ce point de vue est celui qui a des zones ayant perdu leurs fins à cause du lavage et qui se convertissent en strates très perméables. Ces strates agissent alors comme des drains naturels au sein d'un terrain plus imperméable. Le phénomène est connu comme *érosion interne* ou *piping*, et il est dangereux parce que ces lignes de flux préférentielles peuvent conduire des débits et des pressions élevés, et laver des zones de terrain qui, par la suite, produiront des assises pour les constructions construites sur elles.

Quant à la formation de *poches d'eau*, il s'agit de zones de dépression dans des terrains peu perméables. Ces poches se remplissent d'eau de pluie et, en fonction du débit versé, peuvent atteindre des niveaux de charge hydrostatique élevés et difficiles à évacuer. La rupture de l'une de ces poches souterraines peut produire des pénétrations importantes en débit et en pression.

Il est aussi relativement fréquent de rencontrer, dans des zones de construction historique, des citernes enterrées pour le recueil des eaux de pluie, ainsi que des vestiges de canalisations semi-obstruées et inutilisées. Tous ces éléments sont potentiellement capables d'agir comme des poches d'eau dans le terrain, dans le cas où ils seront atteints par un quelconque type de courant souterrain.

Dans la construction plus récente, le point faible pour la création de poches est en général constitué par les tranchées ouvertes autour des fondations, qui sont comblées à la fin des travaux. Cependant, comme le remplissage n'a pas, en général, la même compacité que le sol naturel et que, en outre, le mouvement naturel de l'eau est interrompu par la présence de murs du sous-sol, de murs-écrans, etc., la tranchée se transforme finalement en poche potentielle pour les eaux de pluie qui tombent aux alentours du bâtiment. Si l'on tient compte, de surcroît, du fait que cette ceinture périmétrale est en général utilisée, dans les petits bâtiments indépendants, pour y verser l'eau recueillie sur la couverture, et parfois même pour arroser les jardinets entourés de murets, le résultat peut être tout à fait négatif.

Quelle que soit la forme d'évolution des eaux dispersées, les zones qu'elles peuvent produire dans le mur enterré sont les suivantes :

- ▶ *une zone de pénétration ponctuelle sous pression* ;
- ▶ *une zone saturée*, proche du point où l'eau aura sa plus grande charge ;

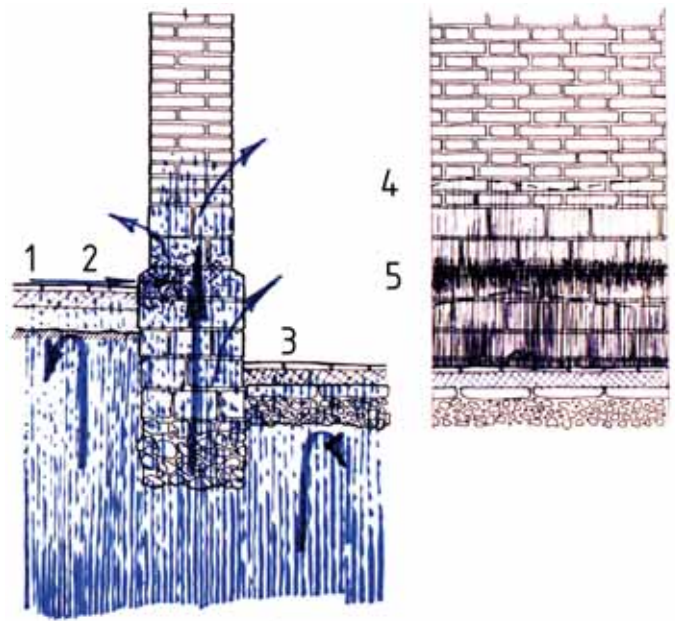
- ▶ *une zone mouillée* ; et
- ▶ *une zone humide*.

Or, cela pourrait être confondu avec la sollicitation de la nappe phréatique. La différence réside dans le fait que, ici, il s'agit de phénomènes temporaires, coïncidant avec la pluie, la rupture de citernes à cause de travaux, le manque de drainage et d'imperméabilisation adéquats dans les sous-sols au cours de la construction desquels on n'a pas suffisamment pris en compte la présence d'une nappe phréatique, etc.

6. Le cas particulier des terrains revêtus

Lorsqu'on limite dans le terrain la capacité d'échange avec l'ambiance du fait du revêtement de sol, les contenus en humidité sont modifiés.

- ▶ La nappe phréatique ne reçoit pas d'apports de pluie proche, et par conséquent son débit se nourrit d'eaux de pluie tombées à une certaine distance. C'est la raison pour laquelle il est logique de supposer des variations de son niveau uniquement saisonnières.
- ▶ La saturation de la zone capillaire et de la zone d'évaporation augmente parce que l'évaporation est limitée : le degré de saturation de vapeur dans les pores du terrain est supérieur et,



Terrains revêtus (1. Pavement imperméable ; 2. Transport d'eau de pluie vers la base des bâtiments ; 3. Pavement imperméable ; 4. Élévation zone d'évaporation ; 5. Pénétration au niveau du pavement extérieur).

en général, l'humidité des couches supérieures augmente et devient assez stable.

- ▶ S'il y avait des fuites ou des pénétrations d'eau ponctuelles et accidentelles, la difficulté de l'évaporation produirait une rétention de l'eau absorbée. Tout défaut de drainage, fuite de réseau d'adduction d'eau ou de tout-à-l'égout constitue un problème d'humidité sauf dans les cas où le terrain est facilement drainant.
- ▶ Un terrain disposant d'un revêtement peut être considéré comme un cas extrême d'eaux dispersées au parcours superficiel. Si le drainage superficiel n'est pas bien résolu, le revêtement peut répercuter de manière négative en transportant toute l'eau de pluie vers la base des bâtiments, ou former des flaques d'eau ou des mares qui présentent toujours une plus grande pénétration que l'eau en mouvement.

6

On considère donc le terrain revêtu (rues, places, etc.) aux alentours des bâtiments non imperméables comme un facteur de risque à deux niveaux :

- ▶ en surface, parce que toute l'eau de pluie se déplace comme des eaux dispersées ;
- ▶ en sous-sol, parce que la difficulté de l'évaporation de toute fuite ou pénétration prolongera la rétention d'eau et fera augmenter le degré de saturation du terrain.

Ce cas se présente avec une relative fréquence dans les villages ou les villes dans lesquels les rues et les places ont été récemment revêtues. L'ancien équilibre établi entre les bâtiments et leur environnement –qui faisait que tant les unes que les autres collaboraient aussi bien à l'absorption de l'eau de pluie qu'à son évaporation– est rompu et apparaissent, avec une certaine fréquence, des taches d'humidité dans les socles de bâtiments qui

n'avaient pas été conçus pour résister à la sollicitation de grandes quantités d'eau de pluie.

7. Humidité de condensation hygroscopique

Il s'agit d'une altération des matériaux qui modifie leur comportement par rapport à l'eau (liquide ou sous forme de vapeur), en aggravant les lésions dues à l'humidité et en compliquant leur diagnostic. La cause réside dans la contamination des matériaux par des sels *hygroscopiques*, qui sont des substances chimiques solubles dans l'eau et qui présentent une grande avidité pour l'eau, avec laquelle il se combinent pour former des sels hydratés.

Les sels pénètrent dans les bâtiments en étant dissouts dans l'eau (du terrain, des infiltrations, etc.). Lorsque le mur s'évapore, les sels sont retenus dans le réseau poreux des matériaux, et ils cristallisent en perdant l'eau d'hydratation. S'ils perdent l'eau totalement, il se forme une poudre blanchâtre, ou une croûte, ou encore une sorte d'excroissance spongieuse de sel, que l'on appelle efflorescence. Lorsque les conditions environnementales d'humidité relative dépassent une certaine valeur (variable pour chaque type de sel), le dépôt commence à adsorber la vapeur d'eau et le sel s'hydrate. Certains sels sont capables de s'hydrater avec une telle quantité d'eau qu'ils se dissolvent complètement en elle. De ce fait, l'élément constructif apparaît mouillé, voire même complètement saturé d'eau, et cela donne l'impression qu'il existe une forme de présence d'eau liquide qui produit cette tache, alors que la réalité est que cela est dû seulement à l'humidité de l'air agissant sur des matériaux anormalement hygroscopiques. Dans ce cas, on parle d'humidité par *condensation hygroscopique*.

Normalement, un bâtiment qui présente ce type de lésion a subi une certaine forme d'humidité « réelle » (capillarité, pluie,



Humidité par condensation hygroscopique.



Humidité par condensation hygroscopique.

inondation, etc.), qui a été le véhicule qui a transporté les sels jusqu'au mur. Mais cette forme d'humidité « réelle » peut avoir disparu, et il se peut qu'il ne reste dans le mur que les sels déposés, qui s'activent à nouveau non par la présence de l'eau du terrain mais par l'augmentation de l'humidité dans l'ambiance. La tache réapparaît alors avec sa forme ancienne, mais elle est trompeuse.

Ceci est la cause d'une grande partie de l'humidité constatée dans les bâtiments anciens ou historiques. Il s'agit d'un type de tache « qui ne disparaît jamais », et qui résiste à toute intervention de traitement traditionnel. Comme la cause est la contamination des matériaux, elle ne disparaîtra pas avant que l'on ait éliminé la présence des sels hygroscopiques.

Les sels peuvent provenir de diverses sources comme nous l'indiquons ci-dessous.

