

# Étude de la désaturation par séchage de pierres calcaires poreuses par mesure des déformations et de la résistance électrique

Mohamad DAHER, Mohamed Ahmed HASSINE, Xavier BRUNETAUD, Kévin BECK

Laboratoire de mécanique Gabriel Lamé - LaMé EA 7494, Université d'Orléans, 8 rue Léonard de Vinci, 45072 Orléans France

**RÉSUMÉ** Certaines pierres calcaires utilisées pour l'édifice de notre patrimoine bâti présentent des altérations, comme la desquamation en plaques qui est typique du tuffeau, pierre des châteaux de la Loire. Ces altérations sont souvent provoquées par les mouvements d'eau dans la pierre, lors de son infiltration par capillarité et de son départ par séchage. Il est donc essentiel de connaître le comportement de la pierre vis-à-vis de l'eau afin de comprendre les mécanismes de formation de l'altération. Dans le travail présenté ici, nous avons étudié le comportement dilatométrique lors de la désaturation par séchage de deux pierres calcaires poreuses, utilisées sur le château de Chambord : le tuffeau et la pierre de Richemont. Le profil de saturation en eau de ces pierres pendant la phase de séchage a été mesuré par résistance électrique. La réponse en déformation du matériau a été mesurée par des jauges afin de relier localement déformation et teneur en eau. Les résultats montrent des comportements très différents de ces deux pierres étudiées lors du séchage. Ces mesures pourraient nous aider à étayer des hypothèses permettant d'expliquer les formations des desquamations en plaques sur le tuffeau.

**Mots-clés** Résistance électrique, jauges de déformation, desquamation en plaque, séchage, pierres calcaires

## I. INTRODUCTION

Les pierres utilisées en construction sur des monuments anciens sont soumises à des conditions environnementales sur de très longues durées, qui peuvent conduire à leur dégradation progressive. Le tuffeau blanc a été largement utilisé dans la construction de la plupart des bâtiments du patrimoine culturel de la vallée de la Loire, en France, comme les célèbres châteaux de la Loire. Le tuffeau subit un mécanisme de dégradation progressif où la surface de la pierre peut être soumise à des pulvérulences ou à des fissurations. L'altération la plus dommageable et la plus fréquente du tuffeau s'appelle la desquamation en plaque (Beck et al., 2003). Son faciès de dégradation se présente sous la forme d'une plaque épaisse de 1 à 3 cm d'épaisseur se caractérisant par la propagation progressive de fissuration à l'intérieur du matériau. L'altération n'est visible qu'une fois la plaque tombée partiellement comme le montre la Figure 1. Une fois la plaque tombée, la surface de la pierre est fragile et pulvérulente. L'analyse d'une pierre atteinte de desquamation en plaque comprend systématiquement deux observations : la formation de la fissure à une profondeur d'environ 1 cm et une accumulation locale de gypse à ce même endroit (Janvier-Badosa et al., 2014). La question de la chronologie de ces deux phénomènes se pose, notamment le fait que le gypse pourrait s'accumuler avant ou après la formation de la fissure. La pierre de Richemont est une pierre qui a été largement utilisée, dans la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle, comme pierre de remplacement lors des travaux de restauration des monuments en tuffeau. D'après l'observation des monuments sur lesquels elle est utilisée, cette pierre présente des altérations sous la forme de desquamations en feuillets, mais ne comporte jamais de desquamation en plaques (Janvier-

