

# Cristallisation de sels et dégâts de matériaux

2<sup>e</sup> partie

V. Furlan et Y. Houst

### 3. ORIGINES DES SELS SOLUBLES

Comme nous l'avons déjà dit, les sels solubles peuvent être présents dans le matériau dès l'origine ou provenir d'une interaction avec le milieu environnant. Par exemple, tous les liants hydrauliques contiennent des quantités plus ou moins importantes d'alcalis (Na<sub>2</sub>O et

K<sub>2</sub>O) provenant des matières premières ou du combustible; ainsi que du gypse (CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O) ajouté pour régulariser la prise. D'autre part, l'hydratation libère de très importantes quantités d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)<sub>2</sub>) qui se carbonate et devient insoluble au contact de l'air. Les mortiers et bétons constituent donc une réserve considéra-

ble de Ca (OH)<sub>2</sub> qui tend à disparaître lentement au cours du temps (diffusion du CO<sub>2</sub> dans la masse du béton). Les produits de terre cuite, fabriqués en grande masse, peuvent contenir des quantités notables de sulfates de calcium et d'alcalis libres.

Les principales sources extérieures de sels solubles sont les eaux naturel-

Tableau IV. Principaux sels solubles nuisibles pouvant se trouver dans les matériaux de construction.

Sel soluble	Formule chimique	Température de transformation* °C	Volume molaire cm <sup>3</sup> /mole	Origine	Effets nocifs
Sulfate de calcium	CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	128 (-1½H <sub>2</sub> O)	55	a, b, c, d, e, f	1, 2, 3
	CaSO <sub>4</sub> · ½H <sub>2</sub> O	163 (-½H <sub>2</sub> O)	46		
	CaSO <sub>4</sub>	--	--		
Sulfate de sodium	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10H <sub>2</sub> O	32,4 (-10H <sub>2</sub> O)	220	a, b, c, d, e, f	1, 2
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	--	53		
Sulfate de magnésium	MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	150 (-H <sub>2</sub> O)	147	d, e, g	1, 2
	MgSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	--	57		
Carbonate de sodium	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> · 10H <sub>2</sub> O	33,5 (-3H <sub>2</sub> O)	199	a, b, c, d, e, j	1, 4
	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> · 7H <sub>2</sub> O	34,5 (-6H <sub>2</sub> O)	154		
	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> · H <sub>2</sub> O	100 (-H <sub>2</sub> O)	55		
Nitrate de magnésium	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	89 (-4H <sub>2</sub> O)	157	c, h	1
	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	--	91		
Nitrate de calcium	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	30 (-H <sub>2</sub> O)	125	e, h, j	1
	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 3H <sub>2</sub> O	100 (-3H <sub>2</sub> O)	--		
	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	--	66		
Chlorure de calcium	CaCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	200 (-6H <sub>2</sub> O)	130	a, d, i, j	1, 3
	CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	--	--		

\* en solution ou à 100 % HR

Effets nocifs

1. Efflorescences, dégradations par pressions de cristallisation et hydratation
2. Réagit avec C<sub>3</sub>A du ciment avec formation de produits expansifs
3. Accélère la corrosion des armatures
4. Action de saponification des peintures à base de liants organiques

Origines

- a. Liants minéraux
- b. Granulats
- c. Terres cuites
- d. Eaux naturelles
- e. Sols
- f. Pollution atmosphérique
- g. Eaux saumâtres
- h. Déchets d'animaux
- i. Sel de déneigement
- j. Adjuvants pour mortier et béton

les ou usées et la pollution atmosphérique. Selon les sols et les roches qu'elles traversent, les eaux naturelles contiennent des teneurs très variables et une grande variété de sels dissous, dont les plus communs sont les bicarbonates, sulfates et chlorures de calcium, magnésium, sodium, potassium. La composition des eaux usées est tributaire de l'activité humaine et industrielle. La pollution atmosphérique amène surtout des composés soufrés et nitrés sous forme de sels ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), anhydrides ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{NO}_x$ , ...) voire acides ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Les anhydrides et les acides réagissent, en présence d'eau, avec les composés basiques et particulièrement avec le carbonate de calcium.

