

# MESURES IN SITU NON DESTRUCTIVES DE LA TENEUR EN EAU DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION PIERREUX

Signification des valeurs et pertinences des techniques de mesure

Rousset Bénédicte, Bläuer Christine

\*CSC Sàrl, CH-1700 Fribourg, csc@conservation-science.ch

## Résumé

L'eau est le facteur de dégradation prépondérant des matériaux minéraux mis en œuvre sur les monuments historiques. La détermination de la quantité d'eau contenue dans les matériaux de construction et son suivi fait donc fréquemment partie de la batterie de tests utilisés dans le processus de conservation. Pour faire ces mesures in situ de manière non destructive, il existe de nombreux types d'appareils qui donnent des valeurs de teneur en eau. Nous montrons ici que l'interprétation de ces valeurs est loin d'être triviale et demande une parfaite connaissance de la structure poreuse du matériau et de l'affinité de ce dernier pour les différents états physiques de l'eau (liquide ou adsorbée). Par conséquent, l'utilisation de ces appareils de mesure non destructive nécessite un étalonnage spécifique. Comme nous le montrons avec un exemple pratique, ce type d'étalonnage permet de plus de vérifier que l'appareil choisi est capable de mesurer la quantité d'eau présente dans un matériau de construction pierreux.

## Abstract

Water is the dominant factor of degradation of mineral materials found in historic buildings. The determination of the amount of water contained in construction materials and its monitoring are therefore common measures during the conservation process. For non-destructive in situ measurements, many types of instrument exist that give values of moisture content. In this paper, we show that interpretation of these values is far from trivial and requires in-depth knowledge of the structure of the porous material and its affinity for the different physical states of water (liquid or adsorbed). Due to this, the use of non-destructive measurement devices requires their specific calibration. By means of a practical example we show that this type of calibration also enables us to determine whether the chosen device is capable of measuring the amount of water in a mineral building material.

## Key-words

Moisture content, non-destructive in situ measurement, porosity, capillary water, adsorbed water, hygroscopicity, capillary saturation, deliquescence, MOIST 200B

## 1 Introduction

Parce que l'eau qui circule dans le milieu poreux des matériaux de construction pierreux (MCP) [1] dissout et déplace les sels solubles, elle participe activement aux phénomènes de dégradation liés aux sels. Parce qu'indépendamment de la température, tout matériau pierreux tend à se dilater lorsqu'il absorbe de l'eau liquide [2] et à se contracter lorsqu'il sèche, l'eau est au centre des problèmes liés aux cycles de dilatation/contraction, respectivement de mouillage/séchage. Parce qu'elle rencontre inévitablement des composés solubles lorsqu'elle ruisselle sur les façades ou traverse la porosité des pierres et des mortiers, l'eau provoque des dissolutions puis des recristallisations qui à terme, modifient les profils de résistance de ces matériaux, leur couleur, leur rugosité de surface. Parce que l'eau est source de vie, elle permet le développement de microorganismes et de végétaux dans et à la surface des matériaux pierreux qui peuvent en souffrir. Parce que, contrairement à la majorité des corps chimiques, l'eau subit une expansion volumique lorsqu'elle se solidifie, au fur et à mesure des cycles gel/dégel, elle entraîne la gélifraction des matériaux pierreux trop exposés.

Comme le montre cette énumération, l'eau est impliquée dans une multitude de processus d'altérations et elle est sans conteste le facteur prépondérant des dégradations des matériaux minéraux mis en œuvre sur les monuments historiques. La conservation préventive exigeant - entre autres - une

connaissance très précise des causes et des mécanismes d'activation des dégradations, il est tout naturel que le praticien qui souhaite prévenir les dégâts sur/dans une construction s'intéresse de près aux sources d'eau potentielles, aux chemins qu'elle peut suivre, à sa localisation et à l'importance de son accumulation dans la maçonnerie. Le praticien impliqué dans la détermination et le suivi in situ de la teneur en eau des MCP est donc fréquemment amené à utiliser des méthodes de mesures non destructives de teneur en eau. Or, comme nous le montrons dans cet article, la signification de telles mesures n'est pas évidente. Nous souhaitons, par le biais de cet article, fournir les bases permettant de mieux les interpréter, de sorte que les choix de conservation (préventive ou curative) qui en découlent soient adaptés aux véritables problèmes du bâtiment.

## 2 L'eau dans les matériaux pierreux

### 2.1 Mécanismes de pénétration de l'eau dans les matériaux pierreux

Tous les MCP sont des solides poreux, c-à-d qu'ils renferment un certain pourcentage volumique de vides. Ces vides, de formes et de dimensions irrégulières, sont organisés en réseaux tridimensionnels majoritairement interconnectés. L'eau, sous forme liquide ou vapeur, peut entrer, circuler, stagner et ressortir des MCP grâce à (ou à cause de) leur réseau poreux (2).

### 2.1.1 Cas de la vapeur d'eau : diffusion et adsorption

La vapeur d'eau contenue dans l'air atmosphérique se déplace par diffusion : les molécules de vapeur d'eau se déplacent du point où leur concentration est élevée vers les points où elle est plus faible afin d'homogénéiser le système. Quand la vapeur d'eau de l'air entre en contact avec les surfaces sèches d'un milieu poreux, elle tend à s'y adsorber et à diffuser à travers tous les pores libres où l'humidité relative (HR) est inférieure à l'HR ambiante (fig. 1a). La diffusion de la vapeur d'eau à travers la porosité se fait plus ou moins librement en fonction de la dimension des pores qu'elle traverse. Quant au processus d'adsorption physique des molécules de vapeur d'eau sur les solides, il dépend de l'affinité des phases solides pour la vapeur d'eau, respectivement de leur hygroscopicité et il se poursuit jusqu'à ce que la couche adsorbée soit en équilibre thermodynamique avec la vapeur.

