



Altération par les sels des pierres de construction: Influence des propriétés capillaires et des conditions d'évaporation

Matthieu Angeli, Jean-Philippe Bigas, Beatriz Menendez, Ronan Hébert,
Christian David

► To cite this version:

Matthieu Angeli, Jean-Philippe Bigas, Beatriz Menendez, Ronan Hébert, Christian David. Altération par les sels des pierres de construction: Influence des propriétés capillaires et des conditions d'évaporation. 24e rencontres universitaires du génie civil (AUGC 2006) à la grande motte, Jun 2006, La grande motte, France. publication sur CD Rom, 2006. hal-00239470

HAL Id: hal-00239470

<https://hal.science/hal-00239470>

Submitted on 5 Feb 2008

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

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

Altération par les sels des pierres de construction:

Influence des propriétés capillaires et des conditions d'évaporation

M. Angeli¹, J.-P. Bigas², B. Menéndez¹, R. Hébert¹ & C. David¹

1 Laboratoire de Tectonique - équipe « Pétrophysique et Tectonique des Bassins » (CNRS UMR 7072)

2 Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil

Université de Cergy-Pontoise – 5 Mail Gay-Lussac, Neuville-sur-Oise, 95031 Cergy-Pontoise, France.

matthieu.angeli@u-cergy.fr

RÉSUMÉ. L'importance de l'imbibition capillaire et des processus d'évaporation dans l'altération des pierres de construction sous l'action de la cristallisation des sels solubles est estimée par différents modes opératoires adaptés de la norme européenne EN 12370. Les différents tests consistent à modifier les conditions de l'apport en sel (sulfate de sodium) dans le réseau poreux des pierres ainsi que les possibilités d'évaporation, et de suivre l'évolution de la détérioration. Les résultats montrent que la dissolution de sels en quantité insuffisante dans le réseau poreux n'altère pas la pierre. Un apport extérieur de sels est nécessaire. L'influence de l'évaporation est aussi clairement démontrée par la localisation des dégâts dans les zones non-isolées.

ABSTRACT. The importance of capillary imbibition and evaporation processes on the decay of building stones under salts crystallization is estimated through different experiments adapted from European standard EN 12370. The different tests consist in modifying the conditions of salt supply (sodium sulphate) in the porous network as well as the possibilities of evaporation, and following the evolution of weathering. The results show that dissolution of preexistent salts is not sufficient to alter the stones. An external salt supply is necessary. The influence of evaporation is also clearly demonstrated by the localization of the damage in the non-isolated zones.

MOTS-CLÉS : altération, pierre de construction, sels, cristallisation, capillarité, évaporation.

KEYWORDS : alteration, building stone, salts, crystallization, capillarity, evaporation

1. Introduction

Les sels solubles sont responsables des principales formes d'altération des pierres naturelles de construction, tels que des efflorescences, de l'alvéolisation et des desquamations. Les sels transportés par l'eau pénètrent dans le réseau poreux par imbibition capillaire et peuvent avoir des origines variées (atmosphère, mortier de pose...). Les principaux paramètres qui influencent ces processus de détérioration sont ceux de la roche (résistance en compression, flexion, traction, cohésion entre les grains), ceux du réseau poreux (tortuosité, constrictivité, rayon de pore moyen) ainsi que ceux du sel (localisation de la cristallisation, pression de cristallisation, forme des cristaux) (Flatt 2002, Benavente et al. 2004, Scherer 2004, Steiger 2005a, b).

Cinq pierres naturelles de construction et un sel (sulfate de sodium) ont été utilisés pour mesurer l'influence des propriétés capillaires et des conditions d'évaporation dans le processus d'altération par les sels.

2. Matériaux et méthodes

2.1. Matériaux

Le tableau 1 présente les caractéristiques des cinq pierres naturelles de construction étudiées, à savoir des calcaires du Lutétien (roche fine F, roche franche R et liais L) et grès de Fontainebleau (grès tendre T et grès dur D) provenant de carrières du Bassin Parisien encore en activité.