Badosa et al., 2016). En effet, le mécanisme du développement de la desquamation en plaque n'est pas encore bien identifié. De nombreuses hypothèses ont été proposées pour tenter d'expliquer la formation de la plaque, mais aucune n'a encore été validée expérimentalement. L'une des hypothèses propose que la formation de la patine de la pierre favorise le mouvement de l'eau parallèlement à la surface, ce qui entraînerait, par dissolution de la calcite, l'affaiblissement de la pierre (Brunet-Imbault, 1999). D'autres supposent que la cristallisation et l'accumulation du gypse en profondeur dans le matériau pourraient générer des hétérogénéités dans les pierres, ce qui initierait une fissuration progressive (Janvier-Badosa et al., 2015). D'autres discutent de l'effet des cycles thermohydriques sur le comportement de la pierre, où des dilatations différentielles restreintes entre la surface et l'intérieur de la pierre pourrait conduire à des microfissures progressives à l'intérieur de la pierre, par la fatigue générée par le gonflement-retrait de la zone de surface humidifiée par l'eau. Ceci est d'autant plus marqué si la pierre possède des minéraux argileux (Benavente et al., 2008 ; Berthonneau, 2013). Les travaux d'Al-Omari (Al-Omari et al., 2013), qui a étudié la dégradation induite par les variations météorologiques telles que la température et le gel du tuffeau sur le site de Chambord, ont montré que le gel ne pouvait vraisemblablement pas être à l'origine d'un endommagement (Al-Omari et al., 2015). Cependant, les contraintes générées dans la pierre par les variations météorologiques sont d'un ordre de grandeur significatif (A-Omari et al., 2014), 25% de la limite à la compression, 40% de la limite à la traction, ce qui pourrait justifier un endommagement de la pierre à long terme. Dans la ligne de ces travaux, ceux de Hassine ont par la suite porté sur la mesure des déformations induites dans les pierres par des variations hydriques. Il a présenté le profil de saturation en eau dans le tuffeau lors de l'imbibition capillaire en utilisant la mesure de la résistance électrique pour évaluer localement la teneur en eau combinée à des mesures de déformation (Hassine et al., 2018a, 2018b). Afin d'étudier le rôle dans l'altération du tuffeau de la répétition des cycles d'imbibition/séchage, générant des cycles gonflement/retrait de la pierre, une étude dilatométrique complète du cycle formé d'une imbibition et d'un séchage doit être faite. L'objectif de cet article est de compléter les travaux de Hassine en réalisant un suivi du séchage des deux pierres de l'étude, tuffeau et pierre de Richemont. La mesure de la résistivité électrique permet d'évaluer, de manière précise et localisée, la teneur en eau de la pierre en profondeur pour la relier aux mesures de déformation.



**FIGURE 1** (a) Pierres de tuffeau souffrant de desquamation en plaque, à proximité de pierres de Richemont mises en place lors de travaux de restauration (château de Chambord) ; (b) desquamation en plaque sur du tuffeau initié par une arrivée d'eau particulière (château de Chaumont)

## II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

### A. Pierres de Construction

Les propriétés des deux pierres étudiées sont présentées au tableau 1. Le tuffeau blanc est un calcaire siliceux poreux, utilisé comme matériau de construction dans le Val de Loire, en France. Cette pierre se définit par une couleur blanche à la texture homogène, à grains fins, et possédant une résistance mécanique caractéristique des pierres tendres, de l'ordre de 10 MPa. Le tuffeau est composé de plusieurs phases cristallines telles que la calcite et le quartz, ainsi que d'autres telles que l'opale cristobalite-tridymite, les micas et les minéraux argileux (glauconite, smectite). La pierre de Richemont a été utilisée comme pierre de remplacement du tuffeau dans les phases de restauration des bâtiments historiques, car elle était considérée comme plus résistante et plus durable que le tuffeau. La pierre de Richemont est une pierre calcaire micritique, de couleur beige clair, et possédant une résistance mécanique de l'ordre de 20 MPa. Elle est composée principalement de calcite avec des traces de quartz. Le tuffeau se caractérise par une forte porosité de l'ordre de 45%, dont la distribution multiéchelles allant de 0,003  $\mu\text{m}$  à 100  $\mu\text{m}$ , recouvre une grande mésoporosité avec des pores de diamètre entre 1 et 10 micromètres et représentant 50% de l'espace interstitiel étudié, et une grande microporosité. En comparaison, la pierre Richemont possède une porosité de l'ordre de 25% avec une distribution de taille de pores monomodale, resserrée à un diamètre de pores d'environ 1  $\mu\text{m}$  (Al-Omari et al., 2014).