L'eau adsorbée forme des couches continues très fortement liées aux parois des pores : elle n'est pas soumise à la pesanteur et ne s'écoule pas (3, 4). Lorsque l'HR augmente, l'épaisseur des couches adsorbées augmente progressivement. Il existe une valeur seuil d'HR (en fonction du diamètre des pores mais très souvent proche de 75% pour les MCP) au-delà de laquelle le milieu poreux contient aussi de l'eau liquide : lorsque l'épaisseur des couches adsorbées qui se font face devient trop importante, l'espace qui les sépare devient assez restreint dans les micropores pour qu'il y ait coalescence et l'eau, à l'état adsorbé jusque là, forme des ménisques d'eau capillaire (fig. 1b). A compter de cette HR seuil, la quantité d'eau liquide présente dans le milieu poreux ne cesse de croître si l'HR ambiante continue à augmenter (fig. 1c). Lorsque cette dernière est très proche de 100%, l'air atteint le point de rosée et toute la vapeur d'eau se condense : il n'y a plus d'eau adsorbée dans le réseau poreux mais uniquement des films d'eau liquide capillaires qui recouvrent toutes les surfaces solides et qui peuvent migrer par capillarité à travers le réseau poreux (fig. 1d).

On distingue 2 cas particuliers de "fixation" de vapeur d'eau :

- cas de condensation thermique: le matériau avec lequel l'air humide entre en contact est froid. Dans ce cas, la vapeur d'eau se condense sur la surface et forme immédiatement des films liquides qui peuvent migrer par capillarité vers l'intérieur du milieu poreux. Suivant la quantité de vapeur d'eau apportée et la durée de l'apport, le "paysage hydrique" de la sub-surface du milieu poreux peut varier entre les cas 1b et 1d (fig. 1).

- cas de déliquescence des sels: le matériau avec lequel l'air humide entre en contact contient des sels solubles. Dans ce cas, la vapeur d'eau commence par s'adsorber normalement, mais dès que la quantité d'eau adsorbée dépasse la quantité d'eau nécessaire pour dissoudre les sels, ceux-ci entrent en déliquescence. Il se forme alors des films de solution saline en surface et sub-surface du matériau, films qui peuvent migrer plus profondément par capillarité. Suivant l'HR ambiante, sur un matériau poreux contenant des sels

hygroscopiques, le "paysage hydrique" de la surface, de la sub-surface et parfois même de grandes profondeurs, peut varier entre les cas 1b et 1d (fig. 1).

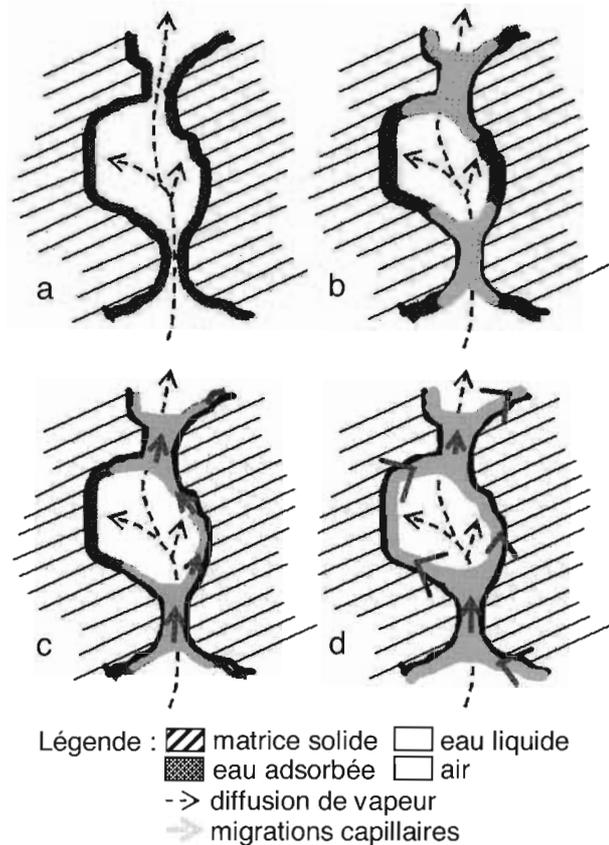


Fig.1. Diffusion et adsorption de vapeur d'eau dans les matériaux poreux pour (a) les HR < à l'HR de condensation, (b) HR = HR de condensation, (c) HR de condensation < HR < 100%, (d) HR = 100%

Pour un matériau donné, la quantité d'eau adsorbée à l'équilibre pour une HR peut être déterminée sur des échantillons au laboratoire. Lorsqu'on mesure ces valeurs d'équilibre pour plusieurs HR entre 0 et 100, on peut établir une isotherme d'adsorption (5).

### 2.1.2 Cas de l'eau liquide : absorption, ou imbibition, capillaire

Lorsque de l'eau liquide entre en contact avec la surface des minéraux des MCP, l'affinité du solide pour l'eau liquide étant supérieure à son affinité pour la vapeur d'eau, l'eau liquide tend à mouiller les surfaces solides, c.à.d à s'étaler et épouser les contours du solide en formant des films d'eau qui, lorsqu'ils atteignent des micropores, forment des ménisques. Apparaît alors la tension capillaire au niveau du ménisque, ce qui provoque la "traction" du liquide dans la porosité, sur les surfaces encore sèches ou recouvertes d'eau adsorbée. Au fur et à mesure de l'imbibition capillaire d'un matériau poreux, le volume d'eau présent dans la porosité ainsi que la profondeur de pénétration de la frange capillaire, augmentent conjointement. La variation de ces deux grandeurs est

fonction de la racine carrée du temps, ce qui signifie que si dans les premières secondes - voire premières minutes - les progressions du volume cumulé et de la frange capillaire sont très rapides, elles ralentissent progressivement avec le temps (fig. 2) (6).

