حماية سطح الحجارة الأثرية من الرطوبة

بلعيـبود بـدرالدين
أستاذ مساعد
معهد الآثار – جامعة الجزائر2

Résumé : L'eau est le facteur majeur du déclanchement des processus d'altération de la pierre archéologique sur la surface de la matière. De ce fait, la protection de la surface sera une stratégie incontournable pour prévenir toute action néfaste pour le matériau archéologique.

Le phénomène de la mouillabilité détermine le comportement des liquides avec les surfaces. Sur une surface hydrophobe, l'eau garde plutôt sa forme de gouttelette, et par conséquent la surface de contact avec le substrat devient minimale et l'angle de contact devient maximal. Par contre Sur une surface hydrophile une goutte d'eau pourra s'étendre facilement, et par conséquent la surface de contact avec le substrat devient maximale et l'angle de contact devient minimal.

A fin de protéger la pierre archéologique des effets de l'eau, les restaurateurs utilisent des matières qui rendent leurs surfaces hydrophobe, tels les cires et les résines synthétiques, les produits appliqués doivent être compatible et ne n'altèrent pas d'aspect original du matériau.

يؤثر المحيط على المادة الحجرية ويخضعها لمجموعة من العوامل الفيزيائية والكيميائية تؤدي الى تغيرات في مظهرها أو في بنيتها، ويعتبر الماء عاملا رئيسا في تلف الحجارة الأثرية، فقد يكون عاملا مباشرا كما هو الحال بالنسبة لظاهرة تجمده في الشبكة المسامية، أو إذابته لبعض الفلزات المشكلة للصخور، أو يكون تأثيره غير مباشر، إذ هو المسئول عن نقل الأملاح القابلة للذوبان عبر المسامات، كما يعتبر الماء عنصرا ضروريا لتكاثر وانتشار مختلف الكائنات الحية المسببة للتلف البيولوجي.

هناك عدة طرق لوقاية الحجارة الأثرية – سواء كانت تحفا أو موادا للبناء- من تأثير الرطوبة، فبالنسبة للمجموعات المتحفية الموجودة في قاعات العرض والمخازن فإن إستراتيجية الوقاية تقوم على خلق وسط ملائم، وذلك من خلال التحكم في الرطوبة النسبية باستعمال وسائل وتجهيزات مخصصة لهذا الغرض، وأما بالنسبة المباني الأثرية والتحف الموجودة في الوسط الخارجي فيتم وقايتها من تأثير الماء من خلال تطبيق مواد عازلة للرطوبة، فعند تطبيق هذا النوع من المواد تتشكل على سطح المادة طبقة رقيقة تمنع من تغلغل الماء وانتشاره على السطح.

ولفهم آلية عمل المواد المستعملة لحماية الحجارة الأثرية فإنه من الضروري فهم ظاهرة قابلية التبلل (Mouillabilité)، وهي من أهم العوامل التي تتحدد سلوك الماء مع السطح، فهي ظاهرة فيزيوكيميائية متعلقة بسلوك السوائل مع سطح المادة، فعندما ينتشر السائل ويتوزع على سطح صلب نقول أن هذا السطح جاذب للرطوبة (Hydrophile)، أما في حالة عدم انتشاره بطريقة متجانسة وكاملة نقول حينها أن

السطح عازل للرطوبة (Hydrophobe)، وتعتبر الرابطة الهيدروجينية من بين العوامل الأساسية التي تتحكم في هذه الظاهرة.[1]

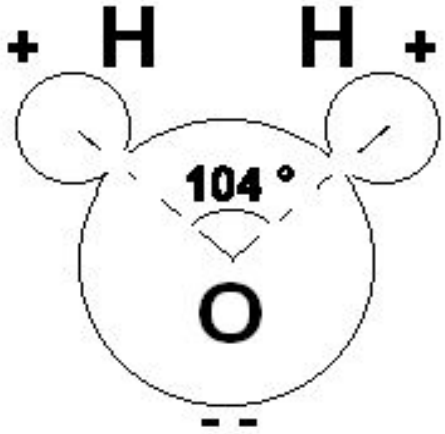
يظهر تأثير الرابطة الهيدروجينية من خلال الضغط السطحي للسائل، والذي يمكن فهمه من خلال حركة جزيئات الماء التي تنجذب فيما بينها، حيث أن كل جزيء من الماء يتعرض لنفس قوة الجذب في جميع الاتجاهات، أما في الطبقة الخارجية للسائل فالأمر مختلف، وذلك بسبب انخفاض كثافة الوسط الغازي، مما ينتج انجذاب الجزيئات السطحية للماء نحو مركز السائل.[2]