- ▶ Les nitrates proviennent de matières organiques provenant elles-mêmes de cimetières, d'étables, de décharges de résidus organiques, etc. ou de bâtiments dans lesquels ont été stockés des aliments ou des animaux, par exemple.
- ▶ Les chlorures sont traditionnellement associés à la proximité d'ambiances marines, mais on peut aussi les rencontrer dans des bâtiments qui ont été des lieux de conservation d'aliments en salaison. Par ailleurs, dans certains climats, lorsque l'on élimine la neige ou le verglas en répandant du sel (chlorure de sodium) sur les routes et les trottoirs, les murs sont en général contaminés. En dernier lieu, il y a des chlorures d'origine organique.
- ▶ Les carbonates sont associés à la dissolution des matériaux de construction ou des minéraux du terrain. Il ne sont pas en général aussi hygroscopiques que les précédents.
- ▶ Les sulfates proviennent du terrain ou de matériaux de construction. Ils sont agressifs parce qu'en cristallisant ils exercent des pressions dans les pores qui peuvent aller jusqu'à détériorer les matériaux, mais ils sont en général moins hygroscopiques que les nitrates et les chlorures.

Un symptôme caractéristique du fait que l'humidité provient de la condensation hygroscopique est que la tache disparaît lorsque l'on gratte l'enduit ou que l'on élimine les matériaux contaminés. (on peut observer comment dans la zone de mortier de joint que l'on est en train de gratter la tache d'humidité disparaît, parce que dans ce cas les sels hygroscopiques sont proches de la surface, et que le mortier sous la zone affectée apparaît sain et sec. Dans ce mur, les sels affectent aussi les briques, et dans ce cas il faudrait leur substituer des briques neuves, ce qui n'est pas toujours souhaitable comme il a d'ailleurs été décidé dans ce chantier.)

8. Humidité provenant de sources de vapeur

Une masse d'air enterrée et en principe sèche (grotte, crypte, etc.)



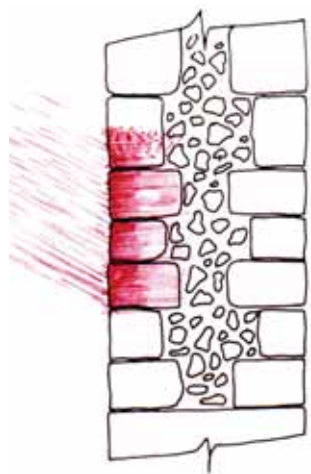
Une masse d'air enterrée et en principe sèche (grotte, crypte, etc.) attire vers elle la vapeur d'eau du terrain qui l'entoure.

attirera vers elle la vapeur d'eau du terrain qui l'entoure. Si la pression de la vapeur est élevée, la poche d'air pourra atteindre des valeurs de saturation de vapeur élevées (humidité relative élevée). Si, en outre, il y a un point de pénétration d'eau liquide, la grotte ou la crypte se saturera de vapeur à 100 %, dans le cas où les conditions se maintiendront le temps suffisant.

Dans notre tradition méditerranéenne, la grotte ou la crypte est ventilée, et nos prédécesseurs ont démontré qu'ils possédaient un savoir aussi étendu quant à la dissipation de la vapeur par convection que pour le drainage et la conduction de l'eau liquide. Lorsque ces espaces, qui ont été ventilés habituellement, sont compartimentés du fait des changements d'usage, ou de l'introduction de fenêtres trop étanches, on voit apparaître des pathologies dues à la condensation. Celle-ci se manifeste par la croissance de colonies biologiques (bactéries et champignons) sur les parements, aux points les plus froids du mur, ou les moins ventilés (angles, coins, etc.). Pour cela, il faut que l'humidité relative de l'air proche du parement soit de 80 %.

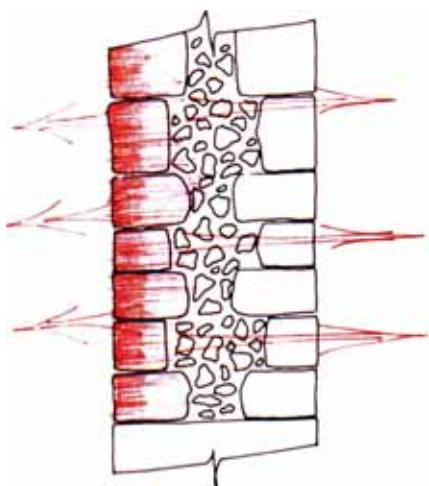
9. Humidité par filtrations d'eau de pluie

Dans la construction méditerranéenne, où le climat est habituellement sec, les bâtiments traditionnels ne sont pas spécialement protégés contre l'eau de pluie. Normalement, les matériaux sont poreux et perméables, y compris dans certaines des solutions de couverture, qui sont conçues de telle manière qu'une petite absorption d'eau dans leur masse pourra contribuer à rafraîchir l'ambiance intérieure, et par conséquent améliorer le confort.

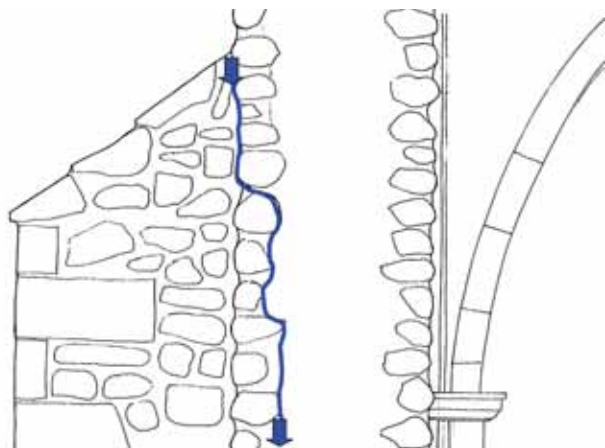


6

Eau de pluie absorbée par le mur.



L'eau absorbée pourra s'évaporer dans les périodes qui s'écoulent entre une précipitation et une autre.



Humidité par filtrations d'eau de pluie.

L'eau de pluie peut pénétrer dans les bâtiments pour l'essentiel au travers de deux mécanismes :

- ▶ par un mécanisme d'absorption et de succion au travers des pores des matériaux ; ou
- ▶ par filtration au travers des joints.

Lorsque la pluie tombe sur une terrasse ou bien coule le long d'un mur, une partie de cette eau est absorbée par les matériaux eux-mêmes ainsi que par les joints, et une autre partie se répand sur les superficies. Il y a une proportion inverse entre la quantité d'eau qui coule sur le bâtiment et celle qui est absorbée par lui.

Normalement, les enveloppes ont été conçues de telle manière que la quantité d'eau absorbée pourra s'évaporer dans les périodes qui s'écoulent entre une précipitation et une autre. Ainsi, bien que le mur se mouille, s'il a le temps de s'évaporer il n'y a pas de lésions d'importance ; et ce, même lorsque cette quantité d'eau absorbée rafraîchit les murs et les couvertures en s'évaporant, comme il a été expliqué auparavant. La seule précaution est que l'épaisseur du mur doit être suffisante pour que le front humide n'atteigne pas le parement intérieur.

Les situations pathologiques commencent à se présenter lorsque les mortiers de fixation ou de joint se détériorent, de telle manière que l'eau non seulement est absorbée dans les pores sinon qu'elle peut s'introduire par les joints entre les matériaux, et former une deuxième plaque d'égouttement qui peut parfois être interne.

Dans chaque typologie architecturale, il est important de connaître le rapport entre la quantité d'eau égouttée et d'eau absorbée qui sera optimum pour un climat déterminé, ainsi que les différentes solutions constructives. Celles-ci, en effet, font preuve d'un grand savoir pratique quant à l'expérience de la perméabilité et de la capacité d'évaporation des matériaux disponibles, ou quant au dosage et aux épaisseurs des mortiers de joint ou de revêtement.

10. Diagnostic

Une fois connues de manière générique les différentes formes d'humidité qui peuvent se présenter dans les bâtiments de l'architecture traditionnelle, on est en condition d'établir une méthodologie pour leur inspection, leur diagnostic et leur intervention.

Inspection

Les symptômes permettront d'aider à classer les lésions observées dans l'un des types d'humidité mentionnés auparavant. Parmi les symptômes, les plus importants sont les taches. De ces taches, il convient d'observer et d'analyser ce qui suit :

- ▶ leur emplacement ;
- ▶ leur taille ainsi que leur forme ;
- ▶ leur mode d'apparition ;

▶ leurs coïncidences spatiales ou temporelles.

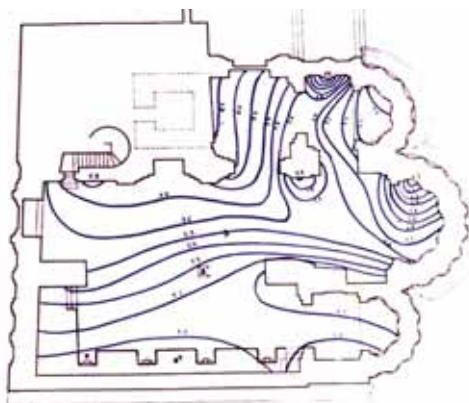
Il existe d'autres symptômes qui peuvent aussi être significatifs (couleur, odeur, efflorescences, détérioration des matériaux, etc.).

En plus de l'inspection, il est intéressant de connaître l'information suivante concernant le bâtiment, dans les cas où c'est possible :

- ▶ les renseignements historiques ;
- ▶ la documentation graphique et photographique, le cas échéant ;
- ▶ les renseignements sur les interventions ou les modifications : travaux, réparations, changements d'usage, etc. ;
- ▶ les renseignements sur l'environnement : pentes, composition et perméabilité du terrain ;
- ▶ les renseignements sur les réseaux urbains proches du bâtiment (anciens et actuels).

Toutes ces informations, comme on a pu l'analyser dans les chapitres précédents, devraient conduire à *une première hypothèse* quant à la cause de l'humidité.

