

**Archaeological site Coudenberg.  
Study on the process of construction  
materials deterioration**

A material-technical research has been carried out on the building materials of the archaeological site Coudenberg at Brussels. The salt damage phenomena are investigated in relation to the actual climate as basis for an environmental management. It turned out that a climate in which the relative humidity is constantly stabilized between 50 and 60% could reduce the salt damage on the building materials. Alternatively, a salt extraction procedure according to modalities defined through a test application is recommended. The salt crystallization pressures provoked damage to the building materials generally in the form of powdering. This surface alteration was visualized by hardness profiles obtained by means of a drilling device. Consolidation tests proved to have a positive effect, except for the bricks showing severe crack formation as a consequence of the vibrations resulting from passing trams and busses on the square above this part of the archaeological site. The problematic of the humid conditions of underground built constructions, and consequently biological contamination, is discussed.

**Hilde De Clercq** a fait ses études à l'Université de Gand, et est Docteur en sciences chimiques. Elle travaille depuis 18 ans à l'Institut royal du Patrimoine artistique (IRPA) dans le Département Laboratoires, dans la cellule des Monuments, actuellement en tant que Chef de Département. Ses spécialisations se situent dans le domaine des traitements des monuments et de la performance des matériaux contaminés par les sels solubles. Elle est membre de plusieurs comités scientifiques et représente la Belgique dans le *Steering Committee of the Joint Programming Initiative Cultural Heritage and Global Change, a Challenge for Europe*.

**Roald Haven** a fait ses études d'ingénieur civil à la KU Leuven et travaille depuis 4 ans à l'Institut royal du Patrimoine artistique (IRPA) dans le Département Laboratoires, dans la cellule des Monuments. Ses spécialisations se situent dans le domaine de la caractérisation et l'analyse des propriétés physico-mécaniques des matériaux poreux de construction en général et des mortiers en particulier, ainsi que des études climatologiques.

**Sebastian Godts** travaille depuis 2 ans à l'Institut royal du Patrimoine artistique. En 2007, il a obtenu un master en conservation de la pierre à l'Académie royale des Beaux-Arts d'Anvers. Après ses études, il a travaillé comme restaurateur privé et a effectué un stage dans le Département Conservation de l'IRPA. En 2009, il a obtenu une bourse d'études supérieures pour un an au *Getty Conservation Institute* à Los Angeles. Ses spécialisations se situent dans le domaine de la conservation des monuments, des sites archéologiques et des matériaux contaminés par les sels solubles.

**Laurent Fontaine** est géologue diplômé de l'Université libre de Bruxelles. Il travaille depuis plus de 2 ans à l'Institut royal du Patrimoine artistique au sein de la cellule des Monuments. Ses spécialisations se situent dans le domaine de l'identification des pierres naturelles, la composition des mortiers historiques et la détermination des causes d'altération des matériaux de construction.

**Mohamed Rich** a obtenu le grade d'ingénieur industriel option chimie analytique à l'Institut Meurice (Anderlecht, Bruxelles) et travaille en tant qu'analyste au Laboratoire de l'Institut royal du Patrimoine artistique depuis avril 2002.

THEMA  
& COLLECTA  
2 / 2012

Documentation  
du Patrimoine

## Site archéologique du Coudenberg Étude sur les processus de détérioration des matériaux de construction

Hiide De Clercq  
Roald Hayen  
Sebastiaan Godts  
Laurent Fontaine  
Mohamed Rich

Faites études à l'Université  
docteur en sciences chimiques,  
mais 18 ans à l'Institut royal  
Historique (IRPA) dans le  
ratoires, dans la cellule  
actuellement en tant que  
nement. Ses spécialisations  
domaine des traitements  
et de la performance des  
minés par les sels solubles.  
plusieurs comités  
présente la Belgique dans le  
*ree of the Joint Programming  
Heritage and Global  
ige for Europe.*

Il ses études d'ingénieur  
en et travaille depuis 4 ans  
du Patrimoine artistique  
épartement Laboratoires,  
Monuments. Ses  
situent dans le domaine de  
et l'analyse des propriétés  
ques des matériaux  
ction en général et des  
culier, ainsi que des études

travaille depuis 2 ans à  
u Patrimoine artistique. En  
un master en conservation  
adémie royale des Beaux-  
près ses études, il a travaillé  
eur privé et a effectué un  
artement Conservation  
09, il a obtenu une bourse  
ures pour un an au *Getty  
fitude* à Los Angeles. Ses  
situent dans le domaine  
n des monuments, des sites  
t des matériaux contaminés  
es.