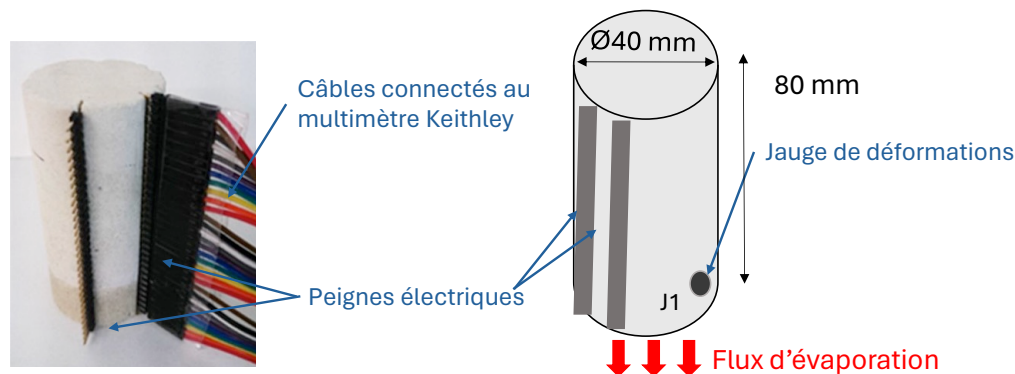
**TABLEAU 1.** Propriétés du tuffeau et de la pierre de Richemont

|                                                                                 | tuffeau                                                                     | Pierre de Richemont           |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Composition minéralogique                                                       | Calcite : 50%<br>Quartz : 10 %<br>Opale CT : 30%<br>Minéraux argileux : 10% | Calcite : 98%<br>Quartz : 2 % |
| Masse volumique apparente sèche ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )                      | $1,40 \pm 0,02$                                                             | $1,92 \pm 0,02$               |
| Masse volumique du squelette solide ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )                  | $2,56 \pm 0,01$                                                             | $2,71 \pm 0,01$               |
| Porosité totale (%)                                                             | $45,2 \pm 0,6$                                                              | $29,0 \pm 0,7$                |
| Taille de pore moyenne (Hg volume) ( $\mu\text{m}$ )                            | $1,8 \pm 0,1$                                                               | $1,2 \pm 0,1$                 |
| Coefficient massique de capillarité ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}^{0.5}$ ) | $0,36 \pm 0,03$                                                             | $0,09 \pm 0,01$               |
| Coefficient visuel de capillarité ( $\text{cm}/\text{min}^{0.5}$ )              | $0,96 \pm 0,07$                                                             | $0,48 \pm 0,02$               |
| Résistance à la compression à l'état sec (MPa)                                  | $11,7 \pm 0,3$                                                              | $19,4 \pm 0,9$                |

### B. Mesure de teneur en eau par la mesure de la résistance électrique

La résistivité d'un matériau, exprimée en Ohm, est sa capacité à s'opposer au passage d'un courant électrique, sous l'effet d'un champ électrique. Dans les matériaux poreux comme les roches, la résistivité est reliée à la teneur en eau et la morphologie du matériau en termes de porosité, de connectivité poreuse, et bien sûr de propriétés des fluides présents. Avec l'accumulation d'eau dans les pores et le remplacement des zones occupées par l'air, le passage du courant électrique sera plus facile, car l'eau est un meilleur conducteur électrique que l'air. Sur la base de cette caractéristique, la résistance électrique peut être corrélée à la teneur en eau. La méthode utilisée consiste d'abord à déterminer une courbe d'étalonnage reliant la résistance électrique d'équilibre mesurée sur des petits échantillons de pierre possédant une teneur en eau uniforme et constante mesurée par la méthode gravimétrique (Hassine et al., 2018a). Le degré de saturation est calculé à partir de la mesure de la teneur en eau et des valeurs de la densité et de la porosité du matériau. Dans un deuxième temps, la résistance électrique locale des échantillons est suivie en fonction du temps à l'aide d'un système de deux peignes, espacés de 10 mm, fixés à la surface de l'échantillon, comprenant un ensemble de 32 électrodes espacées de 2,5

mm (Fig.2). La pierre est suffisamment tendre pour faire pénétrer les électrodes sur une profondeur de 2 mm afin d'assurer un bon contact avec la pierre. Un multimètre numérique Keithley modèle 2700, équipé d'une carte multiplexeur 7700 est utilisé pour mesurer la résistance électrique. Un courant continu (DC) est généré dans la pierre entre les deux pointes jumelles de chaque peigne espacé de 10 mm. Le multimètre mesure, pour chaque valeur de tension, l'intensité du courant et affiche la valeur de la résistance électrique en appliquant la loi d'Ohm. Une fréquence de mesure de la résistance de l'ordre de 500 kHz doit être utilisée pour négliger les effets de polarisation. Le logiciel enregistre automatiquement les mesures sur l'ordinateur avec une fréquence d'acquisition de 6 mesures par minute (Hassine et al., 2018a).