Pour corroborer le fait que cette première hypothèse est correcte ou complète, on dispose de diverses techniques instrumentales d'appui au diagnostic. La plus simple et la meilleure marché consiste à faire une prise de données avec un thermo-hygromètre. Cet instrument mesure la température ainsi que l'humidité de l'air, et il permet de localiser les foyers d'évaporation présents dans les murs, les socles ou les couvertures. Il est intéressant de faire l'inspection avec cet instrument, parce que les taches ne correspondent pas toujours à de véritables foyers d'évaporation : en effet, il s'agit parfois d'une condensation par hygroscopicité, et dans ce cas les matériaux n'évaporent pas l'eau, sinon qu'ils la condensent, et ceci peut être détecté avec une certaine facilité grâce à cette technique. Les résultats de l'étude peuvent être représentés sur des plans.



Études complémentaires

Après avoir analysé les lectures fournies par le thermo-hygromètre, il peut être nécessaire de faire appel à une autre technique de vérification et de localisation des foyers. Dans ce cas, l'étude nécessaire dépendra de l'hypothèse ou pré-diagnostic.

- ▶ S'il s'agit de localiser un foyer d'humidité du terrain, et que l'on soupçonne la présence de la nappe phréatique ou d'une strate capillaire, une étude géotechnique est utile.
- ▶ Lorsque l'on souhaite connaître plus en détail le comportement hygrothermique du bâtiment (pour connaître sa ventilation, le risque de condensations, ainsi que l'évolution du séchage en corrélation avec le climat, par exemple), on a recours à une étude de suivi hygrothermique complète, au travers de l'installation de thermo-hygromètres à enregistrement continu (*data-logger*) qui peuvent être programmés par un protocole de prise de données adapté au type d'étude que l'on souhaite.
- ▶ Pour localiser les foyers ponctuels, on a recours à des tests avec une supervision archéologique.
- ▶ Lorsque l'on soupçonne que l'humidité est due à des avaries du tout-à-l'égout, ou à la présence de réseaux de canalisations, il faut inspecter ceux-ci à l'aide de techniques appropriées au cas (inspection de puits et canalisations à l'aide de caméras de télévision ; détection de regards d'eau ; détection de fuites dans les réseaux d'adduction d'eau, etc.).
- ▶ Si l'on souhaite déterminer le rôle des sels hygroscopiques présents dans les matériaux, et leur éventuelle influence sur le comportement hydrique des matériaux, il faut avoir recours à des tests de laboratoire. Pour ce faire, il faut effectuer une prise d'échantillons des matériaux que l'on souhaite étudier. Les tests de laboratoire possibles sont nombreux, et ce n'est pas le lieu dans cette publication de les décrire.
- ▶ Enfin, lorsque l'on soupçonne qu'il s'agit d'un problème d'humidité de filtration d'eau de pluie, on peut effectuer des tests *in situ* de simulation de cette filtration : avec un pulvérisateur ou avec un jet d'eau, ou avec de petites quantités d'eau sur l'élément que l'on souhaite étudier.

Dans tous les cas, ces études ne sont utiles que lorsqu'elles sont réalisées après que l'on ait proposé une hypothèse : en effet, ce sont des tests de vérification qui répondent à des questions que le technicien ou le chercheur peut se poser. Par elles-mêmes, les techniques ne suffisent pas : et c'est pour cela qu'elles ne devront jamais se substituer à l'inspection ni à l'étude dont nous parlions auparavant.

¹ On appelle *adsorption* le mécanisme par lequel les gaz adhèrent aux parois des pores ou à la superficie des matériaux. Dans ce cas, le gaz qui est adsorbé est la vapeur d'eau.

La dégradation des matériaux de construction (pierre, terre, bois)

Maria PHILOKYPROU

Architecte et docteur en Archéologie

Aménageur-conseil. Section de la Conservation des Bâtiments du Service ministériel d'Urbanisme et de Logement, Chypre

I. Introduction

Les matériaux de construction utilisés à Chypre

La pierre, la terre et le bois disponibles dans la nature et les alentours des villages étaient les principaux matériaux de construction utilisés dans les bâtiments traditionnels aux XIXe et XXe siècles.

La pierre.

La pierre, sous forme de moellons ou préparée (pierre de taille), est depuis toujours le matériau le plus utilisé pour la construction des murs et, dans une moindre mesure, des planchers. Dans le cas des murs en moellons, les pierres utilisées se trouvaient à proximité des villages, et il s'agissait généralement de roches sédimentaires (grès calcaire, castine) et des roches ignées (diabase, gabbros). Dans les villages situés dans les plaines où les pierres étaient peu abondantes, elles étaient en général utilisées uniquement pour la construction de fondations et de la partie inférieure des murs. La hauteur des murs en pierre est différente dans chaque région. La pierre de taille, la plus employée, se composait de roches sédimentaires de plusieurs formations (généralement du grès calcaire de Pachna, Athalassa de Nicosie, de Koronia et de craie de Lefkara). Le grès calcaire de la formation de Pachna était la principale source de pierre de taille. Ce matériau est approprié à la construction car c'est une pierre dure constituée de particules de petite et moyenne tailles. Ses principaux éléments sont des matériaux biologiques (algues, protozoaires, bivalves, foraminifères), des silicates (quartz, feldspaths), voire des fragments de roches ignées, le tout lié par calcite, micrite ou sparite microcristalline. Le grès calcaire d'Athalassa –formation de Nicosie–, qui est le deuxième matériau le plus utilisé comme pierre de taille, est un matériau

jaunâtre et poreux contenant des éléments biologiques et quelques éléments ignés mal adhérents. Le choix d'une pierre se faisait généralement en fonction de la géologie de l'environnement immédiat des villages.

La brique d'adobe.

Les briques d'adobe étaient largement utilisées dans l'architecture traditionnelle, en particulier pour la construction de la partie supérieure des murs. Ces briques étaient fabriquées à partir des terres calcaires se trouvant à proximité et contenant un pourcentage relativement élevé d'argile. La terre argile était mélangée avec une certaine quantité d'eau, puis complètement tassée, de manière à produire un mélange suffisamment malléable. Elle était ensuite humidifiée uniformément, puis des matériaux végétaux, tels que la paille, les joncs et les algues, y étaient ajoutés. Le tout reposait pendant quelques jours pour fermenter et produire une colle végétale donnant au produit fini sa consistance et son élasticité.

Les enduits et les mortiers.

L'architecture traditionnelle utilisait des enduits de gypse et d'argile, alors que l'emploi de la castine était relativement limité. La boue était le matériau le plus utilisé pour le mortier. En effet, celui-ci requiert une technologie simple par rapport aux autres enduits et peut être préparé à partir d'argile et d'eau. Les propriétés adhésives de la boue proviennent de l'argile présente dans le sol. Dans les enduits et les mortiers de murs faits de boue, des additifs tels que la paille étaient fréquemment utilisés pour éviter les fissures car ils permettaient une meilleure cohésion. Les enduits hydrauliques sont une catégorie particulière d'enduits principalement utilisée dans les structures requérant des propriétés hydrauliques (moulins à eau, etc.).



Pierre de taille.
Grès calcaire de Nicosie et de Pachna



Dégradation de la pierre



Dégradation de la pierre

Le bois.

L'utilisation du bois, en particulier du pin et du cyprès, était essentiellement limitée à la construction des toitures, des planchers, des portes, des fenêtres et des murs auxiliaires.

II. La dégradation de la pierre

Les principaux problèmes rencontrés dans les murs construits en pierre proviennent de la dégradation du matériau de construction ou de la construction dans son ensemble. La dégradation est essentiellement due à la décomposition de la pierre elle-même, aux dégâts affectant les angles et fréquemment la totalité de la surface visible, et à l'altération de la nature compacte de la pierre. La pierre se lézarde parfois à des endroits où les éléments métalliques utilisés pour relier des structures en bois sont rouillés. Dans certains cas, ces fissures peuvent être dues à la surcharge de la partie supérieure du linteau en pierre des fenêtres et des portes.

Les autres problèmes rencontrés dans les constructions en pierre sont l'affaissement d'un mur, sa séparation du reste de la construction et son effondrement. Les murs perpendiculaires ont parfois tendance à se séparer, de même que les deux faces d'un mur. Enfin, dans les constructions en pierre, la formation de fissures, la dégradation et le décollement des enduits et mortiers peuvent amener les pierres à se détacher et à tomber.

Les principales causes de dégradation ¹ (décomposition, érosion, fissures) de la pierre sont les suivantes :

- Humidité provenant de la pluie ou d'autres causes. L'humidité apparaît généralement dans la partie inférieure du mur et, dans une moindre mesure, dans les parties situées à mi-hauteur (voire dans les parties supérieures du mur). La présence d'eau et d'humidité peut avoir des répercussions sur les éléments en argile de la pierre et conduire à la cristallisation des sels ;
- Les causes chimiques et l'influence des facteurs biologiques et

de la pollution atmosphérique peuvent entraîner l'altération des éléments de la pierre ;

- Les causes mécaniques (charge et pressions), qui forcent la solidité des éléments en pierre.

Soulignons que dans l'architecture chypriote traditionnelle, la présence d'humidité dans la pierre constitue la principale cause de la plupart des changements physiques et chimiques survenant dans la structure des éléments en pierre (principalement dans les pierres sédimentaires, les plus poreuses, et dans les bâtiments situés près de la mer). L'eau peut pénétrer dans la pierre au moyen de la condensation de la vapeur dans l'air et en cas de pluie, si le matériau est poreux ², ainsi que par le biais de la capillarité (mouvement de l'eau qui monte du sol et son évaporation lorsqu'elle atteint une surface libre).