تكون قوة الضغط السطحي مماسية للسطح، وتختلف حسب طبيعة السوائل ودرجة الحرارة، ففي درجة حرارة 20 م° تصل قيمة قوة الضغط السطحي لبعض السوائل إلى ما يلي[3] (الوحدة دين/سم Dyne/cm):

- الزئبق : 485
- الماء : 72.8
- الأسيتون : 23.7
- الكحول الإيثيلي : 22.3
- البنزين : 22.3

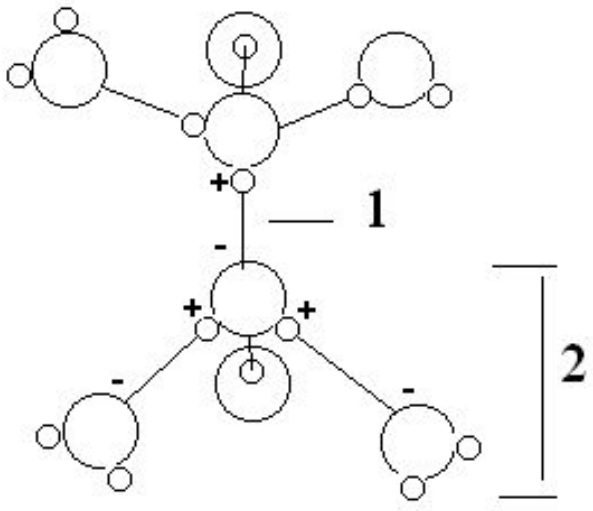
عادة ما يكون سطح البلورات المشكلة للحجارة غني بأيونات الأكسجين، هذا العنصر لديه درجة عالية من الإلكتروسلبية (Electronégativité)، فعند تشكيله لرابطة كيميائية مع عنصر آخر ينجذب الزوج الإلكتروني المشترك نحو ذرة الأكسجين، والتي في كثير من الأحيان تكون متصلة بذرات الهيدروجين (H) مشكلة مجموعة الهيدروكسيل (OH) فيتشكل قطبين كهربائيين، قطب سالب في طرف (O) وآخر موجب في طرف (H).[4] (الشكل رقم:1)

[1] DOMASLOSWSKI (W), *Conservation préventive de la pierre*, traduit par WOSZYCK (I), UNESCO, Paris 1982, p. 108.
[2] FORTUNIER (R), *Propriétés physiques, mécaniques des matériaux solides*, Paris 2006, p. 149.
[3] DOMASLOSWSKI (W), Op.cit, pp. 108-109.
[4] TORRACA (G), *Solubilité et solvants utilisés pour la conservation des biens culturels*, traduit par DEMARET (V) et al, ICCROM 1981, p. 5.



الشكل رقم 1: رسم توضيحي يظهر قطبية جزيء الماء.
عن (TORRACA 1981)

يسمى السطح التي تكون فيه الأقطاب الكهربائية الناتجة عن أيونات (O^{-2}) أو مجموعة (OH) بالسطح القطبي أو السطح الجاذب للرطوبة، وهذا بسبب جذبه لجزيئات الماء، وتعتبر الرابطة الهيدروجينية مسئولة عن هذه الظاهرة، فعند ارتباط ذرة (H) بذرة (O) بواسطة رابطة تكافئية ينجذب الزوج الإلكتروني نحو ذرة (O) كما أشرنا إلى ذلك آنفا، فينتج عن ذلك خلو طرف (H) من الإلكترونات، مما يتسبب في نشأة قوة جذب لشحنات سالبة في هذا الجزء، ويكون اتجاه هذه القوة مقابل للرابطة الكيميائية الأصلية لذرة (O)، هذا الأخير يمكنه تشكيل رابطتين هيدروجينيتين فضلا على الرابطتين التكافئيتين الأصليتين، أما ذرة (H) فيمكنها تشكيل رابطة هيدروجينية واحدة.[1] (الشكل رقم: 2)