Quelques caractéristiques des principaux sels susceptibles de provoquer des dégâts par pressions de cristallisation et hydratation figurent sur le tableau IV.

#### 4. EXEMPLES DE DÉGÂTS

Dans les ouvrages modernes, la chaux hydratée, libérée lors de l'hydratation des liants hydrauliques et en particulier du ciment Portland, est à l'origine des manifestations les plus fréquentes d'efflorescences. En raison de sa solubilité ( $\sim 1,3 \text{ g/l}$  à  $20^\circ\text{C}$ ), la chaux est dissoute par l'eau d'imbibition ou de percolation des mortiers et bétons et déposée dans les zones d'évaporation ou elle se carbonate au contact de l'air et devient du calcaire pratiquement insoluble. La figure 6 montre des dépôts de chaux carbonatée, avec des sulfates et carbonates alcalins, provenant du délavage, par infiltration d'eau de pluie, du mortier de pose d'un carrelage de balcon.

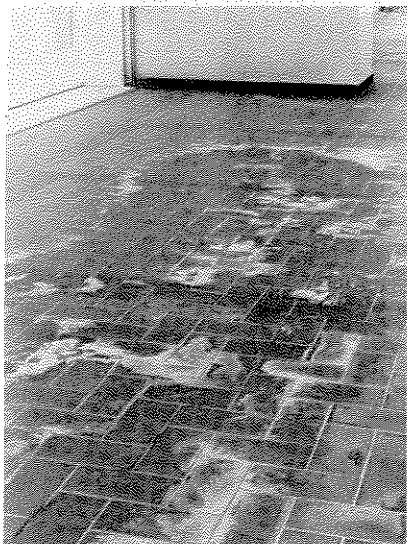


Fig. 6. Efflorescences de carbonate de calcium, sulfates et carbonates alcalins sur le carrelage d'un balcon, dues au délavage du mortier de pose des carreaux, par des infiltrations d'eau de pluie.

Parfois, les dépôts et les incrustations de calcaire confèrent aux ouvrages un aspect inquiétant (figure 7), sans être pour autant la manifestation d'un véritable danger.



Fig. 7. Dépôts de carbonate de calcium recouvrant le revêtement en béton d'une galerie percolée par des eaux d'infiltration.

Un exemple de dégradation superficielle liée à la présence du subflorescences est visible sur la figure 8. Les sels sont responsables de l'éclatement de la couche superficielle recouverte de salissures et de la décohésion de la molasse sous-jacente. Dans ce cas, la présence de sulfate de calcium s'explique par l'action des polluants soufrés sur la calcite tandis que les chlorures sont dus à la remontée capillaire d'eau chargée de sel utilisé pour lutter contre le verglas.

Un cas particulièrement spectaculaire de dégradation rapide est illustré par les figures 9 et 10. Il s'agit d'un digesteur en béton de station d'épuration des eaux usées revêtu de briques

en terre cuite. Dès l'apparition de quelques efflorescences, les briques ont été brossées et traitées avec un silicone. Un tel traitement rend le matériau hydrophobe, mais n'empêche pas la diffusion de vapeur d'eau. Cela entraîne tout d'abord une concentration des sels, puis la cristallisation sous le film de polymère, puis dans la masse. Les pressions de cristallisation provoquent alors l'exfoliation des briques comme le montre la figure 10. Il est vraisemblable que sans traitement, de nombreuses efflorescences se seraient développées, mais sans produire de dégâts notables.

La figure 11 montre la dégradation d'une peinture à la dispersion par cristallisation des sels à l'interface avec le

Fig. 8. Eglise St-François à Lausanne, façade nord. Subflorescences de chlorure de sodium et de sulfate de calcium responsables de l'éclatement de la croûte de salissures et de la décohésion (sablage) de la molasse.



crépi. Les sels solubles responsables de cette altération proviennent des liants du crépi et des briques en béton.