est géologue diplômé de  
de Bruxelles. Il travaille  
ns à l'Institut royal du  
ique au sein de la cellule des  
spécialisations se situent  
le l'identification des pierres  
position des mortiers  
étermination des causes  
atériaux de construction.  
obtenu le grade d'ingénieur  
chimie analytique à  
e (Anderlecht, Bruxelles) et  
pu analyste au Laboratoire  
du Patrimoine artistique

Perché sur la colline du Coudenberg qui  
dominait la ville, le palais de Bruxelles était  
l'une des plus belles résidences princières  
d'Europe. Ses origines remontent au  
XII<sup>e</sup> siècle. Au XIII<sup>e</sup> siècle, les ducs de Brabant  
décidèrent de conférer à la ville un rôle central  
dans leur politique. De ce fait, le château  
défensif ne tarda pas à devenir un haut lieu de  
la diplomatie et un endroit de plaisance.

Lorsque le duché de Brabant échoit  
aux mains des ducs de Bourgogne, et plus  
particulièrement à Philippe le Bon, la ville de  
Bruxelles entend bien attirer ces riches princes,  
les plus dépendants de l'époque, entre ses murs.  
A cette fin, la ville entreprend l'édification,  
entre 1452 et 1460, d'une prestigieuse salle  
d'apparat, l'Aula Magna. Leur successeur,  
Charles Quint, l'empereur le plus puissant  
d'Occident, veille personnellement au  
développement du palais durant la première  
moitié du XVI<sup>e</sup> siècle. C'est sous son règne  
qu'une imposante chapelle de style gothique fut  
érigée non sans peine. A la suite d'un incendie  
survenu en février 1731, le prestigieux bâtiment  
fut fortement endommagé. Quarante ans plus  
tard, les ruines du palais furent rasées et le  
terrain, nivelé, pour faire place au quartier de la  
place Royale.

Les vestiges de cet édifice sont  
actuellement classés au titre de Monument

et forment le site archéologique du  
Coudenberg, accessible au public depuis  
2000. La *fig. A* présente un plan du site  
archéologique du Coudenberg et du musée  
attenant, installé dans l'ancien hôtel  
d'Hoogstraeten.

Depuis l'ouverture au public, de  
nombreuses interventions ont été réalisées,  
visant à rendre l'environnement du site plus  
confortable pour les visiteurs et le personnel.  
Une de ces interventions a consisté en  
l'installation d'un système de soufflerie. Mis  
en contact avec le milieu souterrain durant  
plusieurs siècles, les vestiges archéologiques  
avaient jusqu'à lors toujours été soumis  
à des conditions humides et salines. Le  
fonctionnement de la soufflerie a entraîné de  
fortes fluctuations du climat et est à l'origine  
des processus de dégradation des matériaux  
de construction. Une étude approfondie  
de ces phénomènes a été réalisée. L'objectif  
était de connaître les conditions climatiques  
actuelles régnant dans le site archéologique  
afin d'estimer le risque éventuel d'une  
dégradation due aux cycles de gel-dégel,  
aux cycles de cristallisation-dissolution  
de sels solubles et au développement des  
micro-organismes. En outre, les propriétés  
mécaniques des briques ainsi que l'effet d'un  
traitement de consolidation ont été étudiés.

Pour plus d'information:  
[www.coudenberg.com](http://www.coudenberg.com)

## Climat

Au total, 28 enregistreurs climatiques (Madgetech RHTemp1000 SS) ont été positionnés dans le site archéologique le 2 mars 2010 et laissés sur place pendant 9 mois. Les données du climat extérieur ont été fournies par l'Institut royal météorologique de Belgique (IRM) à Uccle. L'analyse des données montre que l'influence de la soufflerie de la chapelle est la plupart du temps prédominante sur celle du site souterrain. La « signature » de la soufflerie dans l'évolution de la température et de l'humidité relative peut être reconnue dans le corps de logis (excepté les deux caves), l'entière de la chapelle et le bas de la rue Isabelle. L'Aula Magna et la partie haute de la rue Isabelle sont plutôt influencées par une ventilation naturelle.