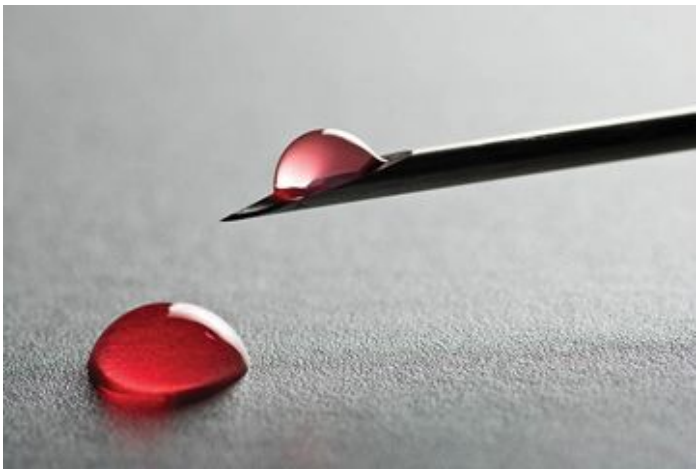


الشكل رقم 2: رسم توضيحي للروابط الهيدروجينية -1 و 2- بين جزيئات الماء.
عن (TORRACA 1981)

[1] FORTUNIER (R), Op.cit, p .76.

هناك العديد من المواد العضوية مثل الزيوت، المواد الدهنية والراتنجات المكونة أساسا من ذرات الكاربون والهيدروجين اللذين لهما إلكتروسلبية متقاربة، فعند تشكيل رابطة بينهما (C-H) تكون الإلكترونات المشتركة موزعة بشكل متجانس بين الذرتين، لذا فإنه لا يتكون أي قطب كهربائي في المجموعة، ونفس الشيء يحدث عند ارتباط ذرتين من الكاربون (C-C). تسمى المواد التي يكون فيها هذا النوع من الروابط الكيميائية بالمواد غير القطبية، ويكون سطحها عازلا للرطوبة، هذا الأخير لا يمكنه جذب جزيئات الماء لأنه من غير الممكن تشكيل روابط هيدروجينية معها، لذا نلاحظ أن جزيئات الماء فوق هذا السطح تتجذب نحو بعضها البعض مشكلة قطرات كروية عوض الانتشار على السطح.[1]

(الصورة رقم:1)



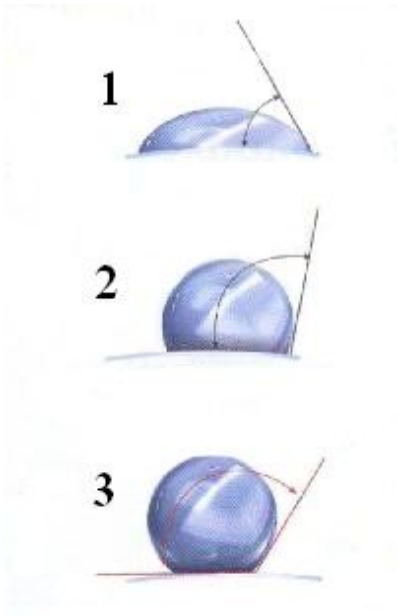
الصورة رقم 1: قطرات من سائل على سطح مادة عازل للرطوبة.

إن قوة التجاذب بين جزيئات الماء فيما بينها من جهة، وبين السائل والسطح من جهة ثانية تحدد وجود قابلية التبلل من عدمها، فيكون السطح قابل للتبليل عندما تكون قوة التجاذب بين السطح والسائل أكبر من قوة التجاذب بين جزيئات الماء فيما بينها، والعكس إذا كانت المادة غير قابلة للتبليل. تلعب طبيعة المادتين وخصائصهما دورا رئيسا في تحديد شدة هذه القوة، فعلى سبيل المثال تكون قوة التجاذب بين الماء والزجاج أكبر من قوة تجاذب جزيئات الماء فيما بينها، والعكس بالنسبة للزئبق مع الزجاج، إذا يمكن القول أن الزجاج قابل للتبلل بالماء وغير قابل للتبلل بالزئبق[2].

يمكن معرفة درجة قابلية تبلل سطح جسم ما من خلال قياس الزاوية التي يشكلها هذا السطح مع مماس سطح السائل الذي يمر بنقطة الالتقاء وتسمى زاوية التبلل، فكلما كانت قابلية التبلل كبيرة تكون هذه الزاوية صغيرة والعكس صحيح، أي لما تكون الزاوية منفرجة فهذا دليل على أن السطح له قابلية قليلة أو منعدمة للتبلل ، وكقاعدة يمكن القول أنه عندما تكون الزاوية التبلل أقل من 90° يكون الجسم

[1] TORRACA (G), *Matériaux de construction poreux*, traduit par DI MATTEO (C), ICCROM, Rome 1986, p. 16
[2] DOMASLOSWSKI (W), Op.cit, p. 109.