**FIGURE 2** Mesure du profil de teneur en eau par la mesure de la résistance électrique (Hassine et al., 2018b)

#### C. *Mesure de la dilatation par jauges de déformation*

Les jauges de déformation représentent une méthode précise basée sur la variation de la résistance électrique d'une jauge métallique collée au support étudié. Lorsque l'objet support subit une déformation, le corps de la jauge se déforme également, ce qui entraîne une variation de la longueur du fil résistif (Hassine et al., 2018b). La préparation de la surface du support et le collage de la jauge est l'une des étapes importantes du processus de préparation, l'assurance d'un contact parfait étant essentiel. Une fois qu'elle est collée, la jauge est branchée et intégrée à un circuit électrique appelé pont de Wheatstone (Le Goër & Avril, 1992). Les jauges utilisées sont des rosaces de type KFG-5-120-D17-11 de 1 cm de diamètre, équipées de 3 jauges orientées à 0°, 45° et 90°. La colle cyanoacrylate est de type CC-35. L'acquisition des données s'effectue avec le logiciel *LabVIEW* à l'aide de deux modules d'acquisition NI9235 de *National Instruments*. Ce programme permet de mesurer, automatiquement et en continu, la résistance électrique des jauges et de les transformer en déformations. La mesure est effectuée, toutes les 5 secondes et une moyenne sur 15 mesures, est enregistrée dans un fichier Excel.

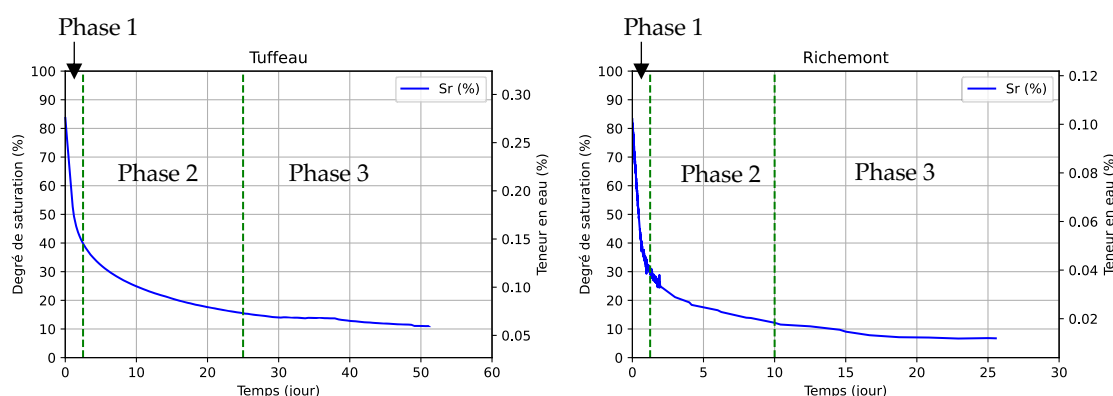
#### D. *Procédure d'essai pour le séchage*

Les échantillons utilisés dans l'étude sont des cylindres de 40 mm de diamètre et de 80 mm de hauteur. Le séchage est imposé de manière à être unilatéral et unidimensionnel. Pour assurer cette condition, chaque échantillon, préalablement saturé par imbibition, est protégé par un parafilm étanche où seule une surface de base (disque de 40 mm de diamètre) est laissée libre pour permettre le séchage. Une rosette de déformation est collée sur la surface latérale de l'échantillon à une distance de 10 mm de cette surface d'évaporation. L'échantillon de pierre instrumenté par la rosette et les peignes de résistance électrique est placé dans une chambre climatique régulée sans mouvement d'air et imposant une température de 20°C et une humidité relative de 20%. Un suivi de la masse est réalisé en continu par une balance de précision à 0,01g près afin de mesurer la teneur en eau globale de l'échantillon, et donc son degré de saturation moyen. L'essai a duré 56 jours pour le tuffeau et 26 jours pour la pierre de Richemont.