Remontée capillaire

L'eau sous forme liquide ou de vapeur peut imbiber tous les matériaux poreux. Les pores présentant un diamètre très étroit agissent comme des conduits de capillarité et permettent l'absorption de l'eau, car les forces de cohésion des conduits entre l'eau et le mur sont supérieures aux forces liant les particules d'eau. Ainsi, l'eau a tendance à se répandre sur une surface plus importante à l'intérieur du conduit et filtre à travers le mur à contre-gravité.

L'eau crée l'érosion des éléments en pierre de façon directe lorsque ses composants solubles en sont imbibés (dégradation des particules d'argile) et de façon indirecte par le biais du transfert de sels solubles et de leur cristallisation.

a. Dégradation de la pierre

due à la présence d'eau et d'humidité

► Action de l'eau sur les éléments en argile

Lorsqu'elle absorbe de l'eau, l'argile gonfle, puis elle se transforme en une fine poudre en séchant. Le gonflement provoqué par l'absorption d'eau provoque sa détérioration. L'augmentation du volume des éléments composant l'argile



Dégradation de la pierre



Dégradation de la pierre et de l'adobe



Dégradation de la pierre

entraîne le développement de forces mécaniques dans la composition de l'argile, ce qui désorganise considérablement la pierre contenant ces éléments.

► Cristallisation des sels

La cristallisation des sels, l'une des causes les plus importantes d'érosion et de dégradation de la pierre, a des effets sur tous les types de pierre, quelle que soit leur composition chimique. Les sels proviennent principalement de la surface du sol, de la sous-surface, de la mer, de la pollution atmosphérique de l'eau de pluie (qui augmente la pollution du sol) et de l'utilisation de matériaux de construction non appropriés en contact avec la pierre (enduits de ciment et mortiers). Les sels les plus solubles sont les chlorures, les sulfures et les sulfates³.

Les sels pénètrent dans les pores de la pierre (ou dans les fissures de petite taille) lors de l'absorption ou de la montée par capillarité de l'eau contenant des sels. L'eau est directement absorbée de la pluie ou monte du sol par capillarité. La capillarité est essentiellement due aux pores longitudinaux, perpendiculaires et transversaux présentant un diamètre étroit. Lorsque l'eau est saturée (à la suite d'une baisse de température ou de l'évaporation), les sels solubles se cristallisent à l'intérieur des pores de la pierre ou à sa surface, produisant une efflorescence. La cristallisation des sels peut parfois se produire à la fois à la surface et dans les pores de la pierre. Lors de la cristallisation, le volume des sels augmente⁴, ce qui bouche en partie les pores. La tension importante ainsi créée sur les parois des pores et dans les pores eux-mêmes a des effets destructeurs conduisant à la dégradation des pierres de la construction. La cristallisation peut provoquer des tensions mécaniques –réduction de la surface de la pierre, séparation de petites parties de la pierre et craquellement du matériau de construction.

La concentration de sels à la surface de la pierre, due au déplacement continu de l'eau vers les surfaces externes du matériau, provoque –outre la détérioration des éléments de la pierre– la dégradation des enduits et des mortiers (développement

de tensions en surface, petites fissures, enduits séparés de la pierre et destruction graduelle).

L'étendue de ce phénomène dépend du volume d'eau contenu dans les pores et de la perméabilité de la pierre. Le phénomène de la dégradation –érosion due à la cristallisation des sels– est beaucoup plus important dans les régions côtières de l'île, par exemple à Larnaca.

b. Dégradation de la pierre due à des facteurs biologiques et à la pollution atmosphérique

► Facteurs biologiques

L'érosion due aux facteurs biologiques englobe les modifications chimiques entraînées par des micro-organismes (algues, champignons, etc.) et celles qui sont provoquées par les insectes, les oiseaux et la croissance de racines ou de plantes qui pénètrent dans les joints ou les fissures et causent des tensions mécaniques. L'humidité favorise également le développement de micro-organismes responsables de la détérioration.

► Pollution atmosphérique (soufre et oxydes de carbone)

La dégradation de la pierre due à la pollution atmosphérique n'est pas aussi intense à Chypre que celle qui est causée par les facteurs mentionnés auparavant, car le taux de pollution atmosphérique de l'île est relativement bas. Les agents polluants entraînant la détérioration des éléments de la pierre sont généralement le dioxyde de carbone et les oxydes de soufre. Comme nous l'avons indiqué, l'acide sulfurique réagit rapidement au contact du carbonate de calcium des pierres calcaires et le dissout lorsque les éléments de la pierre sont exposés à la pluie. Le dioxyde de carbone atmosphérique dissout dans l'eau de pluie décompose graduellement la calcite, créant des composants solubles. Lorsque la solution sèche, la calcite ou l'aragonite est recréée. Le dioxyde atmosphérique a une action uniquement sur les pierres calcaires exposées à l'eau de pluie, dont il réduit légèrement les dimensions.



Domages causés à la pierre par la pollution de l'air



Problèmes structurels des murs de pierre



Domages causés aux murs de pierre par la végétation

c. Dégradation de la pierre à la suite de tensions mécaniques

Les problèmes de la pierre dus à des tensions mécaniques provoquées par l'expansion et la contraction du matériau ne sont pas très nombreux à Chypre, car les écarts de températures sont peu élevés. L'affaissement des fondations, les tremblements de terre et des pratiques inappropriées de construction (absence de liaison entre les deux faces d'un mur) peuvent entraîner des problèmes dans la construction, ainsi que dans la pierre elle-même (craquellement, et autres).

III. La dégradation des briques d'adobe

Les principaux dégâts constatés dans les briques d'adobe sont la dégradation, la désintégration et la détérioration du matériau, très visibles à la base d'un mur et dans une moindre mesure sur d'autres parties du mur, telles que la partie supérieure. Les murs en briques d'adobe peuvent également présenter des problèmes mécaniques, tels que des fissures, une inclinaison (verticale ou horizontale), des bombements et des creux, des mouvements horizontaux et la déformation des murs, qui peuvent avoir des répercussions sur le matériau lui-même.

La gravité de ces dégâts dépend de la qualité des briques d'adobe et de la structure du mur. La qualité des briques est liée à la qualité de la terre utilisée pour leur production, à l'additif organique et, de façon générale, à la procédure employée dans leur préparation (temps de fermentation de la terre, mélange des ingrédients, période de séchage, etc.), ainsi qu'aux caractéristiques géotechniques du produit fini. En outre, la qualité des briques d'adobe dépend également de l'expérience et de la formation du personnel ayant participé à la construction. La détérioration d'un mur en briques d'adobe peut être provoquée par le système structurel du mur (connexion insuffisante entre les deux faces d'un mur, disposition incorrecte des briques en rangées alternées) ou par les conditions climatiques de la région (présence d'eau et d'humidité).

Les principales causes de la dégradation des briques d'adobe

- Eau et humidité (qui provoquent la désorganisation des éléments en argile et la formation de sels) ;
- Facteurs biologiques ;
- Tensions mécaniques.

a. Eau et humidité

L'eau et l'humidité (montée de l'humidité du sol, eau de pluie), la construction de mauvaise qualité ainsi que d'autres problèmes de la structure constituent les principales causes de la détérioration du matériau de construction et des additifs organiques. La désintégration du matériau des briques d'adobe se produit lorsque la présence d'eau et d'humidité réduit considérablement la cohésion de la terre employée dans la composition de la brique. L'humidité et l'eau remplissent les pores de la brique et les particules de la terre ne sont plus reliées entre elles, ce qui entraîne la désintégration du matériau de la brique⁵. En outre, la présence d'eau provoque la pourriture, le gonflement, le séchage et la pulvérisation de la paille contenue dans les briques d'adobe.

Ce phénomène se produit car de l'eau pénètre dans le matériau. En effet, l'humidité qui s'introduit dans le mur entraîne l'évaporation ou la formation de cristaux de sel, qui provoque à son tour l'affaiblissement de la cohésion, ce qui désintègre le matériau, augmente la taille des pores et pulvérise la brique. L'humidité occasionne également des dégâts importants à l'enduit et au mortier d'un mur en briques d'adobe.

L'humidité peut pénétrer dans les pores de la surface, entre l'enduit et le mur, s'infiltrer directement dans la surface de connexion, ou atteindre la surface en traversant la masse du mur. L'humidité se trouvant dans la partie située entre l'enduit et la brique s'évapore ou se condense, en fonction des conditions de température et d'humidité de l'environnement, et elle entraîne les sels solubles vers la surface. Lorsque l'humidité sèche, les résidus de sel qui se forment augmentent la taille des pores (gonflement) et donc la pression dans les pores, ce qui supprime la cohésion/connexion et permet l'apparition d'une fissure interne. Ensuite, l'enduit se détache et tombe, et les briques d'adobe sont



Décollement et crevasses du plâtre



Détérioration de l'adobe dans la partie inférieure des murs



Détérioration de l'adobe dans la partie inférieure des murs

directement exposées à l'humidité et à l'eau, ce qui a pour effet d'accélérer leur détérioration et leur décomposition.

Lorsque l'enduit externe d'un mur en briques d'adobe tombe et que le mur est alors exposé, l'eau peut provoquer d'autres problèmes. En effet, l'eau qui s'écoule forme de petits canaux verticaux sur le mur, ce qui augmente la surface exposée aux conditions défavorables.