La soufflerie de la chapelle a été conçue pour capter l'air extérieur, le chauffer et l'envoyer dans le site archéologique. Le refroidissement de l'air, quand il fait trop chaud à l'extérieur, ne peut pas être réalisé par ce genre de soufflerie. Le réchauffement de l'air extérieur en hiver a pour conséquence que l'humidité relative (HR) descend à des valeurs inférieures à 20% /fig. B. De plus, cette figure témoigne de la présence de fluctuations importantes de l'HR au cours de l'année. Suite à cette investigation, il a été recommandé d'éviter le réchauffement d'air froid et sec et d'opter pour un système de climatisation qui réglerait plutôt l'HR que la température. Une fourchette de l'HR acceptable, tant pour les visiteurs que pour la bonne conservation des matériaux de construction, a été définie sur base des résultats de la contamination en sels solubles afin de pouvoir minimiser leurs cycles de cristallisation-solubilisation.

### Contamination en sels solubles

Les vestiges archéologiques, vu leur histoire et leur préservation en sous-sol dans des

conditions humides et salines, sont de manière générale chargés en sels solubles. Lorsqu'elle se produit dans les pores du matériau, la cristallisation de sels peut entraîner des contraintes mécaniques supérieures aux valeurs de résistance interne des briques résultant en une détérioration progressive par pulvérisation (Rodríguez-Navarro et al. 2000; Steiger 2005a; Steiger 2005b; Coussy 2006). Cet effet peut être accentué pour certains sels qui, selon les conditions ambiantes, peuvent présenter des phases cristallines anhydres ou hydratées entre lesquelles il existe des variations de volume (c'est le cas pour le carbonate de sodium par exemple).

La contamination des briques en sels solubles exige le maintien de conditions climatiques adéquates afin de minimiser la fréquence des cycles de cristallisation-solubilisation. Le dernier phénomène est le résultat du « point de transition » typique selon la nature du sel (Grassegger & Schwarz 2008). Par exemple, le point de transition du sel de mer, le chlorure de sodium (NaCl), se situe à 75% (en tant que sel individuel). Ceci implique qu'à des conditions d'humidité relative inférieures à 75%, le chlorure de sodium sera présent sous sa forme cristalline. Aussi, un mur contenant ce type de sel pourra sécher. Dans des conditions d'HR équivalentes ou supérieures aux points de transition, les sels vont absorber de l'eau de l'atmosphère. Ce phénomène est appelé l'hygroscopicité des sels et entraîne la formation des taches humides. Un climat caractérisé par des fluctuations fréquentes autour de ce point de transition entraînera de fréquents cycles de cristallisation-solubilisation (Lubelli 2006).

Les points de transition des sels individuels sont bien connus (Grassegger & Schwarz 2008). Par contre, dans la majorité des cas, les matériaux de construction sont contaminés par un mélange complexe de sels (De Clercq 2006, De Clercq 2008). L'évaluation du caractère plus ou moins

s, sont de manière  
bles. Lorsqu'elle  
matériau, la  
traîner des  
frières aux  
des briques  
n progressive par  
varro et al. 2000;  
b; Coussy 2006).  
our certains sels  
nantes, peuvent  
nes anhydres  
; il existe des  
cas pour le  
mple).  
iques en sels  
e conditions  
le minimiser  
ristallisation -  
énomène est le  
ion» typique  
egger & Schwarz  
t de transition du  
hum (NaCl), se  
ndividuel). Ceci  
s d'humidité  
chlorure de  
forme cristalline.  
type de sel  
ditions d'HR  
aux points de  
rber de l'eau  
nème est appelé  
ntraîne la  
es. Un climat  
ons fréquentes  
ion entrainera  
lisation -  
),  
des sels  
s (Grassegger &  
dans la majorité  
struction sont  
complexe de  
ercq 2008).  
us ou moins

néfaste d'un tel mélange nécessite une  
approche thermodynamique (Bionda &  
Storemynr 2002) qui est à la base du  
modèle ECOS (*Environmental Control of  
Salts*), capable de simuler les séquences  
de cristallisation en fonction du climat  
(température ou humidité relative).