### III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### A. Variation de masse

La variation du degré de saturation global des deux pierres est calculée à partir de la variation de la teneur en eau, qui est calculée à partir de la variation de la masse totale en fonction du temps comme présenté dans la Fig.3. Avant le séchage, les pierres ont été soumises à une imbibition totale pendant 5 heures jusqu'à la stabilisation de la masse, avec un gain de masse inférieur à 0,1% par heure. À la fin de cette étape, le degré de saturation initial est de 84% pour la pierre de tuffeau et de 82% pour la pierre de Richemont, montrant que les pierres ne sont pas saturées totalement sous conditions naturelles car des bulles d'air restent piégées dans la macroporosité. Soumise à un séchage dans une enceinte climatique avec une atmosphère contrôlée dans un air sec non convectif (20°C, 20%*Hr*), la durée nécessaire afin de retrouver une masse constante est de 56 jours pour la pierre de tuffeau et 26 jours pour la pierre de Richemont. Trois phases de séchage ont pu être identifiées à partir de ces courbes. La première est la phase où la vitesse de séchage est très élevée. Il s'agit d'un comportement correspondant au régime d'évaporation où l'eau s'évapore uniquement à la surface extérieure alimentée par les pores capillaires (Coussot, 2000). Dans cette phase, le tuffeau a perdu environ 40 % de son degré de saturation et la pierre de Richemont a perdu environ 50% de son degré de saturation. Cette phase a duré environ 2,5 jours pour le tuffeau et environ 1,25 jour pour la pierre de Richemont. La vitesse de séchage est globalement proche pour les deux pierres, car les conditions extérieures (température, ventilation, humidité relative) sont similaires, de même que la surface d'échange. Dans la deuxième phase, on observe une diminution progressive du taux d'évaporation, montrant un changement de régime dans les mécanismes de séchage. La perte de masse devient plus lente car le phénomène de diffusion de vapeur dans le réseau poreux devient plus important que le transfert capillaire d'eau liquide vers la surface d'évaporation. Cette phase se poursuit jusqu'à 25 jours de séchage pour le tuffeau et 10 jours pour la pierre de Richemont. Au cours de cette phase, la saturation du tuffeau a diminué de 25% contre 20% pour la pierre de Richemont. Dans la troisième et dernière phase, la vitesse de séchage redevient constante en étant très faible jusqu'à la fin complète du séchage. La surface d'évaporation apparaît complètement sèche, l'eau liquide existe encore dans certains macropores et le transfert se fait uniquement en phase vapeur limitant les échanges entre les zones de saturations résiduelles (Beck et al., 2003). La dernière phase de séchage ne dépend que de la structure poreuse de la pierre. À la fin du séchage, les degrés de saturation finaux sont de 10% pour le tuffeau et de 6% pour la pierre de Richemont, correspondant au degré de saturation d'équilibre avec la température et l'humidité relative imposée dans l'enceinte climatique.



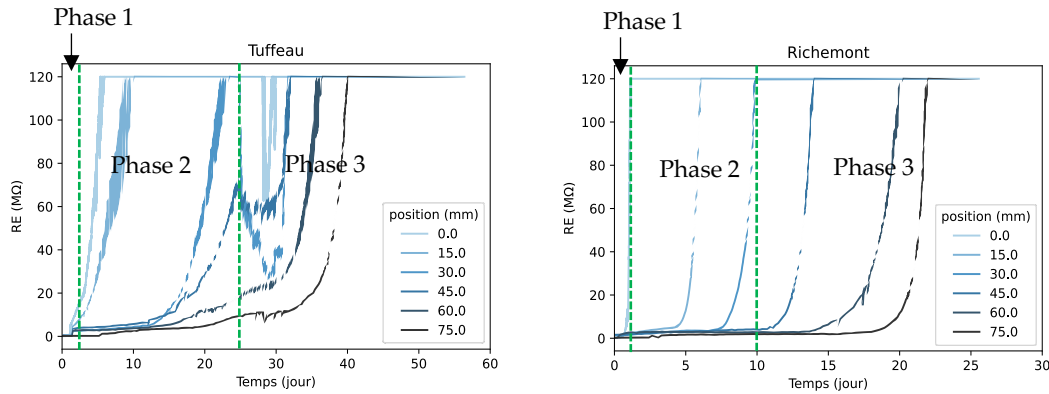
**FIGURE 3** Variation du degré de saturation global  $S_r$  en fonction du temps pour un séchage unilatéral à une ambiance de 20°C et 20%*Hr* pour le tuffeau et la pierre de Richemont