Les dégâts provoqués par l'eau et l'humidité sont plus souvent observés à la base d'un mur, lorsque la base en pierre se trouve très près du sol. Le processus de détérioration de la brique d'adobe se poursuit tant que les conditions d'humidité subsistent. Aux endroits où la base en pierre d'un mur en briques d'adobe est très élevée, l'eau peut pénétrer à l'intérieur d'un mur par le biais des fissures provoquées par des défauts de la structure ou par une charge externe. Dans certains cas, les fissures se produisent au niveau des points de rencontre des éléments en bois et des briques d'adobe sous l'effet des forces de contraction ou de la pourriture des parties en bois. Dans ce cas, la dégradation a lieu pendant une courte période de temps (saison des pluies), contrairement à la dégradation continue de la partie inférieure du mur, en particulier dans les murs dont la base est en pierre.

La détérioration due à l'eau est également observée dans la partie supérieure du mur, à l'endroit où la structure se termine et où plusieurs matériaux (pierre, brique d'adobe, bois, enduit) se rejoignent. Des fissures peuvent commencer à apparaître comme conséquence des différentes forces d'expansion des matériaux, des mauvaises pratiques de construction et d'une construction de mauvaise qualité, ainsi que des variations de température et d'humidité. La partie supérieure des murs est généralement protégée par une saillie de la toiture. Lorsque cette protection ne remplit pas sa fonction, l'eau pénètre dans la structure à travers les fissures et les matériaux se dégradent de la façon indiquée ci-dessus.

b. Facteurs biologiques

Des oiseaux peuvent creuser un trou dans le mur pour y faire leur nid, ce qui expose l'intérieur du mur à l'érosion. Lorsque l'enduit tombe, les trous laissés par les petites chevilles en bois (servant à

relier l'enduit et la brique d'adobe) sont mis à profit par des insectes et des oiseaux qui y font leur nid et permettent également la croissance de végétation, cause de fissures internes.

c. Tensions mécaniques

Lorsque les tensions exercées sont supérieures à la solidité du mur, des fissures se produisent. Leurs causes sont le mouvement horizontal du mur, l'inclinaison du mur et le déplacement des supports. Les mouvements horizontaux peuvent être dus à des tremblements de terre ou des vibrations du sol, un vent fort, des pressions dans le sol ou provoquées par l'eau et des déformations excessives du sol ou de la structure de la toiture. Lorsque les connexions des angles sont insuffisantes ou que le mur est incliné, des fissures de séparation apparaissent. Certaines fissures sont provoquées par des mouvements horizontaux causés par les forces appliquées ou par les déplacements ou déformations des planchers. Les autres problèmes structurels des murs en briques d'adobe sont les bombements, l'effondrement ou l'inclinaison des murs.

IV. La dégradation du bois

Les principaux dégâts constatés sur certaines parties de la structure en bois sont la pourriture, les fissures et la perte de solidité. Ils sont dus aux variations de température et d'humidité, à des causes biologiques et à des problèmes structurels. En outre, les insectes, les champignons ainsi que d'autres processus biologiques peuvent causer des dégâts et provoquer la dégradation des parties en bois, dont la pourriture se produit généralement dans les parties affectées par l'eau et en particulier celles qui sont encadrées dans le mur.

Les causes biologiques de la détérioration du bois sont néfastes. En effet, certains champignons et insectes qui se développent dans le bois peuvent, dans certaines conditions d'humidité (supérieure à 20 %) et de température (20 à 30 °C), faire pourrir le bois. Les fissures longitudinales existant dans les parties en bois réduisent sa



Dégradation du bois



Dégradation du bois



Détérioration de l'adobe dans la partie supérieure des murs

solidité et fournissent des espaces pour les nids des insectes.

Les problèmes survenant dans les structures en bois peuvent également provenir de la contraction physique du bois lorsqu'il sèche et de la perte non uniforme d'humidité. L'utilisation de parties en bois n'ayant pas séché correctement et sous contrôle ou provenant d'arbres coupés à des périodes inappropriées –avec pour conséquence la conservation des sucres dans le bois– peut avoir des répercussions désastreuses.

La plupart des parties en bois ne présentent pas de forme permanente, même si elles ont été coupées plusieurs années auparavant. En effet, le changement des conditions d'humidité et de température entraîne l'expansion ou la contraction du bois, qui peut se courber, voire se déformer en cas de charge permanente.

En conclusion, nous pouvons affirmer que les deux principales causes de la dégradation de la pierre, des briques d'adobe, des enduits et du bois dans les bâtiments traditionnels de Chypre sont l'eau et l'humidité (montée de l'humidité du sol et eau de pluie pénétrant dans les structures à cause de problèmes structurels). La seule façon de protéger les constructions consiste à préserver les structures de l'eau et de l'humidité.

Références

IOANNIS, I. (2005), Erosion and Protection of Building Stone, *Ornamental Stone from Greece, Hellenic Marble* – Hellenic Marble Manufactures.

LAMBROPOULOU, B.N. (1993), *Erosion and Conservation of Stone*.

PAPADOURIS, GL. (1990), Building Materials in the Cyprus Traditional Architecture, *Archaeologia Cyprica*.

PAPADOURIS, GL. (1992), The use of Wood as Inherited in to Building Tradition since Antiquity. *Review of the Cyprus Society of Historical Studies*.

PHILOKYPROU, M. (1999), Building Materials and Construction Methods Employed in Prehistoric and Traditional Architecture in Cyprus, *Ethnography of European Traditional Cultures. Arts, Crafts, Techniques of Heritage*.

Restoration and Maintenance of Traditional Settlements (2003), Association des ingénieurs civils et des architectes de Chypre.

¹ Le terme dégradation englobe l'ensemble des processus contribuant à l'altération d'un élément en pierre, qui peuvent être chimiques, physiques, mécaniques ou biologiques par nature.

² Les éléments solides d'un matériau poreux comportent de nombreux petits espaces vides, les pores ou conduits de capillarité, pouvant être ouverts ou fermés et constituant un réseau interne.

³ L'oxyde de soufre provenant de la pollution atmosphérique, de l'eau du sol et des enduits en ciment provoque l'érosion des pierres calcaires, créant un gypse qui contribue de façon secondaire à l'érosion de la pierre.

⁴ L'augmentation du volume provenant de la transformation des sels, qui passent d'une forme anhydre à une forme aqueuse, provoque l'érosion à cause de l'épuisement causé par la pression alternée sur les parois des pores. Les pressions exercées à l'intérieur de la pierre peuvent entraîner sa rupture.

⁵ Le processus de désorganisation des éléments de l'argile d'un matériau a été décrit dans la section précédente relative à la pierre.

Les divers types de techniques scientifiques servant à identifier les mécanismes de dégradation de la pierre

Introduction

Dans l'environnement dans lequel ils se sont formés, tous les matériaux présentent un état stable. Toutefois, à la suite d'un changement important des conditions environnementales, le matériau peut se transformer en un matériau présentant un nouvel état stable (Rapp et Hill, 1998 ; Malaga-Starzec, *et al.*, 2000).

L'altération de la pierre est provoquée par l'adaptation de ses éléments internes aux conditions atmosphériques et environnementales, sous l'action de facteurs physiques, chimiques et biologiques (Pellizzer et Sabatini, 1976 ; Amoroso et Fassina, 1983 ; Karpuz et Pasamethouglu, 1992). Ce phénomène naturel se produit dès la formation de la pierre et se poursuit pendant toute son existence (Charola, 1988 ; et Turkington, 1996).

Pendant des siècles, les monuments et les sculptures en pierre ont résisté à l'attaque d'agents naturels d'altération. Il a néanmoins été observé qu'au cours des dernières décennies, le délabrement de nombreux monuments et sculptures, en particulier ceux situés à proximité de villes et de zones industrielles, s'est accéléré (Amoroso et Fassina, 1983 ; Aslam, 1996 ; McAlister, 1996).

Les agents responsables de l'altération

L'altération des roches dans la lithosphère est provoquée par plusieurs agents continentaux (extrinsèques), tels que des agents physiques (désintégration mécanique), chimiques ou biologiques, ainsi que par leurs propriétés intrinsèques, c'est-à-dire leur minéralogie, leur texture et leur structure (Dössat, 1982 ; Amoroso et Fassina, 1983 ; Bradley et Middleton, 1988 ; Gauri, 1992 ; Ling *et al.*, 1993a ; Vincente *et al.*, 1993). Par conséquent, le délabrement de la pierre d'un monument est rarement le résultat d'un facteur unique (processus) mais plutôt d'une combinaison de plusieurs agents (Schumann, 1998).

Différents groupes de formes de détérioration, parmi lesquelles la formation de dépôts sur la surface de la pierre est la plus importante, peuvent être détectés sur la pierre des monuments.

Il semble que la première étape de la détérioration de la pierre de construction, qui se produit sous l'effet des conditions atmosphériques, est la couleur grise que prend la pierre. Cette étape est fréquemment suivie de la formation de croûtes et du délabrement ultérieur par écaillage (Hoke, 1978 ; et Al-Naddaf, 2002).

Une fine couche de 0,02 à 0,2 mm d'épaisseur, dure, noire, généralement terne, peut se développer sur la surface de

Mustafa AL-NADDAF

Docteur en géologie

Département de Conservation et de Gestion des Ressources culturelles, Université Yarmouk, Irbid, Jordanie



Umm Qeis (Jordanie).

nombreux types de pierre (Nord et Tronner, 1992 ; Nord et Ericsson, 1993). La patine et les croûtes recouvrant la surface des monuments ont été attribuées à différentes causes, dont le traitement à des fins esthétiques et/ou protectrices, les dépôts produits biologiquement, l'interaction avec les agents atmosphériques, tels que le SO_2 , ce qui entraîne la sulfatation et la formation de gypse et d'un dépôt sec ou humide de particules atmosphériques (Garcia-Vallés *et al.*, 1998). La formation de cette couche joue un rôle important dans la variabilité de la composition chimique des pierres de construction. Ce phénomène apparaît normalement dans des endroits proches de la surface où les fluides entrent et sortent, ce qui peut contribuer à la redistribution des éléments très solubles (Hayles et Bluck, 1995).