عازل للرطوبة، ولما تكون أكبر من 90° يكون الجسم جاذب للرطوبة كما هو الحال بالنسبة للسوائل القطبية. أما بالنسبة للسوائل غير القطبية فإنها تشكل زاوية التبلل صغيرة، بسبب ضعف أو انعدام الرابطة الهيدروجينية في السائل، مما يؤدي إلى انخفاض في قيمة ضغطه السطحي[1]. (الشكل رقم: 3)



الشكل رقم 3: رسم توضيحي يبين مختلف زاوية التبلل حسب طبيعة السطح.
1- سطح جاذب للرطوبة (قابلية التبلل قوية)
2- سطح نصف عازل للرطوبة (قابلية التبلل متوسطة)
3- سطح عازل للرطوبة (قابلية التبلل ضعيفة)

إن مختلف التأثيرات التي يتعرض لها الوسط المسامي لا تقتصر فقط على السطح الخارجي للمادة بل تتعداه إلى بنيته الداخلية، ما يؤدي بنا إلى الحديث عن السطح الخصوصي للمادة، والذي هو عبارة عن مجموع السطوح المشكلة من طرف العناصر الصلبة، فبالإضافة للسطح الخارجي للجسم الصلب تدخل جدران المسامات والشعيرات ضمن السطح الخصوصي، ويمكن تعريفه كذلك على أنه السطح القادر على تثبيت الجزيئات عن طريق ظاهرة الإمتزاز (Adsorption)، ويرتبط السطح الخصوصي ارتباطا وثيقا بالهندسة المسامية للمادة[2].

عند اتصال جسم سائل أو هلامي بآخر صلب تكون الجزيئات السطحية هي المسئولة عن ظاهرة قابلية التبلل، فمثلا عندما يطلى جسم صلب بسائل ما - حتى لو كان مكونا من طبقة رقيقة جدا (أحادية

[1] DOMASLOSWSKI (W), Op.cit, p. 110.
[2] BECK (K), *Etude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité*, thèse de doctorat en sciences des matériaux, université d'Orléans, soutenue octobre 2006, p. 73.

الجزيئات)- فإن هذا السطح يأخذ خصائص هذا السائل أو الهلام فيما يتعلق بقابلية التبلل، وهو مبدأ المواد العازلة للرطوبة التي تستعمل لحماية المواد الأثرية[1].

تستعمل عدة مواد للتقليل من تغلغل الماء وانتشاره على سطح الحجارة، والتي يجب أن تكون لها مقاومة جيدة للأشعة فوق بنفسجية (U.V)، كما يجب أن يكون سطح المادة نظيف وفي حالة الحفظ الجيد. تختلف المواد المطبقة بحسب نوع الحجارة ومحيطها، ومن بين أهم المواد التي تستعمل لهذا الغرض نجد:

1/ الشمع:

إن استعمال الشمع يعود للفترات القديمة، إلا أن تطبيقه قد يغير في المظهر الأصلي للمادة المعالجة من خلال اللمعان غير الطبيعي للسطح، ويتم معالجة ذلك في الخفض من تركيز الشمع قبل تطبيقه بمزجه بمذيب، ومن بين أهم أنواع الشمع المستعملة في مجال الصيانة[2] :

- شمع النحل:

يتكون شمع النحل أساسا من أستر حمض النخليك، وهو قابل للذوبان في معظم المذيبات العضوية كالأسيتون والتيريبانتين.

- البرافين:

يعتبر شمع البرافين من المستخلصات الناتجة عن عملية تكرير البترول، وهو عبارة عن مادة صلبة نصف شفافة، قابلة للذوبان في عدة مذيبات عضوية ما عدى الكحول، وللبرافين مقاومة جيدة للأحماض والأسس، ولكن من بين أهم مساوئه أنه عرضة لالتصاق جزيئات الغبار بسطحه خاصة إذا كان معرضا للحرارة (أشعة الشمس أو الإنارة) حيث يصبح الشمع لدنا.

- **الميكروكريستالين**:

هذا الشمع أيضا من نواتج تكرير البترول، كما يمكن تحضيره أيضا عن طريق عملية تفكيك جزيئات البرافين الذي يتكون من سلاسل كبيرة نوعا ما، عكس شمع الميكروكريستالين الذي يتكون من سلاسل ذات أبعاد صغيرة بحوالي 100 مرة، يذوب هذا الشمع بسهولة – خاصة بعملية التسخين- في مذيبات غير القطبية، وبصعوبة في المذيبات القطبية، وعلى العموم يمتاز هذا الشمع بخصائص تجعله من بين أكثر أنواع الشمع استعمالا، بحيث يمتاز بمقاومة كيميائية جيدة، ولا تلتصق به جزيئات الغبار وشوائب الجو، كما أن درجة حرارة ذوبانه عالية إذا ما قورن بأنواع أخرى من الشمع.