Pour l'ensemble du site archéologique du  
Coudenberg, une étude de la contamination  
en sels solubles a été réalisée. Dans cette  
publication, seuls quelques résultats obtenus  
pour la chapelle sont présentés. Localement,  
la contamination de la brique comprend un  
mélange de sels, dont une partie sous forme  
de carbonate de sodium, et d'autres sels de  
sodium qui cristallisent à des valeurs d'HR  
comprises entre 35 et 42% et entre 60 et  
65% *fig. C*, à gauche. La brique concernée est  
pulvérulente. Le climat actuel est caractérisé  
par des fluctuations importantes entre ces  
deux fourchettes d'HR *fig. B*. Par contre, le  
mortier du mur voisin contient une certaine  
teneur en sels hygroscopiques. Il s'agit d'un  
mélange salin composé principalement  
de chlorure de sodium, sel utilisé pendant  
des périodes d'hiver pour dégeler les rues,  
pavés et trottoirs, et de nitrate de calcium  
qui cristallisent dans des conditions d'HR  
inférieures à 35%. *fig. C*, à droite. En hiver,  
l'HR descend jusqu'à des valeurs de 16,5%  
*fig. B*, ce qui favorise la cristallisation des sels  
hygroscopiques.

Pour l'ensemble du site archéologique,  
un climat dont l'HR varie entre 50 et 60%  
pourrait de manière générale minimiser  
les phénomènes de dégradation par les sels  
solubles. Cette situation d'équilibre implique  
pour certaines zones que les sels seront  
continuellement en solution ou solubilisés  
dans l'eau de l'atmosphère, tandis que dans  
d'autres zones, ils seront continuellement  
présents sous forme cristallisée, sans  
provoquer de dégradations.

Si l'installation d'un système de  
climatisation adéquat se révèle impossible,  
une alternative pourrait être l'extraction des

sels à l'aide de pâtes d'extraction, et ceci selon  
des modalités mises au point préalablement  
par des essais d'extraction.

Néanmoins, certaines conditions ne  
permettent pas d'envisager une extraction  
durable. En effet, il a été observé localement  
que la concentration en sels solubles  
reste importante jusqu'à au moins 5 cm  
de profondeur. Avec le temps et à cause  
de la présence d'une source d'eau liquide  
(encore aujourd'hui, certaines zones du site  
archéologique souffrent d'infiltrations d'eau),  
les sels présents à l'intérieur de la brique et  
impossibles à extraire au moyen d'une pâte  
finiront par migrer à la surface. Et si à l'avenir  
se manifesterait le besoin de diminuer le taux  
d'humidité, il faut savoir que l'on risque de  
provoquer un assèchement des murs. Celui-ci  
entraînera une migration des sels à l'étroit de  
l'évaporation suivie d'une cristallisation, soit à  
la surface de la brique (efflorescence), soit dans  
les pores de celle-ci (cryptoefflorescence). Il  
serait souhaitable de procéder lors du séchage  
à des extractions de sels à l'aide d'une pâte  
plutôt sèche.

Préalablement à une extraction des  
sels, il est aussi recommandé d'appliquer un  
traitement au biocide. En effet, l'extraction  
exigeant de travailler dans des conditions  
humides, on risque la formation de moisissures  
dont la présence est bien attestée sur les zones  
humides du site archéologique *fig. D*. De plus,  
si la surface de la brique est pulvérulente, il sera  
nécessaire de procéder d'abord à un traitement  
de consolidation tel qu'exposé plus loin avant  
d'appliquer une pâte d'extraction.

### Propriétés des briques de l'Aula Magna

L'étude réalisée a montré que la brique de  
la maçonnerie de l'Aula Magna présente de  
nombreuses fissures. La brique utilisée à  
l'époque était déjà de piètre qualité car elle  
est très hétérogène et contient beaucoup de  
nodules d'argile visibles à l'œil nu. Après

extraction de l'argile du sol, la fabrication de briques en terre cuite de bonne qualité demandait de mouler l'argile avant de la malaxer parfois avec du sable pour obtenir un mélange homogène. La présence de nombreuses inclusions dans les briques de l'Aula Magna indique que la méthode pour homogénéiser l'argile n'était pas toujours systématiquement utilisée à l'époque.

Les propriétés mécaniques des briques ont été analysées à l'aide de l'appareil DRMS (*Drilling Resistance Measurement System*). L'hétérogénéité de la brique utilisée pour la construction de l'Aula Magna est bien illustrée par le profil de dureté présenté à la *fig. E* qui révèle une structure irrégulière et la présence de plusieurs fissures.

L'impact éventuel des différents facteurs externes pouvant expliquer le processus de fissuration des briques a été passé en revue : influence de cycles de gel-dégel, présence de sels destructifs, présence de composants expansifs comme de l'argile insuffisamment cuite, et des effets des vibrations provoquées par le trafic sur la place Royale au-dessus des vestiges de l'Aula Magna.