	F	R	L	T	D
Porosité en %	36.1	20.3	14.0	10.7	5.9
Absorption en %	28.2	10.4	8.4	1.9	0.8
Densité apparente en g.cm ⁻³	1.72	2.13	2.30	2.36	2.49
Densité réelle en g.cm ⁻³	2.69	2.67	2.67	2.64	2.64
Coef. de capillarité en g.m ⁻² .s ^{-1/2}	1250	101	34	95	3
Résistance en traction en MPa	1.5	3.0	4.2	2.5	5.2

Table 1. Paramètres physiques des roches utilisées dans les expériences.

2.2. Méthodes

L'essai normalisé EN 12370 concernant la résistance à la cristallisation des sels dans les pierres de construction a été largement appliqué (Goudie et Viles 1997). Afin de tenir compte des effets de l'imbibition capillaire et de l'évaporation sur le

processus de cristallisation des sels, quatre essais différents adaptés de cette norme ont été réalisés sur des échantillons de $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$, pour des cycles d'altération de 24h (2h d'apport de sel, 16h de séchage à $105 \pm 5^\circ\text{C}$ et HR élevée, 6h de séchage à $20\text{-}25^\circ\text{C}$ et HR 40-55%). Tous les échantillons sont pesés après chaque cycle avec une balance de précision ($\pm 0.01 \text{ g}$).

- essai d'immersion (IMM) : les échantillons sont immergés dans une solution de mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) saturée à 14%.
- essai d'imbibition capillaire (CAPI) : les échantillons sont partiellement immergés (8 ± 3 millimètres) dans une solution saturée en mirabilite.
- essai de remobilisation (REMOB) : les échantillons sont totalement immergés avant le début des cycles pendant deux jours dans une solution saturée en mirabilite, puis séchés jusqu'à masse constante. Lors des cycles, ils sont partiellement immergés (8 ± 3 millimètres) dans de l'eau déminéralisée.
- essai de remobilisation et d'imbibition capillaire (CAPI&REMOB) : les échantillons sont immergés pendant deux jours dans une solution saturée en mirabilite avant le début des cycles, séchés jusqu'à masse constante, puis, à chaque cycle, partiellement immergés (8 ± 3 millimètres) dans une solution saturée en mirabilite.

Afin de simuler des conditions d'évaporation réalistes, les mêmes expériences ont été effectuées sur des échantillons avec seulement un côté exposé à l'évaporation (ou deux en cas de pierres d'angle), les autres étant isolés par un film d'aluminium autocollant. Après 7 cycles, un échantillon de chaque expérience a été séché à $105 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante, puis de nouveaux cycles ont été réalisés.

La détérioration de la pierre est évaluée de manière visuelle par un indice d'altération IA correspondant au nombre de cycles à partir duquel le premier signe d'altération (perte de matière) apparaît. IA a été défini sur trois échantillons pour chaque expérience après 10 cycles pour l'essai d'immersion et 15 cycles pour les autres essais (tableau 2).

3. Résultats et discussion

3.1. Influence des propriétés capillaires

La figure 1 présente le rapport entre IA et les coefficients de capillarité de chaque pierre. La tendance observée atteste que le coefficient de capillarité a un rôle plus marqué sur le développement des altérations que la porosité et l'absorption.

	IMM	CAPI	REMOB	CAPI&REMOB
Non isolées				
F	2	3	15	2
R	4	8	15	5
L	6	10	15	8
T	3	5	15	3
D	10	15	15	15
4 faces isolées				
F	2	3	15	2
R	6	10	15	8
L	10	15	15	15
T	4	6	15	4
D	10	15	15	15
3 faces isolées (pierre d'angle)				
F	Pas de données	2	Pas de données	1
T	Pas de données	5	Pas de données	3

Table 2. Valeurs de l'indice d'altération (IA) pour chaque essai: immersion (IMM), imbibition capillaire (CAPI), remobilisation (REMOB) et imbibition capillaire et remobilisation (CAPI&REMOB).