En raison de la multitude des chemins interconnectés et

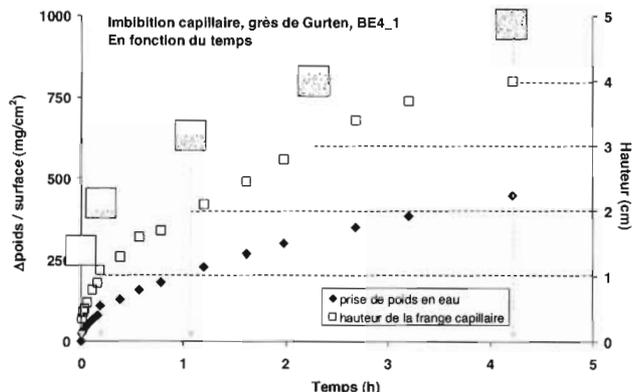


Fig. 2. Graphique représentant l'évolution de la prise de poids en eau (◆) et de la profondeur de la frange capillaire (□) en fonction du temps pour un cube de 4 cm d'arête de grès de Gurten (grès bernois). Les carrés reportés au dessus des courbes permettent de visualiser le temps nécessaire pour que la frange capillaire ait atteint 0, 1, 2, 3 et 4 cm de profondeur dans cette pierre

de l'existence de microrugosités sur les parois des pores, l'eau qui pénètre par capillarité dans le réseau poreux des MCP piège toujours une plus ou moins grande quantité d'air dans les macropores de la zone imbibée. Ainsi, si une alimentation en eau liquide suffisante est maintenue assez longtemps sur la surface exposée d'un moellon, lorsque la frange capillaire parvient à traverser entièrement la pierre (plusieurs heures à plusieurs jours sont nécessaires suivant la nature de la pierre), le volume poreux de cette dernière contient la quantité d'eau liquide maximale pouvant pénétrer par simple capillarité - ou saturation capillaire maximale - et de l'air piégé (fig. 3) [4].

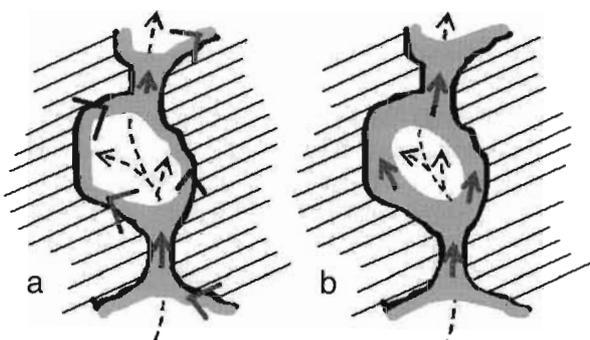


Fig. 3. Représentation schématique de l'eau capillaire et de l'air piégé dans les macropores d'un milieu poreux (a) en début et (b) en fin d'imbibition capillaire. Légende : voir fig. 1

Les cinétiques capillaires massique (prise de poids en eau) et linéaire (progression linéaire de la frange capillaire) dépendent du diamètre moyen des pores et de leur connectivité. De manière générale, plus ce diamètre est grand, plus les cinétiques capillaires sont rapides. Pour la majorité des MCP, les pores sont suffisamment petits pour que l'eau capillaire soit fortement liée aux parois et quasiment insensible à la gravité. C'est seulement dans les MCP présentant des macro-pores d'un diamètre de quelques millimètres à plusieurs centimètres (comme les tufs calcaires par exemple), que la gravité n'est plus négligeable, ce qui a pour conséquence que l'eau ne peut pas envahir ces cavités par capillarité. Pour un matériau donné, les cinétiques capillaires linéaire et massique ainsi que la saturation capillaire maximale peuvent être mesurées sur des échantillons au laboratoire (5).

## 2.2 Mécanismes de séchage des matériaux pierreux

### 2.2.1 Cas de l'eau adsorbée: désorption puis diffusion de vapeur

Si, au contact d'un MCP contenant de l'eau adsorbée et de la vapeur d'eau, l'HR ambiante diminue, la vapeur d'eau aura tendance à diffuser vers l'extérieur pour équilibrer la concentration en molécules d'eau. Par suite, l'HR de l'air en contact avec les couches d'eau adsorbée diminuera et cette dernière sera progressivement désorbée. Pour une valeur d'HR ambiante donnée, la quantité d'eau adsorbée sur les parois est plus importante pendant la désorption que pendant l'adsorption, du moins pour les HR ambiantes pour lesquelles il y a condensation capillaire (fig.4) :

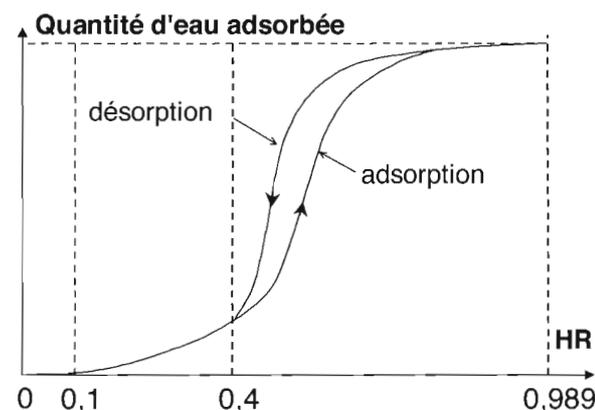


Fig. 4. Hystérèse entre les phénomènes d'adsorption et de désorption de vapeur d'eau pour un matériau dans lequel la condensation capillaire apparaît à 40% d'HR

l'eau liquide qui forme des ménisques dans les micropores est plus difficile à faire disparaître qu'à faire apparaître en raison de la concurrence entre l'évaporation et les fortes tensions superficielles qui se créent sur les surfaces rugueuses et dans les pores les plus étroits (l'évaporation tend à éliminer l'eau liquide tandis que les tensions superficielles tendent à maintenir l'eau liquide liée à la surface du solide).

Les mécanismes de désorption et d'évaporation qui ont lieu en sub-surface ou en profondeur sont encore ralentis par le fait que l'HR qui règne dans les pores éloignés de la surface peine à s'équilibrer avec l'HR extérieure en raison de la complexité et de la tortuosité du réseau poreux qui freinent fortement la diffusion de la vapeur d'eau.

Si le MCP contient des sels solubles qui sont entrés en déliquescence, l'évaporation doit contrer non seulement les forces physiques de tensions superficielles, mais encore les liaisons chimiques qui maintiennent les molécules d'eau et les ions solubles en solution. Il s'en suit que, pour que l'eau liquide présente dans le matériau après une simple adsorption de vapeur d'eau puisse s'évaporer, l'HR doit atteindre des valeurs plus basses que pour les matériaux dépourvus de sels.