L'étude climatique du site a montré que les températures ne descendaient jamais en-dessous de 0 °C, ce qui permet d'exclure une dégradation par les cycles de gel-dégel.

Une influence de la cristallisation de sels hydrosolubles a également été exclue car les teneurs en sels mesurées dans les murs de l'Aula Magna sont généralement trop faibles pour provoquer de tels dégâts.

La présence de composants expansifs était plausible vu l'hétérogénéité des briques et la corrélation entre les inclusions et les fissures. Afin de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse, des fragments de briques en terre cuite ont été soumis à des variations d'humidité relative de l'atmosphère et l'évolution en poids de chaque fragment a été enregistrée. L'analyse de l'évolution du poids de la brique suite à une diminution de l'humidité relative de 80 à 40% a montré une

faible perte en poids de 0,8%. Etant donné que le climat de l'Aula Magna est caractérisé par des variations journalières de l'HR, nous avons également étudié l'influence sur le poids de la brique de cycles de 24 heures durant lesquels l'HR varie entre 80 et 40%. Le résultat *fig. F* montre que le poids de la brique suit l'évolution de l'HR avec un délai d'environ 6 heures. La variation maximale de poids est d'environ 0,25 à 0,3%, soit seulement un tiers de la perte en poids enregistrée lors de la diminution continue d'HR de 80 à 40% pendant 4 jours.

Etant donné qu'aucune déformation de la brique n'a été constatée suite aux variations d'humidité relative et qu'aucune perte de poids significative n'a été enregistrée, il est donc peu probable que des variations d'HR puissent être à l'origine des dégâts constatés sur le site.

En fin de compte, seul un dernier facteur restait en lice pour expliquer ces dégradations. Il s'agit des vibrations provoquées par les véhicules lourds qui traversent la Place Royale (le tram en particulier, mais aussi dans une moindre mesure, les autobus et les camions).

### Propriétés mécaniques des briques

#### Effet du traitement de consolidation

Les résultats des mesures DRMS réalisées sur les briques de l'ensemble du site archéologique confirment les phénomènes de pulvéulence ainsi que la faible cohésion. La contamination en carbonate de sodium, qui est un sel destructif, provoque sur des briques tendres de la pulvéulence, d'une part, et de l'altération superficielle, d'autre part. Le profil de dureté illustré à la *fig. G* montre une profondeur d'altération due aux cristallisations de sels allant jusqu'à au moins 22 mm.

Vu la constatation visuelle de pulvéulence superficielle, confirmée par les profils de dureté obtenus à l'aide de l'appareil DRMS, plusieurs zones de test ont fait l'objet d'un traitement de consolidation avec un produit



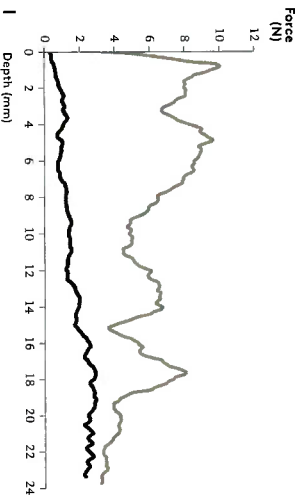
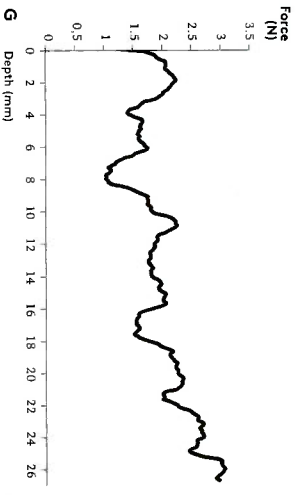
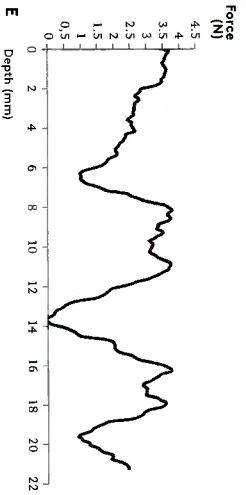
A