Le pouvoir destructeur des sels est mis en évidence en laboratoire avec des essais standard qui consistent à effectuer des cycles d'immersion du matériau dans une solution concentrée de sels, tels que sulfate de sodium ou de magnésium et de dessiccation plus ou moins complète, souvent à 80° C. Les figures 12 et 13 montrent respectivement l'état d'un tuyau de drainage en terre cuite et d'un prisme en molasse soumis à une simple remontée capillaire d'une solution de sulfate de sodium.

Les conditions dans lesquelles ces essais sont effectués sont sans doute extrêmement sévères et permettent de détruire n'importe quel matériau poreux au bout d'un certain nombre de cycles. Actuellement, la tendance est de développer des essais avec des solutions moins concentrées se rapprochant plus des conditions de destruction naturelles.

## 5. PRÉVENTION ET REMÈDES

Comme nous l'avons vu précédemment, tous les dégâts sont en relation avec la présence de sels solubles transportés par l'eau dans un milieu généralement poreux. Toute prévention consiste soit à éviter les mouvements d'eau, soit à choisir des matériaux pauvres en sels solubles, peu réactifs ou protégés de l'agressivité de l'environnement.

Le choix de matériaux est souvent réduit, surtout s'il s'agit de matériaux courants, tels que bétons, mortiers, briques de maçonnerie, etc. Cependant, pour des usages particuliers, il est possible d'opérer une sélection. Il s'agit par exemple des briques de parement, des carrelages, des pierres naturelles, des mortiers de pose et de jointoyage. Des méthodes d'analyse simples de laboratoire permettent de déterminer les sels solubles, de comparer des matériaux et donc d'effectuer un choix judicieux.

Toutes les méthodes conventionnelles aptes à réduire ou à supprimer les mouvements d'eau sont naturellement à prendre en considération. Il s'agit en particulier de supprimer les remontées capillaires, l'eau de condensation et d'infiltration. Il est évident qu'il faut supprimer la pénétration d'eau dans les matériaux et ne pas empêcher et gêner l'évaporation et la cristallisation des sels en surface, puisque à part le caractère inesthétique, les efflorescences sont nettement moins dangereuses que la cristallisation en profondeur.

Lorsque les efflorescences sont apparues, il faut autant que possible les éliminer par broissage à sec. Tout apport d'eau tend à dissoudre les sels et à les faire pénétrer dans le matériau, ce qui provoquera inévitablement de nouvelles efflorescences. Les efflorescences dues au carbonate de calcium sont souvent fortement adhérentes et ne peuvent pas être éliminées facilement par un broissage à sec. Le traitement avec un acide faible, tel que l'acide formique par exemple, peut être indispensable, mais il faut utiliser l'acide dilué et en faible quantité (éponge humidifiée par exemple). L'emploi d'acide chlorhydrique est souvent tout à fait néfaste, car on transforme le carbonate de calcium en chlorure de calcium qui est très soluble et



Fig. 9. Dépôts de sulfate de sodium sur le revêtement en briques de terre cuite, traitées au silicone, d'un digesteur en béton d'une station d'épuration des eaux.

susceptible de provoquer des pressions de cristallisation importantes. Cet acide attaque tous les matériaux à base de ciment et produit des dommages importants.

Les sels solubles peuvent être extraits, sans provoquer de dommages, au moyen de «cataplasmes» d'argile spéciale ou de pulpe de papier imbibée d'eau déminéralisée. L'eau pénètre dans le matériau par capillarité, dissout les sels et lors de l'évaporation transporte les sels dans l'argile ou le papier. Généralement, plusieurs applications sont nécessaires, ce qui rend ce pro-

céde coûteux. Il ne peut donc être envisagé que pour des objets de grande valeur artistique et historique, tels que statues, ornements architecturaux et peintures murales.

## 6. CONCLUSIONS

La cristallisation et l'hydratation des sels solubles sont des facteurs d'altération importants des matériaux de construction poreux. La connaissance et le choix des matériaux permettent de réduire les risques de dégât. Toutes les

Fig. 10. Détail de la photo précédente montrant l'exfoliation des briques en terre cuite causée par la pression de cristallisation du sulfate de sodium.