### 2.2.2 Cas de l'eau capillaire : vaporisation et diffusion de vapeur

Si, au contact d'un MCP contenant de l'eau liquide capillaire, l'HR ambiante diminue, la diffusion de vapeur fait diminuer l'HR de l'air en contact avec les ménisques capillaires ouverts vers l'extérieur, et la phase liquide tend à se transformer en vapeur. Ce phénomène de vaporisation entre alors en concurrence avec les tensions capillaires : dans tous les pores où la vitesse de séchage est plus grande que la vitesse d'alimentation capillaire, les ménisques régressent à l'intérieur du milieu poreux jusqu'à atteindre des pores de diamètre plus restreint où apparaît une tension capillaire plus grande et donc une alimentation capillaire qui parvient à nouveau à équilibrer l'évaporation. Cette concurrence évaporation/capillarité se poursuit tant que le matériau contient suffisamment d'eau liquide sous forme de films capillaires continus. Après la disparition des films d'eau liquide, il reste encore des ménisques capillaires au niveau des micropores. Comme lors d'une désorption, ces ménisques résiduels sont très difficiles à sécher entièrement et seules des HR très basses permettent leur élimination complète (6).

Et comme expliqué précédemment (§1.2.1), si le MCP contient des sels solubles, l'HR doit atteindre des valeurs extrêmement basses pour pouvoir vaporiser et désorber entièrement l'eau contenu dans la porosité.

### 2.3 Conséquences pour l'interprétation des mesures in situ de teneur en eau

Comme nous avons tenté de le démontrer, les mécanismes d'humidification des MCP (adsorption de vapeur d'eau, mouillabilité/capillarité d'eau liquide) sont des processus instantanés qui s'initient sans effort dès que le solide entre en contact avec de la vapeur d'eau ou de l'eau liquide [5]. Par suite, la pénétration de l'eau vapeur vers la profondeur sera limitée par le gradient d'HR qui existe de part et d'autre du matériau tandis que la pénétration de l'eau liquide vers la profondeur sera essentiellement limitée par l'alimentation en eau. Les sels solubles, quasiment inévitables dans les MCP, facilitent et accélèrent ces processus.

Il en va tout autrement des mécanismes de séchage : la simple désorption de l'eau adsorbée reste un processus relativement spontané, mais les processus de diffusion de vapeur et de vaporisation nécessaires à l'évacuation de l'eau liquide sont fortement contrés par les tensions superficielles et capillaires et, lorsqu'ils doivent avoir lieu dans un réseau poreux, par la tortuosité. Ainsi, dès qu'il y a eu de l'eau liquide dans un MCP (eau capillaire ou eau de condensation) seulement des conditions de séchage extrêmes permettent de l'éliminer totalement et plus elle aura pénétré profondément plus il sera difficile de la déloger. De plus, les incontournables sels solubles entravent fortement tous les mécanismes de séchage et impliquent encore plus sûrement qu'un MCP "sec" contient très souvent de faibles quantités d'eau liquide [6].

De manière générale, la (faible) quantité d'eau contenue dans le volume poreux d'un MCP "sec" est d'autant plus élevée que le matériau est microporeux [7] et que son contenu en sels est élevé (et bien sûr, que l'HR ambiante est grande).

## 3 Les mesures in situ non destructives de la teneur en eau

Selon la problématique de conservation propre à chaque bâtiment, les mesures de teneur en eau in situ sont nécessaires à un moment ou un autre pour a) déterminer le taux d'humidité d'un point précis de la maçonnerie à un moment donné, b) déterminer la variation dans le temps du taux d'humidité d'un point précis de la maçonnerie, c) cartographier les différents taux d'humidité pouvant être mesurés sur une surface donnée de la maçonnerie à un moment donné, d) déterminer un profil de teneur en eau en fonction de la profondeur en un point précis de la maçonnerie, ainsi que pour toutes les combinaisons possibles de ces 4 variantes.

Pour réaliser ces mesures, différents types d'appareils portatifs et non destructifs, plus ou moins encombrants et faciles à utiliser, se trouvent sur le marché. Les mesures sont basées sur des phénomènes physiques divers tels que la résistivité électrique, la propagation des ultrasons, la réflexion des micro-ondes, ... Pour un inventaire assez exhaustif des différentes méthodes, ainsi que de leurs avantages et inconvénients, nous renvoyons le lecteur à la publication de Pinchin (7).

### 3.1 Guide d'interprétation des valeurs mesurées

#### 3.1.1 Définitions de la teneur en eau

En général les valeurs de teneur en eau fournies par les appareils de mesure sont des teneurs en eau massiques (ou spécifiques) c.à.d. des pourcentages pondéraux, définis comme étant le rapport entre la masse d'eau contenue dans le matériau à l'état hydrique  $x$  et la masse du matériau à l'état sec [8].

Ces valeurs expérimentales sont des valeurs globales de teneur en eau, représentant un volume de matériau plus ou moins grand et qui en soi ne donnent d'informations, ni sur la qualité des phases hydriques

présentes dans le milieu poreux, ni sur leur proportions relatives. La valeur de teneur en eau fournie par les appareils de mesure ne permet donc pas à elle seule de déterminer si le matériau est dans un état "sec" ou s'il présente un état d'humidité potentiellement néfaste. Il sera donc nécessaire d'étalonner l'appareil de mesure au laboratoire sur le matériau à analyser in situ, afin d'établir les gammes de teneurs en eau acceptables et celles qui sont suspectes.