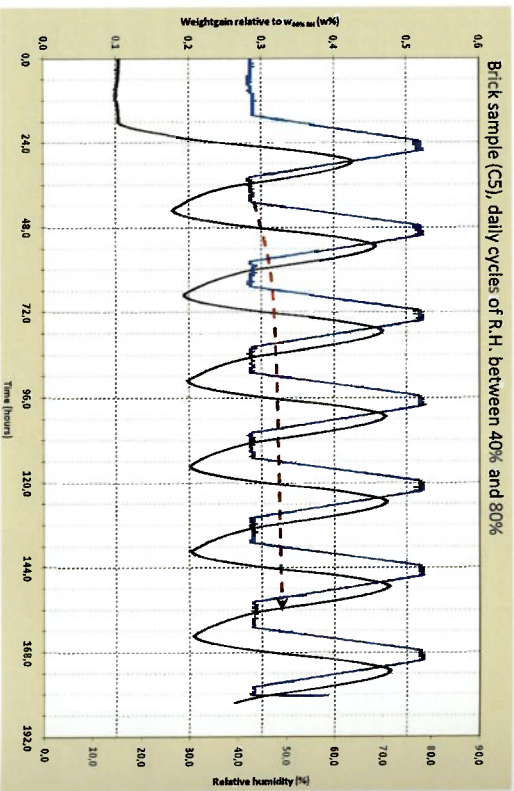
C

- A Plan général du site archéologique montrant les vestiges de logis (Magna (2) et de Magna (3), ainsi que l'avenue rue Isabelle (4) hôtel d'Hoogst (© Condenberg
- B Évolution de l'HR dans la ct





- E** Profil de dureté de la brique utilisée pour la construction de l'Aula Magna.
- F** Évolution du poids de la brique (courbe noire) sous l'influence des cycles d'HR de 24 heures entre 40 et 80% (courbe bleue).
- G** Profil de dureté montrant une altération due aux cristallisations de sels (dont le carbonate de sodium).
- H** Aula Magna, développement de moisissures 4 semaines après le traitement de consolidation.
- I** Profil de dureté d'une brique de la rue Isabelle avant (noir) et après (gris) 2 traitements de consolidation.



**H**

- Bibliographie**
- BIONDIA D., STORI** the behavior of salt: a case study from 1 Suomenlinna, Fin KONOVT, (ed), 7 deterioration meet brick walls influence changes, 2002, pp **COUSSY O.**, « Def stress from in-por crystallisation of Mech. Phys. Solids pp. 1517-1547.
- DE CLERCO H.**, « P Selected Material: Mixtures of Salts: Treatment », dans for the Restoration of Monuments, 12, 2 **DE CLERCO H.**, « B Contaminated wi of Sodium Sulpha Water Repellent » Journal for the Re and Monuments.
- GRASSEGER G.**, und Salzschäden SCHWARZ H.J., Salzschäden an K des DBU Workshop **JOVANOVIC M.** et moisture and salt effectiveness of T dans International Restoration of Bu vol. 15, n° 3, 2009.
- LUBELLI B.**, *Sodiu porous building* Delft University
- RODRIGUEZ-NAV** does sodium sul Implications for of building mate *Concr. Res.* 30, 2
- STEIGER M.**, « Cry materials-I, The of large crystals » 282, 2005 (a), PF
- STEIGER M.**, « Cry materials-II, Inf on the crystalliz dans *J. Cryst. Gro* pp. 470-481.

## Bibliographie

- BIONDIA D., STOREMYR P.**, « Modeling the behavior of salt mixtures in walls: a case study from Temalle von Feysen, Suomenlinna, Finland », dans VON KONOW T. (ed), *The study of salt deterioration mechanisms: Decay of brick walls influenced by interior climate changes*, 2002, pp. 95-101.
- COUSSY O.**, « Deformation and stress from in-pore drying-induced crystallisation of salt », dans *Journal Mech. Phys. Solids*, 54, 2006, pp. 1517-1547.
- DE CLERQ H.**, « Performance of Selected Materials containing Different Mixtures of Salts after Water Repellent Treatment », dans *International Journal for the Restoration of Buildings and Monuments*, 12, 2006, pp. 25-33.
- DE CLERQ H.**, « Behaviour of Limestone Contaminated with Binary Mixtures of Sodium Sulphate and Treated with a Water Repellent », dans *International Journal for the Restoration of Buildings and Monuments*, 14, 2008, pp. 357-364.
- GRASSEGER G., SCHWARZ H. J.**, « Salze und Salzsäuren an Bauwerken », dans SCHWARZ H. J., TEIGER M. (eds), *Salzschäden an Kulturgütern, Ergebnisse des DBU Workshops*, 2008, pp. 6-21.
- JOVANOVIC M.** et al., « Influence of moisture and salt content on the effectiveness of TEOS for consolidation », dans *International Journal for the Restoration of Buildings and Monuments*, vol. 15, n° 3, 2009, pp. 171-186.
- LUBELL B.**, *Sodium chloride damage to porous building materials*, PhD thesis, Delft University of Technology, 2006.
- RODRIGUEZ-NAVARRO C.** et al., « How does sodium sulphate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials », dans *Cem. Concr. Res.* 30, 2000, pp. 1527-1534.
- STEIGER M.**, « Crystal growth in porous materials-I, The crystallisation pressure of large crystals », dans *J. Cryst. Growth* 282, 2005 (a), pp. 455-469.
- STEIGER M.**, « Crystal growth in porous materials-II, Influence of crystal size on the crystallization pressure », dans *J. Cryst. Growth* 282, 2005 (b), pp. 470-481.