### B. Résistivité électrique

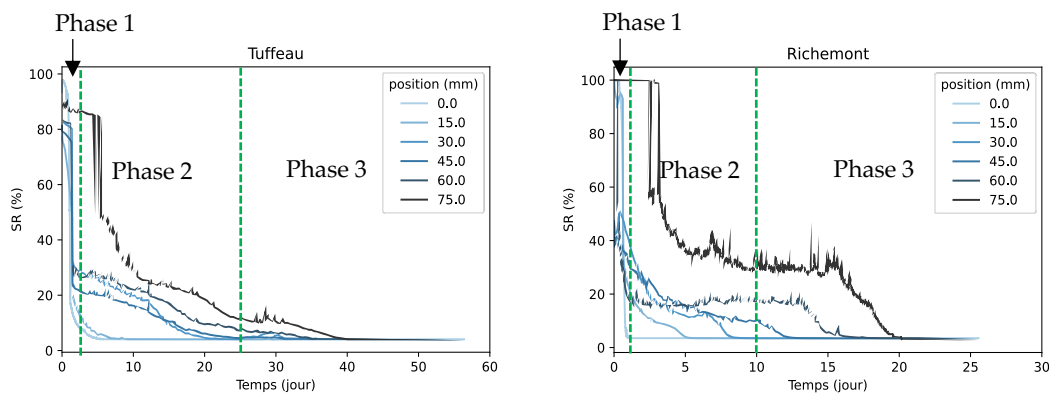
La variation de la résistance électrique et des degrés de saturation calculés lors du séchage du tuffeau et de la pierre Richemont sont présentés, pour quelques exemples de profondeur, en Fig.4 et en Fig.5 respectivement. Les trois phases du séchage globale de l'échantillon, issues de la figure 3, sont aussi indiquées sur les graphiques. Pour les deux pierres, les mesures brutes de la résistance électrique, sur les 32 canaux de mesure, sont converties en degrés de saturation à l'aide de l'équation issue de l'ajustement des courbes expérimentales de calibration reliant la mesure de la résistance électrique au degré de saturation de la pierre selon la courbe de rétention d'eau (Hassine et al., 2018a). La courbe de rétention d'eau permet de mesurer la quantité d'eau stocké dans un matériau poreux en imposant différentes succions capillaires ou humidités relatives (Beck et al., 2003 ; Hassine et al., 2018a). Pendant le séchage, les échantillons de pierre perdent constamment de l'eau et la résistance électrique augmente au fil du temps. Comme c'est le cas pour la mesure globale par la pesée, le comportement en séchage étudié de manière locale par la résistance électrique est globalement similaire entre les deux pierres. On retrouve bien les différentes phases du séchage (phase 1, puis phase 2, puis phase 3) à chacune des positions mais en décalage par rapport à la courbe présentée à la figure 3. En effet, la figure 3 montre une mesure globale du degré de saturation moyennée sur toutes les profondeurs de l'échantillon de pierre, alors que la mesure en résistance électrique est davantage ponctuelle. On voit donc un décalage en temps de la désaturation par rapport à la courbe en perte de masse, soit plus tôt pour les zones de surface, soit plus tard pour les zones de profondeur. Le séchage de la pierre de Richemont est seulement un peu plus rapide et plus complet que celui du tuffeau. La résistance électrique augmente lorsque la déconnexion hydraulique arrive au niveau de la profondeur du point de mesure. La résistance électrique varie entre 0,25 M $\Omega$  et 102 M $\Omega$  pour le tuffeau et entre 0,6 M $\Omega$  et 102 M $\Omega$  pour la pierre de Richemont. Certaines courbes présentent un bruit significatif durant la transition entre l'état humide et l'état sec. Ces fluctuations pourraient être dues au mauvais contact des broches des peignes à la pierre, ou à des hétérogénéités locales de la pierre à l'endroit de la connexion, ou bien à un problème de condensation entre le parafilm et l'échantillon au niveau de la connexion des peignes.