### 3.1.2 Relations entre la teneur en eau et la saturation en eau du volume poreux

Pour savoir à quel pourcentage de volume poreux correspond une valeur de teneur en eau pondérale ( $T_p$ ), il faut connaître :

- la porosité totale ( $P_t$ ) du matériau.  $P_t$  (% vol.) =  $V_v / V_t * 100$  ( $V_v$  = volume des vides,  $V_t$  = volume total) ;  $P_t$  est facilement mesurée au laboratoire sur des échantillons représentatifs du matériau étudié, par la méthode de la triple pesée p. ex. (5) ;

- la masse volumique réelle ( $\rho_r$ ) du matériau.  $\rho_r$  ( $g/cm^3$ ) =  $W_{sld} / V_t$  ( $W_{sld}$  = masse de la phase solide) ;  $\rho_r$  peut être estimée en même temps que  $P_t$  par la méthode de la triple pesée (5).

$S$ , la saturation en eau du volume poreux, peut alors être obtenue par la formule suivante :  $S = T_p * \rho_r * 100 / P_t$  [9]

Tableau 1 : Saturation en eau du volume poreux pour une teneur en eau pondérale de 1% pour quelques pierres naturelles utilisées en Suisse

Matériau	$P_t$ (%)	$\rho_r$ ( $g/cm^3$ )	$S$ (%) si $T_p = 1\%$
Schiste vert d'Evolène	0.2	2.77	1385 !!!
Marbre saccharoïde	3	2.72	91
Grès de Bollingen	6	2.56	43
Molasse de Lausanne	12	2.69	22
Molasse de Villarod	16	2.69	17
Pierre Jaune de Neuchâtel	18	2.72	15
Calcaire de Jaumont	24	2.72	11
Calcaire de Savonnières	42	2.71	6

Légende :  $P_t$ ,  $\rho_r$ ,  $S$ ,  $T_p$  = voir le texte. Les valeurs de  $P_t$  et  $\rho_r$ , reportées ici correspondent à des valeurs réellement mesurées sur des échantillons individuels des matériaux mentionnés, mais elles ne doivent pas être considérées comme des valeurs moyennes représentatives de l'ensemble du matériau.

Le tableau 1 donne une estimation des valeurs de  $S$  correspondant à une valeur de  $T_p$  choisie arbitrairement égale à 1% pour différents matériaux dont on connaît  $P_t$  et  $\rho_r$ . Les résultats obtenus montrent que :

- une même valeur de  $T_p$  a une signification totalement différente suivant le matériau considéré :  $\rho_r$  variant peu, pour les pierres naturelles du moins, c'est principalement  $P_t$  qui influence grandement la valeur de  $T_p$  mesurée. Pour les exemples choisis, et en admettant que la méthode de mesure détecte effectivement toute eau adsorbée et liquide présente dans le volume de mesure, une  $T_p$  de 1% pour un calcaire de Savonnières (très poreux :  $P_t \approx 40\%$ ), signifie probablement que l'eau présente dans le réseau poreux de ce calcaire est majoritairement sous forme adsorbée (facilement vérifiable au laboratoire) alors que la même valeur mesurée sur un grès de Bollingen indique clairement la présence d'eau liquide dans le réseau poreux ;

- lorsqu'on obtient des valeurs  $S$  aberrantes, comme pour le vert d'Evolène dans notre exemple, le calcul de  $S$  permet de mettre en évidence un dysfonctionnement de l'appareil, un artefact de mesure ou simplement le fait - très hautement probable pour de nombreux appareils de mesure de teneur en eau in situ - que l'appareil ne donne pas de valeur utilisable en absolu, mais peut-être utilisable en relatif uniquement.

Afin de déterminer si l'appareil de mesure sélectionné est vraiment capable de donner des valeurs de teneur en eau pertinentes, et pour établir une échelle de correspondance des teneurs en eau mesurées avec des valeurs connues de saturation en eau du milieu poreux, nous conseillons vivement d'étalonner l'appareil en laboratoire sur des échantillons représentatifs des matériaux rencontrés sur le bâtiment à étudier. Mais comme nous allons le montrer maintenant, un étalonnage permettra aussi de vérifier que la technique donne des informations utilisables.

### 3.2 Exemple pratique d'étalonnage effectué en laboratoire

#### 3.2.1 Type d'appareil testé, critères de choix spécifiques à notre étude

Dans le cadre d'un projet de recherche et développement financé par les responsables des cathédrales de Bâle, Berne, Fribourg et Lausanne, nous avons eu l'occasion de tester un appareil de mesure non destructive in situ de la teneur en eau. Le but de ce projet étant - entre autre - de détecter la profondeur de pénétration d'un produit de traitement en fonction du temps, nous avons fait une étude de littérature pour choisir l'instrument adapté à nos exigences et nous

avons sélectionné le MOIST 200B fabriqué par hf sensor [10]. Cet appareil portatif émet et reçoit en retour des micro-ondes réfléchies. Le signal reçu est fonction de la constante diélectrique - ou permittivité - du volume de matériau traversé. La permittivité de l'eau (égale à 80) étant beaucoup plus élevée que celle des matériaux de construction (entre 2 et 10), la mesure de la permittivité d'un matériau de construction permet théoriquement de déterminer s'il contient de l'eau et si oui, quelle quantité. D'après les fabricants du MOIST 200B, l'application successive, à la surface du matériau à étudier, de 4 sondes émettrices-réceptrices différentes, permet de déterminer la teneur en eau de ce matériau dans un volume partant de la surface de mesure et d'extension plus ou moins profonde (limites de détection annoncées à environ 3, 7, 11 et 30 cm de profondeur). Ceci permet théoriquement d'obtenir des informations sur la distribution de l'humidité dans la pierre en fonction de la profondeur (8). Quelques tests rapides et non systématisés nous ont montré que l'appareil pouvait donner un signal différent suivant que le matériau pierreux sur lequel est faite la mesure est sec, mouillé avec de l'eau ou mouillé avec les produits de traitement sélectionnés (consolidants à base de silicate d'éthyle). Nous avons donc entrepris d'étalonner plus précisément l'appareil au laboratoire afin que les praticiens travaillant sur les 4 bâtiments précités puissent l'utiliser seuls et interpréter facilement les valeurs mesurées.