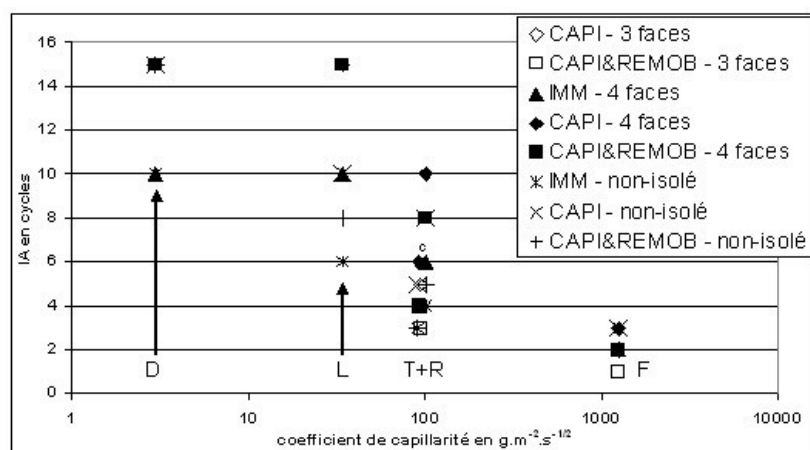


Figure 1. Corrélation entre l'indice d'altération et le logarithme du coefficient de capillarité

3.1.1. *Essai d'immersion*

La roche D, de coefficient capillaire et de porosité faibles, est la plus résistante à la cristallisation de mirabilite (IA=10). Les roches L (IA=6) et R (IA=4) souffrent de légers dégâts, mais après plusieurs cycles de prise de sel sans altération. A l'opposé, les roches T (IA=3) et F (IA=2) sont fortement détériorées avec une perte de poids très importante, en relation avec leur coefficient capillaire élevé (apport de sel important et rapide) et leur faible résistance en traction.

3.1.2. *Essai d'imbibition capillaire*

Nous retrouvons dans ce test les 3 mêmes groupes que lors du test d'immersion : D la plus résistante (IA=15), L et R intermédiaires (IA=10 et 8), et F et T plus fragiles (IA=5 et 3). Nous pouvons cependant noter que les délais d'apparition des dégâts sont plus longs que pour l'essai d'immersion. En effet, la surface accessible pour l'eau est 6 fois plus petite (1 face au lieu de 6), donc l'apport en sel est beaucoup moins efficace.

3.1.3. *Essai de remobilisation*

Pour les échantillons non isolés, la masse reste constante et aucun dégât n'est visible pendant la durée de l'expérience. On peut noter cependant la présence d'efflorescences parfois importantes. Comme il n'y a aucun apport de sel extérieur et que les échantillons sont totalement séchés avant la pesée, cela signifie qu'il n'y a aucune perte de matériel. La remobilisation des sels par l'eau déminéralisée pour former les efflorescences n'implique pas de contraintes endommageant l'échantillon. En conséquence, aucun dégât n'a été induit par la présence des sels avant le début des cycles. Ceci est l'illustration du fait que la dissolution de thénardite (Na_2SO_4) dans l'eau déminéralisée (lorsque cette thénardite est en quantité insuffisante dans le réseau poreux) ne peut impliquer une sursaturation vis-à-vis de la mirabilite, et donc une propagation des contraintes aux murs de pores. Un apport extérieur de sels est nécessaire, en accord avec les modèles thermodynamiques actuels sur le rôle de la sursaturation (Rodriguez-Navarro et al. 2000, Flatt 2002).

3.1.4. *Essai d'imbibition capillaire et remobilisation*

Les dégâts apparaissent plus rapidement par rapport à la seule imbibition capillaire (fig 2a, b). La présence initiale de thénardite dans le réseau poreux entraîne une sursaturation plus rapide en mirabilite à l'intérieur des pores. Ceci est dû au fait que la thénardite déjà présente dans l'échantillon au début des cycles se dissout dans la solution saturée en mirabilite qui s'introduit dans l'échantillon par capillarité, provoquant plus rapidement la sursaturation de la solution en mirabilite, et donc la transition des contraintes aux murs de pores.