à base de silicate d'éthyle (éthylester d'acide silicique dont le poids sec est de 50%). Le nombre de traitements varie de 2 à 3 et chacun d'entre eux comprend 3 applications à refus. L'augmentation du nombre de traitements favorise la dureté de la zone traitée tandis que l'augmentation du nombre d'applications favorise la profondeur d'imprégnation.

Il faut souligner ici qu'un produit de consolidation ne fonctionne pas comme une colle et n'est donc pas capable de combler les nombreuses fissures présentes dans la brique de l'Aula Magna.

Lors de l'évaluation de l'effet de consolidation, l'apparition de moisissures sur les zones humides a été constatée. *fig. H* Les zones en question sont des zones qui étaient déjà assez humides au moment du traitement tandis que les zones plus sèches ne présentaient pas cette problématique. Un traitement au biocide à base de sel quaternaire d'ammonium au préalable est recommandé. Ce produit peut également être utilisé pour développer des algues ou de moisissures.

La *fig. I* illustre le profil de dureté d'une brique de la rue Isabella avant et après 2 traitements de consolidation.

L'ensemble de l'étude a permis de conclure que de manière générale un effet de consolidation trop élevé est obtenu après trois traitements, parfois même après seulement deux. Pour la consolidation des briques, un seul traitement de consolidation est dès lors recommandé, dont la consommation totale est environ 2 l/m<sup>2</sup>. Les murs humides ont tendance à absorber une quantité de produit de consolidation plus élevée. En effet, l'eau joue un double rôle contradictoire durant l'application (Jovanovic, 2009). Étant donné la nature organique du produit à base de silicate d'éthyle, la présence d'eau dans les matériaux de construction ne facilite pas son absorption. Mais en même temps, la présence d'eau favorise l'hydrolyse du produit de consolidation et le rend soluble. Cette dernière caractéristique favorise

l'absorption du produit de consolidation comme constaté dans le cas des zones humides.

## Conclusions

Une étude approfondie des phénomènes d'altération des matériaux de construction du site Coudenberg a été dûment réalisée. Son objectif était de connaître les conditions climatiques actuelles régnant dans le site archéologique afin d'estimer les risques éventuels de dégradation.

En raison de leur histoire et de leur préservation en sous-sol dans des conditions humides et salines, les matériaux de construction du site du Coudenberg sont localement chargés en sels solubles. Cette contamination en sels solubles exige le maintien de conditions climatiques adéquates afin de minimiser la fréquence des cycles de cristallisation-solubilisation. Pour l'ensemble du site archéologique, un climat dont l'HR varie entre 50 et 60% pourrait de manière générale minimiser les phénomènes de dégradation par les sels solubles.

Les résultats des mesures DRMS réalisées sur les briques de l'ensemble du site archéologique confirment les phénomènes de pulvérisation ainsi que la faible cohésion. La contamination en sel destructif provoque sur des briques tendres de la pulvérisation, d'une part, et de l'altération superficielle, d'autre part. Plusieurs zones de test ont fait l'objet d'un traitement de consolidation avec un produit à base de silicate d'éthyle. Lors de l'évaluation de l'effet de consolidation, l'apparition de moisissures sur les zones humides a été constatée.

Pour les briques de l'Aula Magna, les vibrations provoquées par les véhicules lourds qui traversent la Place Royale restent le seul facteur pour expliquer les phénomènes de fissuration.