### 3.2.2 Procédure d'étalonnage suivie

Le but ultime était d'utiliser l'appareil pour détecter les matériaux de traitement, mais puisqu'il est conçu et commercialisé pour détecter l'eau dans les maçonneries, nous avons tout d'abord procédé à un étalonnage des 4 sondes de l'appareil avec de l'eau. Pour cela, nous avons établi la procédure d'étalonnage suivante :

Après avoir étudié plus en détail la littérature traitant du MOIST 200B, nous avons choisi de travailler sur des échantillons cubiques de 15 cm d'arête, aussi homogènes que possible, et représentatifs des grès trouvés in situ sur les 4 bâtiments précités. Ces dimensions permettent - d'après le manuel utilisateur - de s'affranchir des effets de bords pour les sondes sensibles jusqu'à des profondeurs de 3, 7 et 11 cm. Par contre pour la sonde à 30 cm, nous savions déjà que ces effets de bords risquaient de biaiser fortement nos résultats. Mais sachant qu'un cube de grès de ce gabarit pèse déjà entre 7 et 8 kg à l'état sec et que plusieurs publications ventent les méritent de cet appareil pour des mesures sur des briques ou des éléments sculptés de dimensions bien inférieures à des cubes de 15 cm d'arête, nous avons décidé de ne pas prendre des échantillons plus grands. Sur ces cubes, nous avons réalisé - toujours sur les mêmes points - des mesures à "sec" (à HR = 33%) puis à des degrés d'hygrométrie (adsorptions de vapeur d'eau à HR d'équilibre = 55, 75, 86, 93 et 97%) et d'hydrométrie

(imbibitions capillaires aboutissant à des profondeurs de pénétration comprises entre 0 et 15 cm) différents pour lesquels nous avons systématiquement estimé la quantité d'eau présente dans le volume poreux [11].

### 3.2.3 Résultats et conclusions relatives à cet étalonnage

- Lors des premières mesures nous nous sommes par hasard rendus compte que la valeur mesurée dépendait de la table sur laquelle la mesure était faite : les concepteurs annoncent bien que cette méthode est inutilisable sur des volumes de matériaux contenant des éléments métalliques, mais nous n'aurions jamais imaginé que même pour la sonde supposée avoir une limite de détection maximale à 3 cm, les résultats seraient à ce point influencés par une structure métallique située à 15 cm du point de mesure environ... Après avoir trouvé un support en plastique creux assez haut n'ayant pas d'influence -ou une influence négligeable - sur les mesures, nous avons réussi à nous affranchir de l'influence de la table et nous avons poursuivi notre étalonnage.

- Les valeurs obtenues sur échantillons secs diffèrent suivant la nature minéralogique et les structures poreuses des échantillons sur lesquelles sont faites les mesures.

- La méthode est sensible à l'eau adsorbée et peut-être aussi à la vapeur présente dans le volume poreux : les valeurs mesurées sur les échantillons mis à l'équilibre à des HR croissantes, étaient elles aussi croissantes et supérieures à celles obtenues sur les échantillons secs. Toutefois, nous avons constaté des tendances inexplicables pour les sondes sensibles jusqu'à 11 et 30 cm de profondeur : pour les grès molassiques de Lausanne, Berne et Fribourg la première donne des valeurs décroissantes et inférieures à l'état sec lorsque l'HR d'équilibre augmente alors que la tendance est "normale" pour un grès du Buntsandstein utilisé à Bâle (fig. 5) ; la sonde sensible jusqu'à 30 cm donne exactement les tendances inverses.

- Sur les échantillons en cours d'imbibition capillaire, les valeurs mesurées sont - dans un premier temps - nettement plus élevées que les valeurs "à sec" : tant que la frange capillaire n'a pas dépassé une profondeur de 1 cm, la valeur donnée par l'appareil semble assez systématiquement croître avec la profondeur atteinte par la frange et donc avec la quantité d'eau présente dans l'échantillon. Mais, dès que la frange capillaire dépasse 1 cm de profondeur, les indices d'humidité mesurés montrent des oscillations inexplicables, n'ayant aucun lien apparent ni avec la quantité d'eau présente dans le milieu poreux, ni avec la profondeur de pénétration (fig. 6). Pour certains échantillons, certaines valeurs obtenues pour des profondeurs de pénétration importantes sont mêmes inférieures à celles mesurées à l'état sec (cf. échantillon BSMA15\_2, fig. 6). Nous ne savons pas expliquer ces résultats et nos questions aux concepteurs sont restées sans réponse satisfaisante ;

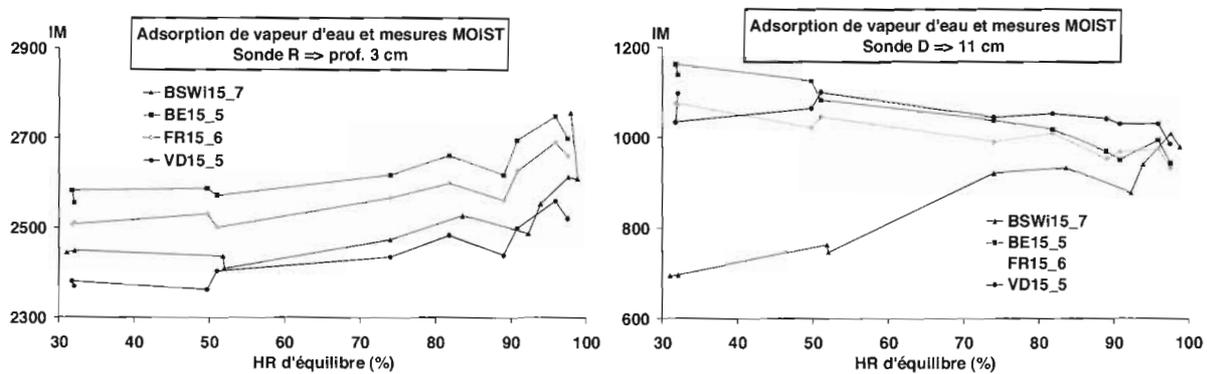


Fig. 5 Variation de l'indice d'humidité (IM) mesuré pour différentes HR d'équilibre. A gauche : résultats obtenus avec la sonde R de l'appareil MOIST 200B sensible jusqu'à 3 cm de profondeur sur un échantillon de chaque type de grès étudiés (BSWi15\_7 = grès de Wiesental / Bâle, BE15\_5 = grès de Gurten / Berne, FR15\_6 = molasse de Villarlod / Fribourg, VD15\_5 = molasse de la Mercerie / Lausanne) ; à droite : idem avec la sonde D sensible jusqu'à 11 cm de profondeur.