La détermination de la composition et de l'origine des dépôts recouvrant les monuments permet de comprendre le mécanisme de la formation de ces dépôts, d'adopter des mesures préventives afin d'atténuer et de retarder leur formation et de déterminer les meilleures actions de conservation afin de retirer ces dépôts sans effets négatifs sur la pierre, ou tout au moins en limitant au maximum les conséquences (Riederer, 1973).

La microscopie optique, la diffraction des rayons X, la microscopie électronique à balayage, la spectrophotométrie infrarouge, la chromatographie par échange d'ions et les tests de spectrométrie d'absorption atomique et du plasma peuvent permettre d'effectuer une caractérisation minéralogique et chimique des pierres intactes et altérées, ainsi que de détecter les pathologies des pierres des monuments.

Diffraction des rayons X

L'objectif essentiel de toutes les recherches concernant ces matériaux est la caractérisation chimique et minéralogique des matériaux des bâtiments anciens. En effet, elle peut fournir des informations importantes sur la composition et les produits responsables de l'altération, qui permettent d'aboutir à des conclusions conduisant à l'évaluation du degré de délabrement des matériaux et par conséquent de ses causes (Puertas *et al.*, 1992).

La méthode de diffraction des rayons X s'avère efficace pour déterminer la composition minéralogique des échantillons de pierres ainsi que celle de la croûte d'altération, car elle permet de détecter tout contenu minéral supérieur à 1 % (Do, 2000). La méthode de diffraction orientée des rayons X est utilisée pour les échantillons dont le contenu en argile est élevé.

La comparaison des différences dans la composition minéralogique d'une pierre intacte et de la croûte permet de déterminer l'origine de cette croûte.

La pétrographie

L'analyse d'une plaque mince permet d'obtenir des informations essentielles sur de nombreux matériaux inorganiques. Les géologues utilisent la pétrographie de plaques minces pour décrire et classer les roches, les sols et le sable. Les archéologues et les scientifiques chargés de la conservation du patrimoine se servent de cette méthode pour étudier les nombreuses matières inorganiques employées dans la production d'objets culturels. L'objectif de ces analyses, effectuées dans le cadre de l'étude des objets culturels, consiste à identifier correctement les matériaux, à regrouper les objets similaires, à identifier l'origine géologique d'un objet ou de certains de ses éléments et à étudier la technologie de fabrication. Avec certains matériaux artistiques, la comparaison entre les changements structurels et minéralogiques sur des surfaces altérées et les sections intérieures intactes d'un échantillon peut fournir des informations quant à l'authenticité d'une pièce. De même, les plaques minces permettent d'étudier la détérioration de l'art inorganique et de matériaux architecturaux, et d'observer les effets des traitements de conservation sur ces matériaux (Reedy, 1994).

La question la plus habituelle à propos de l'altération de la pierre naturelle concerne l'influence des substances polluantes. Pour y répondre, il faut disposer du plus grand nombre possible d'informations sur la pierre naturelle. Les recherches menées en laboratoire par Holzwarth en 1996 et Livingston en 1988 ont démontré que, si les propriétés pétrographiques particulières ne sont pas connues, les propriétés physiques ne permettent pas d'obtenir toutes les informations nécessaires sur le matériau. En outre, les propriétés pétrographiques et diagénétiques permettent

d'expliquer la plupart des déviations des propriétés physiques de sous-échantillons prélevés sur le même bloc de pierre, car certaines de ces propriétés peuvent avoir des conséquences importantes sur l'altération des pierres de construction.

L'un des avantages de la pétrographie de plaques minces est le prix du microscope pétrographique nécessaire aux recherches, qui est relativement bon marché. La plupart des laboratoires peuvent ainsi avoir accès à cette technique, employée habituellement pour effectuer des analyses. Le coût de l'achat et de l'entretien d'un microscope pétrographique est beaucoup moins élevé que celui des autres équipements servant à étudier des objets en pierre, tels que le microscope électronique à balayage, la microsonde à faisceau d'électrons, le diffractomètre à rayons X ou les instruments élémentaires d'analyse (Reedy, 1994).

Le microscope électronique à balayage

La technique du microscope électronique à balayage (SEM) est largement utilisée dans le domaine de la recherche sur les matériaux. Un faisceau de nano-électrons très focalisés est passé sur la zone cible, et l'observation des électrons secondaires générés par ce faisceau permet une résolution morphologique à l'échelle nanométrique (Adler, 1982 ; Van Grieken, 1989 ; McAlister, 1996).

Le type d'informations fournies par le microscope électronique à balayage permet d'évaluer la qualité de la cimentation



Samad (Jordanie).

intergranulaire et la tendance de la pierre à retenir l'eau liée et à absorber le matériau à partir de cette eau. Plus la capacité d'absorption est importante, plus la pierre est susceptible de se détériorer sous l'effet du gel-dégel, des cycles humides et secs et de la cristallisation du sel, et plus il est urgent de la protéger (Lewin *et al.*, 1978).

La détérioration des pierres de construction survenant à la suite de la dissolution du matériau de cimentation est l'un des mécanismes de décomposition ayant les répercussions les plus importantes sur ces pierres. Le microscope électronique à balayage permet de détecter ce processus, en particulier s'il est associé à la technique de fluorescence des rayons X.

Dans des environnements humides, la bio-détérioration peut être le principal facteur de l'endommagement de la pierre, du béton, du mortier, etc. Ce type de détérioration peut être provoqué par des micro-organismes tels que les bactéries, les champignons, le lichen, les algues et les plantes, par exemple la mousse. Alors que les bactéries ont tendance à produire une bio-détérioration en rongant les surfaces au moyen de la sécrétion d'acide, il a également été démontré que les champignons contribuent à la dégradation de la pierre, du béton et du mortier en pénétrant directement dans la surface. Le microscope électronique à balayage est considéré comme la meilleure technique d'analyse permettant de détecter ces facteurs de détérioration (Tapper, *et al.* 1999).

La fluorescence des rayons X et la spectrométrie d'absorption atomique

Les produits les plus visibles de l'altération de la pierre sont la conséquence de la fragmentation et de la désintégration des éléments minéraux. La dissolution de certains minéraux et la formation ultérieure de nouveaux éléments, moins facile à observer mais tout aussi importante, sont provoquées par l'action d'agents chimiques et biologiques pouvant entraîner l'altération des propriétés chimiques des surfaces exposées aux effets environnementaux (Adler *et al.*, 1982 ; McAlister, 1996).

Par conséquent, la détermination des variations de la composition chimique des surfaces altérées par comparaison avec les parties intactes est une méthode d'analyse permettant d'identifier les agents responsables de la détérioration et de mettre en place les mesures de conservation appropriées.

Les méthodes d'analyse par fluorescence des rayons X et de spectrométrie d'absorption atomique sont fréquemment employées, avec succès, dans la recherche de la composition élémentaire des matériaux inorganiques, intacts ou altérés (Maringer, 1982). En effet, elles permettent de déterminer les concentrations des principaux oxydes : Na_2O , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , P_2O_5 , SO_3 , CaO , K_2O , TiO_2 , MnO et Fe_2O_3 , ainsi que de certains oligo-éléments, tels que Zn, Rb, Cr, Sr, Zr, Ba et Pb.

La comparaison entre la composition chimique d'une croûte

altérée et celle de l'intérieur d'une pierre intacte permet d'identifier l'origine de la formation de la croûte sur les façades en pierre. Elle peut être traitée statistiquement au moyen du concept du facteur d'enrichissement (Ef).

La chromatographie par échange d'ions

Lorsqu'elles sont présentes en grande quantité dans le sol, les solutions salines solubles peuvent probablement endommager davantage un monument que tout autre facteur de détérioration naturelle (Plenderleith, 1979).

L'haloclastie a des répercussions sur les roches, les pierres de construction, le mortier, les briques, la peinture, le verre ainsi que de nombreux autres matériaux poreux employés dans les bâtiments et les monuments. À l'heure actuelle, elle est reconnue comme l'un des agents d'altération les plus fréquents et les plus actifs (Arnold, 1976a, b ; Arnold et Zehnder, 1989). Plusieurs types de sels minéraux peuvent être détectés sur les bâtiments, les plus communs, détectés dans les pierres de construction ; il s'agit des sulfates, des nitrates, des chlorures et des carbonates de sodium, de calcium, de potassium et de magnésium.

La chromatographie par échange d'ions est une forme de chromatographie liquide qui utilise les résines échangeuses d'ions pour séparer les ions atomiques ou moléculaires en fonction de leur interaction avec la résine. C'est la méthode la plus rapide d'analyse des anions.

La chromatographie par échange d'ions est l'une des techniques les plus importantes qui peuvent être appliquées pour déterminer la concentration de Cl^- , NO_3^- et SO_4^{2-} dans les échantillons de pierre.