3.2. *Influence des conditions d'évaporation*

Afin de mesurer l'importance du processus d'évaporation, des essais ont été réalisés en utilisant des échantillons avec trois ou quatre de leurs faces isolées par un

film d'aluminium. Nous remarquons que le nombre de faces isolées, l'intensité et la localisation des dégâts sont reliés : plus le nombre de faces isolées est important, moins l'échantillon est endommagé même si l'altération apparaît plus rapidement sur les faces non-isolées (tableau 2, fig. 3a, b, c). Aussi les dégâts sont toujours localisés sur les faces où l'évaporation est possible.



Figure 2a. *roche fine F non-isolée après 6 cycles d'imbibition capillaire (CAPI).*



Figure 2b. *roche fine F non-isolée après 6 cycles d'imbibition capillaire et remobilisation (CAPI&REMOB).*

L'essai de remobilisation avec 4 faces isolées permet d'observer que l'augmentation de poids est liée à l'eau non évaporable dans les conditions de l'expérience (HR, température et durée de séchage). Cette augmentation s'arrête dès que les zones du réseau poreux où l'eau ne peut pas s'évaporer seront totalement remplies, i.e. l'équilibre est atteint. Le séchage des échantillons après 7 cycles tend à le prouver: l'échantillon retrouve son poids initial, confirmant que la masse en excédent est celle de l'eau piégée dans l'échantillon (fig. 4).

Le même comportement est observé lors du séchage dans le cas de l'essai d'imbibition capillaire (fig. 5). Après le 7ème cycle, la variation de masse relative est semblable à celle de l'échantillon non-isolé. Ceci signifie que la différence entre les deux courbes de masse provient de l'eau non évaporable au cours du cycle, et que cela n'a aucune influence sur l'apport en sels dans les échantillons. Cette différence peut être reliée aux possibilités d'évaporation de la saumure présente dans les pores. En effet, les pierres sont les mêmes dans les deux expériences, donc l'apport de sel et la résistance mécanique sont similaires pour les deux expériences, seule l'évaporation diffère.



Figure 3a. échantillon non-isolé de F après le 12^e cycle (CAPI).



Figure 3b. échantillon de F avec 3 faces isolées après le 12^e cycle (CAPI).



Figure 3c. échantillon de F avec 4 faces isolées après le 12^e cycle (CAPI)

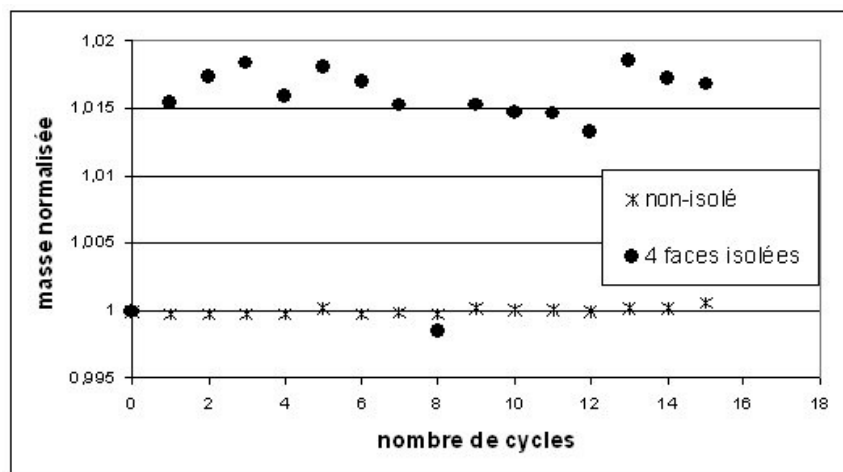


Figure 4. Pourcentage de la masse initiale en fonction du nombre de cycles - test de remobilisation pour la roche franche R.