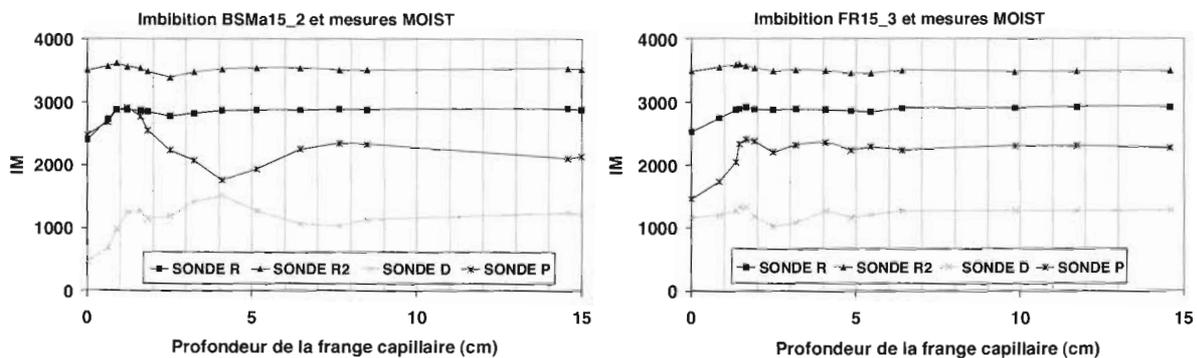


Fig. 6 Variation de l'indice d'humidité (IM) mesuré en fonction de la profondeur de pénétration de la frange capillaire : résultats obtenus avec les 4 sondes (R / 3cm, R2 / 7cm, D / 11cm, P / 30cm) de l'appareil MOIST 200B, pour un échantillon de grès de Maintal (BSMa15\_2, à gauche) et un échantillon de molasse de Villarlod (FR15\_3, à droite)

Ces résultats montrent que le MOIST 200B présente d'importants défauts :

- il est inutilisable sur tout élément de maçonnerie qui peut contenir des éléments métalliques ou sur lequel des éléments métalliques pourraient être fixés (structures de renforcement, canalisations,...) ;
- l'influence des hétérogénéités minéralogiques et poreuses des matériaux étant parfois supérieure à celle de l'eau présente dans le réseau poreux, les résultats ne permettent jamais d'être sûr à 100% que le volume analysé est sec, humide ou très mouillé. Il ne peut donc être utilisé ni pour obtenir une valeur absolue de teneur en eau, ni pour suivre l'évolution dans le temps de l'état hydrique d'un même point, ni pour comparer plusieurs points entre eux ou pour faire une cartographie de distribution de l'humidité ;
- pour une ou plusieurs raison(s) que nous ne pouvons pas expliquer, les variations des valeurs d'indice d'humidité mesurées lorsque la frange capillaire progresse vers la profondeur sont telles que cet appareil est totalement inutilisable pour estimer la répartition de l'eau en fonction de la profondeur.

#### 4 Conclusion : mise en garde et conseils

Nous espérons avoir clairement démontré que la notion de teneur en eau d'une part et sa mesure non destructive in situ d'autre part sont des sujets que l'on ne peut pas aborder sans connaissances préalables.

L'interprétation d'une valeur de teneur en eau mesurée in situ sur un matériau passe par la connaissance de la porosité de ce matériau, de son isotherme d'adsorption et de sa capacité à absorber de l'eau par capillarité. Sans connaître ces détails, les conclusions concernant les sources et les quantités d'eau apportées sont facilement erronées et il s'en suit la mise en œuvre de mesures de conservation inadaptées voire inutiles. Mieux vaut prendre le temps d'étudier les matériaux au laboratoire avant d'interpréter les mesures effectuées lors d'un monitoring. D'autant plus que les mesures de laboratoire nécessaires pour connaître le matériau peuvent être menées parallèlement à l'étalonnage de l'appareil choisi pour les mesures de teneur en eau in situ. Et comme nous l'avons montré avec notre exemple pratique, un étalonnage systématique et spécifique à l'utilisation que l'on souhaite en faire, est un bon moyen de vérifier que l'appareil sélectionné donne des résultats intelligents et adaptés aux exigences.

Si la mesure non destructive in situ de la teneur en eau est envisagée, nous conseillons donc fortement d'entreprendre un étalonnage systématique, de rester très critique face aux méthodes de mesure in situ et de ne pas prendre pour argent comptant tous les résultats scientifiques positifs publiés. Il se peut qu'une méthode soit adaptée à un cas précis mais pas à un autre. Il se peut aussi que des résultats peu convaincants soient présentés comme positifs dans la littérature. Mais très fréquemment, les résultats négatifs restent malheureusement non publiés [12].

Enfin, si dans un cas particulier il est impossible de réaliser un étalonnage en laboratoire, nous conseillons de renoncer à l'utilisation de méthodes de mesures non destructives in situ de teneur en eau. Quelques tests (peu !) destructifs bien réfléchis permettent souvent d'avoir les réponses que l'on cherche et évitent de prendre des décisions superflues, coûteuses et à terme plus néfastes pour le bâtiment que les quelques prélèvements nécessaires pour faire ces tests.

### Remerciements

Nous remercions chaleureusement les responsables des cathédrales de Bâle, Berne, Fribourg et Lausanne sans le support financier desquels nous n'aurions jamais eu l'opportunité de tenter l'étalonnage d'un appareil de mesure non destructive de teneur en eau. Nous leur sommes très reconnaissantes d'avoir accepté nos résultats "négatifs" et de nous encourager à les publier afin d'éviter les mêmes erreurs à d'autres.