[1] LAZZARINI (L) et TABASSO (L), *Il restauro della pietra*, CEDAM, Milani 1985, p. 237.
[2] DOMASLOSWSKI (W), Op.cit, p. 117.

2/ الراتنجات الصناعية:

يقتصر استعمال الراتنجات الحرارية اللدنة (Thermoplastiques) في عملية حماية السطح، وينصح عدم استعمال الراتنجات الحرارية الصلبة (Thermodurcissables) بسبب صعوبة إرجاعيتها وتغير واضح في لونها، كما هو الحال بالنسبة لراتنجات الإيبوكسية، ومن بين أهم الراتنجات المستعمل[1]:

- الراتنجات الأكريليكية:

هذا النوع من الراتنجات لها مقاومة جيدة، فعلى سبيل المثال راتنج بارالويد (B72) له مدة حياة تفوق 10 سنوات في الوسط الخارجي، غير أن وجود شوائب في المذيب يمكن أن ينقص في مدة حياة الراتنج بشكل كبير.

- خلات البوليفينيل:

خلات البوليفينيل من بين الراتنجات الحرارية اللدنة التي تستعمل كمادة عازلة للرطوبة، فبالرغم من خصائصها الجيدة في الفترة الأولى للتطبيق، إلا أنها سرعان ما تفقد البعض من خصائصها نتيجة التأثيرات الخارجية، هذه المواد تتفاعل بشكل أسرع إذا ما قيست بأنواع أخرى كالراتنجات الأكريليكية.

- المواد السيلكونية:

تستعمل المواد السيلكونية كمادة عازلة للرطوبة، وتقدر مدة حياتها ما بين 7 – 10 سنوات بحسب طبيعة الحجارة المعالجة، تستعمل حاليا عدة مواد من عائلة السيليكون، الجزيء العادي للسيلكون تحتوي على سلسلة تحتوي من 30 إلى 50 مجموعة كاربونية، وتوجد سلاسل أقل طولا يكمن تطبيقها تعرف بالأليغومير (Oligomères) ، حيث لها شبه كبير بالسيلان والتي تتبلور على السطح وفي داخل المسامات، لهذه المواد وظيفة الحماية والتقوية في آن واحد، كما توجد مواد سيليكونية قابلة للذوبان في الماء، وهي عبارة سيلكون معدل يحتوي على أيونات قاعدية مرتبطة بمجموعات من الهيدروكسيل (OH)، لكن لهذه المواد مدة حياة قصيرة، ومن بين المواد الأكثر استعمالا ألكيل- ألكوكسي سيلان البوليسيلوكسان، كما يمكن أن تطبق هذه المواد ممزوجة براتنجات الأكريليكية.

يشكل الماء أهم عامل في تلف المادة الأثرية، لذا فإن حماية المادة والتحكم في تفاعلها مع الماء يشكل استراتيجية ناجعة لوقاية الحجارة الأثرية من حدوث تفاعلات كيميائية وفيزيائية يكون فيها الماء عاملا أساسيا في تلفها وتدهورها، إن الأبحاث والدراسات أثبتت أن العزل الكلي للحجارة يؤدي الى تلفها بسبب منع حركة الماء والبخار بينها وبين محيطها، لذا فإن الهدف أصبح في كيفية التحكم الأمثل لتفاعل الماء مع المادة الحجرية ومحاولة السيطرة عليه.

[1] LAZZARINI (L) et TABASSO (L), Op.cit, p. 239.

يكون اختيار المادة العازلة بعد دراسة لطبيعة الحجارة المعالجة وكذا الشروط المناخية والمحيطية، كما يشترط أن تكون هذه المواد مجربة سلفا، وتكون أعطت نتائج جيدة، وتكون المواد المطبقة ملائمة مع المادة الأثرية ولا تغير في مظهرها الخارجي، كما ينصح تطبيق هذا النوع من المواد في المناطق التي تمتاز برطوبة عالية، وكذا المناطق الساحلية أين تلعب الأملاح دورا أساسيا في تلف الحجارة الأثرية خاصة التي تمتاز بمسامية عالية.