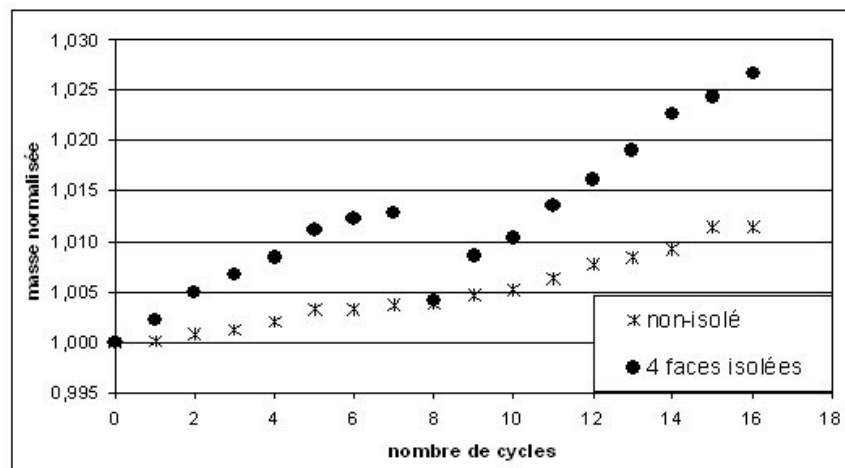


Figure 5. Imbibition capillaire pour échantillons non-isolés et avec 4 faces isolées pour le liais (L).

Les expériences avec plusieurs faces isolées confirment qu'en plus de l'imbibition capillaire, l'évaporation est un autre processus important régissant l'altération par le sel comme suggéré dans la littérature (Goudie et Viles 1997, Rodriguez-Navarro et Doehne 1999, Rodriguez-Navarro et al. 2000).

4. Conclusion

Un indice d'altération permettant de quantifier l'altération par les sels des pierres de construction est proposé. Sur les cinq roches étudiées, le grès dur D montre le meilleur comportement, les moins résistantes sont la roche fine F et le grès tendre T, les autres pierres présentant des comportements intermédiaires.

Le coefficient capillaire est le paramètre pétrophysique concernant les caractéristiques des réseaux poreux qui est le plus approprié pour évaluer l'altération des pierres par la cristallisation des sels. Il quantifie la possibilité de mouvement d'eau et entraîne des mécanismes de cristallisation-dissolution d'autant plus nocifs que les pierres sont poreuses.

L'essai de remobilisation suggère qu'aucune contrainte mécanique liée à la cristallisation des sels ne peut être transmise aux échantillons si aucun sel n'est apporté par le fluide circulant dans le réseau poreux, même si la pierre contient initialement des sels. En effet dans ce cas la solution n'est jamais sursaturée et ne peut transmettre les contraintes aux murs de pores.

Le processus d'évaporation conditionne à la fois la localisation et l'intensité des dégradations. Les faces isolées restent toujours saines. Cependant, l'évaporation n'a pas d'influence directe sur la quantité de sels accumulés dans le réseau poreux.

5. Bibliographie

- Benavente D., García del Cura M. A., García-Guinea J., Sánchez-Moral S., Ordóñez S., «Role of pore structure in salt crystallisation in unsaturated porous stone», *Journal of Crystal Growth*, 260, 2004, p. 532-544.
- EN 12370, « Determination of resistance to salt crystallization », Natural stone test methods, 1999-03, 1999.
- Flatt R. J., « Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated », *Journal of Crystal Growth*, 242, 2002, p. 435-454.
- Goudie A. S. & Viles H., *Salt weathering hazard*, Chichester, John Wiley & Sons, 1997.
- La Iglesia A., González V., López-Acevedo V., Viedma C., « Salt crystallization in porous construction materials : I Estimation of crystallization pressure », *Journal of Crystal Growth*, 177, 1997, p. 111-118.
- Rodriguez-Navarro C., Doehne E., « Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern », *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 1999, p. 191-209.
- Rodriguez-Navarro C., Doehne E., Sebastian E., « How does sodium sulphate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials », *Cement and Concrete research*, 30, 2000, p. 1527-1534.
- Scherer G. W., « Stress from crystallization of salt », *Cement and Concrete Research*, 34, 2004, p. 1613-1624.
- Steiger M., « Crystal growth in porous materials – I: The crystallization pressure of large crystals », *Journal of Crystal Growth*, 282, 2005a, p. 455-469.
- Steiger M., « Crystal growth in porous materials – II: Influence of crystal size on the crystallization pressure », *Journal of Crystal Growth*, 282, 2005b, p. 470-481.