### NOTES

[1] Sous le terme de matériaux pierreux, nous regroupons les pierres naturelles et les mortiers à liants minéraux utilisés pour la pose, le jointoyage, le crépissage, les ragréages, ...

[2] Certains auteurs ont montré que les cycles de dilatation/contraction ne sont pas seulement provoqués par l'eau liquide mais aussi par la vapeur d'eau contenue dans l'air ambiant. Cf. p.ex. MERTZ, 2006, p.155 (1).

[4] La saturation capillaire maximale pourrait être atteinte au coeur d'un mur dans lequel il y a des infiltrations d'eau provenant d'une toiture défectueuse, d'une canalisation cassée ou des remontées capillaires depuis une nappe phréatique qui toucherait la base de la maçonnerie fréquemment. Elle pourrait aussi être atteinte dans la partie superficielle d'un mur sur lequel un ruissellement d'eau régulier et soutenu survient ou juste sous une accumulation de glace et/ou de neige en cours de fusion. Mais normalement, une pluie battante par exemple ne peut pas à elle seule provoquer la saturation capillaire maximale d'un matériau, les conditions environnementales (vents) permettant souvent l'évaporation d'une grande partie de l'eau qui touche un mur. Le processus d'imbibition capillaire étant fonction de la racine carrée du temps, les premières gouttes de pluie ont tendance à pénétrer rapidement et à se répartir en sous-surface, mais très vite le processus de pénétration capillaire devient plus lent que l'évaporation.

[5] Il est bien évident que les mécanismes d'humidification des MCP sont instantanés et ne nécessitent aucun effort seulement lorsque ces matériaux n'ont subi aucun traitement et qu'ils sont dépourvus de tout matériau synthétique.

[6] D'après nos observations, ces difficultés naturelles de séchage des MCP sont fortement aggravées par l'application de couches superficielles synthétiques imperméables ou hydrophobes.

[7] Les liants pour les mortiers et les minéraux argileux pour les pierres naturelles sont connus pour développer de fortes microporosités.

[8] Lorsqu'on s'intéresse aux mesures de la teneur en eau des matériaux poreux, on est confronté au problème de définition, chaque corps de métier appliquant ses propres normes. Ce point peut sembler superflu et hors sujet, mais il nous semble important de rendre le lecteur attentif au fait que, suivant l'origine des concepteurs des appareils de mesure de teneur en eau, les valeurs peuvent parfois correspondre à un pourcentage volumique égal au rapport entre le volume d'eau contenu dans le matériau et le volume total au moment de la mesure.

[9] Si on a mesuré  $T_v$ , la teneur en eau volumique,  $S = T_v \cdot 100 / P_t$  (cf. [8])

[10] <http://www.hf-sensor.de/>

[11] Souvent sur les appareils de mesure de teneur en eau non destructive, il existe plusieurs programmes d'acquisition que l'on choisit en fonction du matériau sur lequel la mesure est faite (béton, bois, grès, calcaire, ...). De cette manière les appareils sont sensés fournir des valeurs de teneur en eau moins "aberrantes" parce que déjà partiellement corrigées par rapport à la nature et la porosité du matériau. Mais connaissant bien les pierres naturelles et leurs hétérogénéités, nous savons qu'un type de grès n'a, ni la même porosité totale, ni la même géométrie poreuse qu'un autre et, pire, que pour un même grès il existe des variations de faciès parfois très grandes. En conséquence, nous avons préféré travailler avec l'indice d'humidité non corrigé fourni par l'appareil, valeur sans unité, comprise en 0 et 4000, supposée augmenter avec la quantité d'eau détectée, et représentant plus justement le signal reçu par le récepteur.

[12] Depuis notre "mésaventure" avec le MOIST 200B, nous avons découvert que nous n'étions pas les seules à avoir espéré pouvoir utiliser cet appareil dans le domaine de la conservation. Nous avons constaté que dans tous les essais d'utilisation systématique les résultats étaient au mieux très peu probants (9), régulièrement négatifs (10, 11) mais jamais publiés.

### BIBLIOGRAPHIE

- (1) MERTZ J.-D., Salt damage, dilation and actual practices in sandstone conservation, Colloque des architectes de cathédrales à Strasbourg, Actes du colloque, Fondation de l'œuvre Notre-Dame, Strasbourg (2006), 200 p.
- (2) DULLIEN F.A.L., Fluid Transport and Pore Structure, Academic Press, New York (1979), 396
- (3) FRIPIAT J., CHAUSSIDON J. et JELLI A., Chimie physique des phénomènes de surface, Masson & Cie éd., Paris (1971), 387p.
- (4) GREGG S.J., SING K.S.W., Adsorption, Surface Area and Porosity, Academic Press, London and New York (1967), 371p.
- (5) R.I.L.E.M. U.N.E.S.C.O., Altération et protection des monuments en pierre, méthodes expérimentales conseillées, Colloque international, Paris (1978)

- (6) ROUSSET TOURNIER B., Transferts par capillarité et évaporation dans des roches. Rôle des structures de porosité, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg I (2001), 204 p.
- (7) PINCHIN S.E., Techniques for monitoring moisture in walls, *Reviews in Conservation*, N.° 9, (2008), pp.33-45
- (8) GÖLLER A., Moisture mapping - Flächen- und tiefen aufgelöste Feuchte-messung mit dem MOIST-Verfahren, Feuchtetag `99 Umwelt • Meßverfahren • Anwendungen 7./8. Oktober 1999, BAM, Berlin (1999)
- (9) WIGGER H., KOOP H., KOESLING C., ASCHE J., Abschlussbericht zum Vorhaben Feuchtemessungen an historischem Mauerwerk, Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven, (2005), unpubl.
- (10) HUTT S. Die gotische Sakramentsnische von St. Jakob, Rothenburg ob der Tauber. Untersuchung des Objekts und Ausarbeitung eines Konservierungskonzepts unter besonderer Berücksichtigung der Fassung sowie der Salz- und Feuchteschäden. unpubl. Diplomarbeit FH Köln. (2007)
- (11) FRIEDMANN K., communication orale