Références

- García-Vallés M., Vendrell-Saz M., Molera J. et Blázquez F. (1998), *Interaction of rock and atmosphere: patinas on Mediterranean monuments*. Env. Geol. 36 : 137-149. Springer-Verlag.
- Hoke E. (1978), Investigation of weathering crust on Salzburg stone monuments. *Studies in conservation*. 23 : 118-126.
- Hughes M. J., Cowell M. R. et Craddock P. T. (1976), *Atomic Absorption Techniques in Archaeology*. Archaeometry, 18 : 19-37. GB.
- Riederer J. (1973), *Die Erhaltung von Kunstwerken aus Stein in Deutschland*. Maltitechnik-Restaurato. 1 : 73.
- Reedy, Ch. (1994), Thin-Section Petrography in Studies of Cultural Materials. JAIC 1994, Volume 33, Number 2, Article 4 (p. 115 à 129)
- Tapper, R., Smith, J., Beech, I. (1999), Modern Microscopy techniques for the Study of Mortar Biodeterioration, poster présenté lors de la *International conference on microbiology and conservation (ICMC '99) Of microbes and art: The role of microbial communities in the degradation and protection of cultural heritage*. Tribuna di Galileo, Museo della Specola, 16-19 juin 1999, Florence, Italie, p. 180-184.

Agents de dégradation du bois

Dans des conditions appropriées, le bois est un matériau très durable. On pourrait en dire autant de bien d'autres matériaux de construction, sauf que certains ne l'ont pas encore prouvé. Nous trouvons ainsi des éléments en bois en parfait état dans des édifices anciens de plusieurs siècles. Un grand nombre de ces éléments ont néanmoins disparu sans laisser de traces, complètement dégradés ou détruits, vaincus par les agressions subies, remplacés peut-être ou responsables de la ruine de certains édifices.

Le bois a de nombreux ennemis, des agents qui le dégradent ou le détruisent, mais le choix de solutions constructives appropriées pourra le protéger. Un bon entretien du bois et du bâtiment peut prolonger sa vie utile jusqu'à ce que nous pouvons qualifier aujourd'hui d'éternel, en termes de durée des bâtiments.

Le bois se compose de cellulose, de lignine et d'autres éléments qui attirent et alimentent des organismes vivants du règne végétal et du règne animal.

Entre autres agents destructeurs non biotiques, citons les agents atmosphériques : la radiation solaire, la pluie et, en raison de son grand pouvoir de destruction, le feu.

Chaque agent de dégradation produit un type d'attaque et d'intensité particulier dont les effets diffèrent aussi en fonction de la nature du bois attaqué.

Agents qui dégradent le bois

Comme nous venons de le voir, nous pouvons établir deux groupes principaux d'agents de dégradation du bois : les agents abiotiques et les agents biotiques.

Parmi les agents abiotiques, nous avons la radiation solaire, la pluie, les variations d'humidité et le feu cités plus haut, auxquels s'ajoutent les produits chimiques. Dans la catégorie des organismes vivants destructeurs du bois, citons les insectes ainsi que les végétaux tels que les champignons.

Agents de dégradation abiotiques

La radiation solaire

Du large spectre de la radiation solaire, nous retiendrons les fractions de radiation ultraviolette et infrarouge qui détériorent le plus le bois, et notamment la première.

L'effet de la radiation ultraviolette porte principalement en surface et produit une série d'altérations chimiques qui dégradent tout

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



Dégradation abiotique du bois.

spécialement la lignine en la décomposant. Elles sont responsables de la teinte grisâtre que le bois prend du fait de la plus grande concentration de cellulose. Si rien n'est fait à ce moment-là, la dégradation continue, la pluie emportera aussi de la cellulose, en faisant apparaître un relief caractéristique en surface ; le bois de printemps, moins compact, est ainsi plus vulnérable que le bois d'été. Si des spores de champignons se déposent à la surface, une dégradation superficielle apparaîtra, accompagnée d'un changement de couleur, le bois prendra une teinte gris foncé ou noircira. Malgré tout, la dégradation due à cette radiation est très lente et peu profonde.

La radiation infrarouge ne dégrade pas directement le bois. L'échauffement produit en surface réduit le taux d'humidité et, ce faisant, devrait entraîner la contraction du bois. Cependant, l'échauffement n'étant pas le même en profondeur, où la température reste plus basse et où par conséquent l'humidité se maintient, il n'y aura pas de contraction. Les tensions résultantes entre la surface, qui tente de se contracter en séchant, et l'intérieur, qui conserve le même taux d'humidité et par conséquent ses dimensions, sont responsables de l'apparition de gerces de séchage à la surface, généralement de petites dimensions.

Il est possible d'atténuer les effets de la radiation solaire en utilisant des protections superficielles. On peut appliquer des peintures, des vernis ou des lasures, le résultat étant d'autant plus satisfaisant que la teneur en pigments protecteurs sera élevée. Il faut néanmoins savoir que ces produits se dégradent eux aussi et

perdent de leur pouvoir protecteur ; il conviendra donc de renouveler le traitement dès qu'ils ne seront plus efficaces.

La pluie

Quand il pleut, le taux d'humidité augmente très vite dans les couches extérieures du bois, mais ne varie pas de la même façon à l'intérieur. Ces différences de taux d'humidité entre les couches expliquent les tensions qui donneront naissance à des déformations, voire à l'apparition de gerces.

Par ailleurs, comme nous le disions plus haut, l'élimination de la lignine en sera facilitée ainsi que les altérations superficielles déjà citées.

Pour finir, un point sur lequel nous reviendrons plus loin, il faut savoir que la plupart des attaques biotiques ont besoin d'un taux d'humidité important pour se développer et la pluie peut créer ce milieu favorable.

Feu

Si une chose est sûre, c'est que le bois brûle. D'autres matériaux de construction ne brûlent pas, mais cela ne veut pas dire qu'ils ne perdent pas leurs propriétés, en totalité ou en partie, au contact du feu.

Le bois se compose principalement de cellulose et de lignine dont l'élément essentiel est le carbone.

Si le bois brûle sans l'ombre d'un doute, il le fait d'une manière singulière qui doit retenir notre attention. En premier lieu, la section du bois diminue, ce qui peut aller jusqu'à la destruction totale, mais c'est un phénomène lent en raison de trois facteurs essentiels, à savoir la teneur en humidité, la carbonisation de la surface et la faible conductivité thermique du bois dont l'influence est la suivante.

L'humidité. Quand la température augmente, le bois perd de l'humidité et consomme ainsi une certaine quantité d'énergie calorifique. En même temps, en perdant de l'humidité, ses résistances mécaniques augmentent.

La carbonisation de la surface. Quand toute l'eau s'est évaporée, les mécanismes de la combustion commencent. Nous n'entrerons pas dans les détails ici et pour simplifier nous dirons que la carbonisation de la surface est un phénomène lent, qui retarde la pénétration de la chaleur à l'intérieur en créant une barrière thermique qui fait office d'isolant. Elle entraînera aussi l'évacuation à l'extérieur des gaz inflammables qui se forment à l'intérieur du bois.

Conductivité thermique. Le bois a une faible conductivité thermique. Par conséquent, quand une pièce brûle, elle conserve des températures relativement basses à l'intérieur et ne perd pas ses caractéristiques mécaniques.

À une certaine température, l'acier se ramollit et se comporte comme une matière plastique, entraînant facilement l'effondrement des structures. Le béton subit quant à lui une série

de modifications qui diminuent sa résistance, selon les types de granulats et de ciment utilisés, et qui peuvent aggraver la situation en cas de refroidissement brusque, par exemple, sous l'effet de l'eau déversée pour éteindre l'incendie.

Tous les bois ne brûlent pas de la même manière : les conifères s'enflamment avant les feuillus, du fait de leur richesse en résines, et les bois légers, en général, avant les bois lourds. La section joue aussi –les petites sections brûlent plus facilement– ainsi que la position –la combustion est plus rapide pour les éléments verticaux– et le taux d'humidité –le bois vert prend plus difficilement que le bois sec–.

Agents biotiques de dégradation

De nombreux organismes vivants se nourrissent de bois. Ces espèces appelées xylophages sont des champignons ou des insectes qui dégradent, voire détruisent le bois, en se nourrissant de certains composants. La brièveté de notre article nous oblige à simplifier, ce que nous nous efforcerons de faire dans ce paragraphe en les regroupant non seulement en fonction de leur origine, mais aussi en fonction de la similitude des attaques ou de la dégradation produite sur le bois.

Le schéma ci-après en facilitera la compréhension.

Champignons	Moisissures	
	Champignons chromogènes	Bleuissement
	Champignons de pourriture	Pourriture brune ou cubique
		Pourriture blanche ou fibreuse
Pourriture molle		
Insectes	Cycle larvaire : coléoptères	Lyctidés
		Anobidés
		Cerambycidés
	Insectes sociaux : isoptères	Termites

Champignons

Ce sont des végétaux inférieurs. Leur organisation cellulaire est très primitive (simple) et ils sont constitués de filaments microscopiques appelés hyphes. Ils n'ont ni tige, ni racines, ni feuilles et ne produisent pas de chlorophylle, ce qui les oblige à

s'alimenter de matière organique morte ou à vivre en parasites d'autres organismes vivants dans lesquels ils puiseront la nourriture.

Pour se développer dans le bois, ils ont besoin de 20 % d'eau au moins. La température la plus propice à leur développement se situe entre 20 et 25 °C.

Nous pouvons classer les champignons qui vivent à l'intérieur du bois en deux catégories : ceux qui en modifient la couleur seulement (moisissures, champignons chromogènes) et ceux qui modifient sérieusement ses propriétés physiques et mécaniques (champignons de pourriture).

Moisissures

Ces champignons s'alimentent du contenu des cellules superficielles du bois mais ne sont pas capables d'attaquer la cellulose ni la lignine. Ils ne modifient donc pas les propriétés mécaniques du bois.

On les repère à la formation de spores, généralement de couleur foncée, sur la surface du bois ou quand le corps de floraison prend une consistance pelucheuse.

Normalement, les moisissures ne se développent qu'en surface et on les élimine en frottant.

Champignons chromogènes

Comme les précédents, ils dégradent à peine la paroi cellulaire. Ils se nourrissent de substances présentes dans l'aubier et ne s'attaquent généralement pas au duramen.