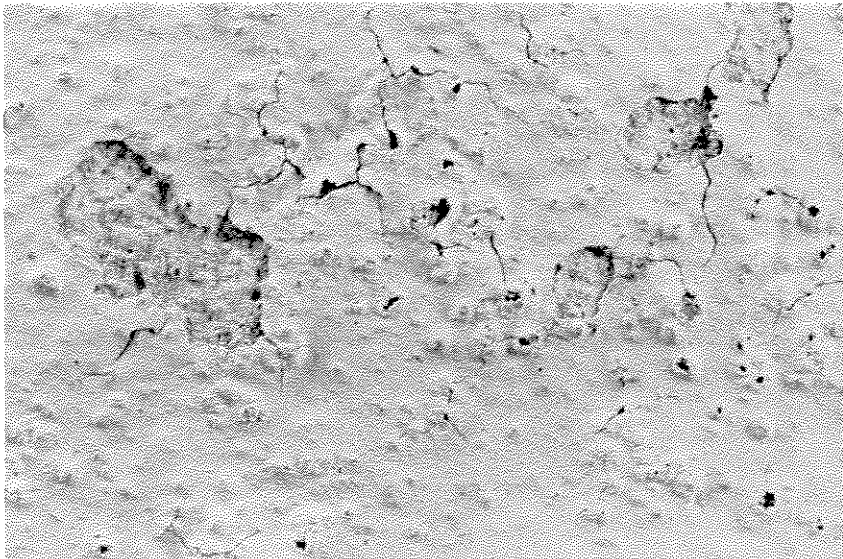


Fig. 11. Dégradation d'une peinture à la dispersion sur crépi par cristallisation de sels (agrandissement: 4 x).

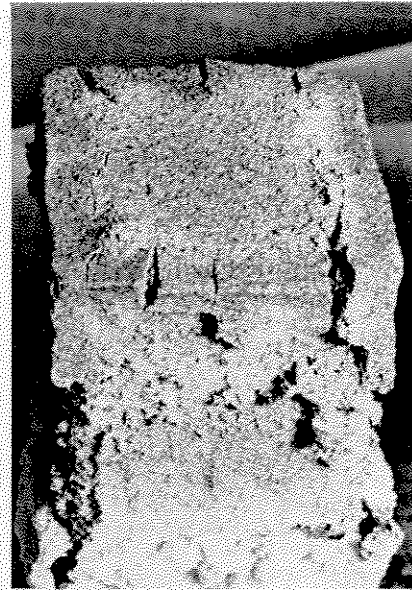


Fig. 13. Prisme de molasse soumis à la remontée capillaire d'une solution de sulfate de sodium.

Fig. 12. Tuyau de drainage en terre cuite soumis à la remontée capillaire d'une solution de sulfate de sodium.



méthodes aptes à limiter ou supprimer la pénétration et la circulation d'eau dans le matériau agissent favorablement. Dans des cas particuliers, il est possible d'éliminer les sels solubles. Cependant, cette méthode est réservée aux objets de grande valeur en raison de son coût élevé.

#### 7. BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- ARNOLD, A., « Nature and reactions of saline minerals in walls », The Conservation of Stone, II, Centre Conservazione Sculture All'Aperto, Bologna, 1981, pp. 13-23.
- DUTRUEL, F. et R. GUYADER, « Considérations sur les efflorescences des bétons apparents », Ciments Bétons Plâtres Chaux, N° 6, (1977), pp. 340-349.
- HOWARD, J. M. H., « The analysis of soluble salts in building materials », Chem. Ind. (1967), pp. 688-695.
- WEBER, H., « Fassadenschutz », Expert Verlag, Grafenau (1980).
- WINKLER, E. M., « Stone: Properties, Durability in Man's Environment », 2nd Ed. Springer Verlag, Wien, New York (1975).

Adresse des auteurs:

Professeur V. FURLAN  
EPFL - Laboratoire de  
conservation de la pierre  
Ch. de Bellerive 32  
1007 Lausanne

Y. HOUST  
EPFL - Laboratoire des  
matériaux de construction  
Ch. de Bellerive 32  
1007 Lausanne