Le plus représentatif est le champignon responsable du bleuissement qui, contrairement aux moisissures, pénètre à l'intérieur du bois, raison pour laquelle il est plus difficile de s'en débarrasser.

Bien qu'il n'altère pas les propriétés mécaniques du bois, il augmente son hygroscopicité, ce qui favorise l'apparition de pourritures plus destructives. En outre, l'aspect et la couleur que prend le bois rendent son utilisation inappropriée en menuiserie et en décoration.

La contamination du bois par ses spores est très fréquente dans les scieries où les grumes ont normalement un taux d'humidité très élevé et beaucoup de sève. Pour éviter l'attaque, il suffit de plonger le bois fraîchement scié dans un récipient contenant un produit protecteur. Ce traitement renchérit à peine le bois et élimine le problème.

Champignons de pourriture

Ces champignons sont capables de produire des enzymes qui vont les aider à détruire les parois cellulaires du bois, en diminuant leurs résistances mécaniques et même en les annulant complètement dans certains cas. Ils modifient aussi la couleur du bois et diminuent sa densité. Ils sont très dangereux pour les éléments structuraux. Les conditions favorables à leur développement

varient d'une espèce à l'autre, mais ils demanderont toujours une humidité importante et une température appropriée. Le risque de pourriture est pratiquement éliminé, si le bois reste sec.

De nombreuses espèces de champignons de pourriture ont été répertoriées. Pour ne pas nous étendre davantage dans ce paragraphe, nous les regrouperons en fonction des altérations produites sur le bois, identifiables en principe à l'aspect et à la couleur du bois attaqué.

Pourriture brune ou cubique (Basidiomycètes)

Les champignons responsables de cette attaque se nourrissent essentiellement de cellulose et laissent la lignine de couleur marron, d'où le nom donné à cette attaque qui est également appelée cubique en raison du type de clivage produit. La perte de résistance peut être totale, au point que le bois s'effritera entre les doigts.

Pourriture blanche ou fibreuse (Basidiomycètes)

Les champignons responsables de cette attaque se nourrissent essentiellement de lignine et laissent la cellulose, de couleur blanche. Le bois devient fibreux après l'attaque et s'effrite en appuyant simplement avec le doigt. Ce type de pourriture guette surtout les bois de feuillus et beaucoup moins les conifères.

Dans ce cas comme dans le précédent, le bois peut conserver un bon aspect alors qu'il est déjà attaqué et qu'il a atteint un niveau important de dégradation et de perte de résistance, ce qui le rend particulièrement dangereux.

Pourriture molle (Ascomycètes)

Elle est causée par des champignons inférieurs, les ascomycètes, dont les hyphes se développent à l'intérieur de la paroi cellulaire. Ils se nourrissent principalement de la cellulose de la paroi des cellules, en présence d'un taux d'humidité très élevé. Ils sont responsables du ramollissement du bois et s'attaquent généralement à des éléments en contact avec la terre.

Insectes

Les insectes qui dégradent ou détruisent le bois en s'en nourrissant seront classés en deux groupes : les insectes de cycle larvaire tels que les coléoptères et les insectes sociaux tels que les isoptères. D'autres insectes comme la guêpe du bois et l'abeille charpentière sont moins destructeurs, de même que certains mollusques et crustacés xylophages.

Insectes de cycle larvaire

Ce sont des insectes qui vont subir plusieurs métamorphoses tout au long de leur vie. Une fois sortis de l'œuf, ils passeront par l'état de larve, de puppe et pour finir d'insecte adulte. À l'état larvaire, l'insecte vit à l'intérieur du bois et s'en nourrit. En se développant, les larves finissent par creuser tout un réseau de galeries.



6

Attaque persistante d'anobidés

Larve d'anobidé (Photographie Teresa Mach Farina, biologiste)

Le cycle commence avec la ponte d'un insecte adulte dans les fentes et les fissures du bois. Les œufs donnent naissance à des larves qui s'alimentent des composants du bois en creusant des tunnels. Le bois se trouvera ainsi peu à peu vidé de sa matière solide, ce qui affectera plus ou moins sa résistance, selon l'espèce xylophage en cause.

Pour simplifier, nous les classerons en trois groupes en fonction de la taille des larves et de la gravité des attaques, dans l'ordre ascendant.

Lyctidés (mites)

Il s'agit d'insectes plutôt petits. Les larves mesurent 4-5 mm maximum. Elles s'alimentent principalement d'aubier de feuillus vérifiant des conditions telles qu'un certain diamètre de vaisseaux et une teneur minimale en amidon. Le cycle vital est généralement d'un an, parfois moins si les conditions s'y prêtent. Les insectes

creusent des galeries parallèles aux fibres, dans lesquelles apparaissent une poudre très fine. Ils sortent à l'extérieur par des orifices circulaires de 1 à 2 mm de diamètre.

Ce groupe comprend le *Lyctus brunneus step.* et le *Lyctus linearis Goeze.*

Anobidés (vrillettes)

Ce groupe est généralement connu sous le nom de « vrillette », le plus représentatif étant l'*Anobium punctatum de Geer.* Il s'attaque surtout à l'aubier des conifères et des feuillus européens. Si les conditions sont favorables, il peut même attaquer le duramen.

Les larves peuvent mesurer jusqu'à 5 mm. Le cycle vital de ces insectes va parfois au-delà de trois ans, ce qui explique que l'on puisse mettre autant de temps à découvrir leur présence. Ce n'est qu'au bout de trois ans que les larves sortent à l'extérieur pour



Reticulitermes lucifugus, ouvrière et soldat (Photographie Teresa Mach Farina, biologiste)

Reticulitermes lucifugus, reproducteur secondaire (Photographie Teresa Mach Farina, biologiste)



Anobidé adulte (Photographie Teresa Mach Farina, biologiste)



Larve de cérambycidé (Photographie Teresa Mach Farina, biologiste)

compléter le cycle en se transformant en insectes complets. Les orifices de sortie mesurent de 1,5 à 3 mm de diamètre. Les vermoulures laissées par les larves dans les galeries sont grosses et granuleuses.

Le *Xestovium rufovillosum* De Geer appartient aussi à ce groupe ; il ressemble à l'*Anobium* mais sa larve peut atteindre 11 mm de longueur. Les orifices de sortie sont circulaires et de 4 mm de diamètre maximum. Cet insecte s'attaque à l'aubier des feuillus si le bois est très humide et s'il a déjà été attaqué par des champignons de pourriture. Les vermoulures sont sableuses au toucher et en forme de disques.

Cérambycités

Le plus connu est l'*Hylotrupes bajulus*, appelé communément capricorne des maisons. Il attaque l'aubier des conifères. Dans des conditions optimales, son cycle vital peut aller au-delà de dix ans.

Considérant par ailleurs qu'il est le plus grand de tous, les dégâts produits peuvent être particulièrement importants quand sa présence est découverte. Les larves peuvent mesurer jusqu'à 22 mm de longueur pour 6 mm de diamètre ; les orifices de sortie sont ovales et ils ont 7 mm de diamètre maximum. La capacité de destruction du bois est très importante, bien plus que dans les cas précédents, raison pour laquelle on appliquera des traitements similaires à ceux destinés aux attaques de termites et à certains cas de pourritures.

Insectes sociaux. isoptères (termites)

Les insectes les plus destructeurs pour le bois appartiennent à l'ordre des isoptères, connus sous le nom de termites.

Les termites vivent en colonies et se caractérisent par un haut niveau d'organisation et de spécialisation. La reine, qui assure la reproduction, est entourée d'ouvriers, de soldats et de néotènes.

*Kaloterme flavicollis*, ouvrière (Photographie Teresa Mach Farina, biologiste)*Kaloterme flavicollis*, reproducteur secondaire (Photographie Teresa Mach Farina, biologiste)



Canal de termites sur un mur plâtré



Attaque de termites derrière une plinthe faite d'une planche de fibres de bois

Distribution des différentes variétés de *reticulitermes* dans la Méditerranée nord-occidentale

Si, pour une raison quelconque, le contact avec le nid est rompu, les néotènes peuvent servir de reproducteurs et fonder une nouvelle colonie.

De toutes les espèces connues dans notre région, la plus importante est le *Reticulitermes lucifugus* Rossi.

Son nid principal se trouve sous terre, où la température et l'humidité sont à sa convenance, et normalement loin des bâtiments attaqués.

Ces termites attaquent l'aubier et le duramen des conifères et des feuillus, si l'humidité est importante. Ils percent des galeries dans le sens des fibres en laissant toujours une couche extérieure intacte pour se protéger de la lumière et de la perte d'humidité du milieu ambiant. À l'intérieur des galeries, leurs déchets ont une consistance terreuse caractéristique.

Ils sont difficiles à repérer car ils ne laissent pas de traces de leur présence. Ils se déplacent dans les murs et les poutres et ce n'est que lorsqu'ils rencontrent un obstacle qu'ils passent à l'extérieur. Ils fabriquent alors des tunnels avec des déchets organiques et de la terre pour continuer à se protéger de la lumière et du manque d'humidité. Ces cordonnets sont les rares signes visibles de leur présence qui permettent de les détecter.

Leur pouvoir destructeur est considérable et leur élimination est compliquée, coûteuse et difficile.

L'infestation est telle à certains endroits qu'elle constitue quasiment un fléau et provoque des dommages très graves dont la réparation est extrêmement coûteuse.

D'autres espèces de termites présentes dans nos zones d'intervention sont le *Cryptotermes brevis* Walker et le *Kalotermes flavicollis* Fabre, mais leur incidence est moindre que celle des *Reticulitermes*.