Au début du séchage, les degrés de saturation estimés par la résistance électrique sont de l'ordre de 90% et 98% respectivement pour le tuffeau et la pierre de Richemont. La présence de bulles d'air piégées dans les macropores, qui ne permet pas d'avoir un échantillon saturé à 100%, n'est pas vue par la mesure par résistance électrique. L'équation modélisant la résistance électrique suivant la teneur en eau adoptée est très peu sensible pour des saturations supérieures à 90%, ce qui explique la surestimation présentée ici. De même, la valeur la plus basse pouvant être estimée est de l'ordre de 3% en degré de saturation. Cette valeur représente la limite inférieure du modèle adopté où l'échantillon est considéré comme sec. Durant le séchage, la désaturation est rapide dans les zones très proches de la surface d'évaporation. Cette désaturation appelle un transfert d'eau liquide par capillarité venant des zones de profondeur. C'est pourquoi les zones les plus en profondeur restent saturées plusieurs jours avant de commencer à se désaturer. Mais globalement, les courbes de variation de degré de saturation montrent une certaine régularité lors du séchage sur les différents niveaux de profondeur. En effet, durant le séchage à une profondeur donnée, la désaturation n'est pas binaire passant directement de l'état saturé à l'état sec. On observe qu'après une phase où le degré de saturation diminue fortement, il y a une phase de stabilité où le degré de saturation local reste constant dans une zone alors que le degré de saturation global diminue continuellement, comme le montre la Figure 3. Ce plateau de degré de saturation peut durer quelques jours à plus de dix jours selon le point de mesure. Ces observations s'expliquent par la continuité hydraulique à un degré de saturation d'environ 20% à 30% où les forces capillaires drainent l'eau de la profondeur vers la surface d'évaporation. Puis, progressivement de la surface vers la profondeur, on observe un changement de la résistance électrique, signifiant le passage du degré de

saturation d'environ 20%-30% vers l'état sec complet. Ceci montre, pour chaque niveau de profondeur, le moment de la déconnexion hydraulique où il n'y a plus de continuité de la phase d'eau liquide. Ensuite, quand la résistance électrique augmente brutalement, le degré de saturation chute à sa valeur minimale et les capteurs ne détectent plus d'eau liquide dans la zone analysée.



**FIGURE 4** Variation de la résistance électrique à différentes profondeurs du tuffeau (à gauche) et de la pierre de Richemont (à droite) lors du séchage unilatéral



**FIGURE 5** Profils du degré de saturation en fonction de la profondeur de l'échantillon pour le tuffeau (à gauche) et la pierre de Richemont (à droite)

### C. Mesure de déformation locale et analyse de séchage

La Fig.6 présente les résultats de la mesure de la déformation à une profondeur de 10 mm lors du séchage des deux pierres étudiées. Les trois phases du séchage globale de l'échantillon, issues de la figure 3, sont aussi indiquées sur les graphiques. Les déformations verticales, notées V, représentent les déformations dans le sens de l'imbibition, et donc le sens perpendiculaire à la surface d'évaporation. Les déformations horizontales, notées H, représentent celles dans le sens parallèle à la surface d'évaporation. Pour faire le lien avec les variations de saturation, le degré de saturation calculé par la résistance électrique à 7 mm et 12 mm de profondeur dans la zone entourant la jauge de déformation est rappelé sur le même graphique. Les mesures de résistance électrique à ces deux profondeurs donnent exactement le même résultat, quelles que soient les pierres. L'état hydrique du point de départ du séchage, qui correspond à la fin de l'imbibition, montre que le tuffeau présente une déformation hydrique deux fois supérieure à celle de la pierre de Richemont.

Les courbes présentées à droite montrent un zoom dans la partie grisée des courbes de gauche, et permettent d'observer plus distinctement les variations de la déformation et du degré de saturation mesurées par résistance électrique lors du début du séchage sur les 10 premières heures. Une première

lecture des courbes de séchage, montre qu'au fil du temps la saturation diminue et les pierres se contractent en conséquence. Plus précisément, on constate que le retrait démarre réellement à la fin de la phase 1 de la désaturation locale, lors de la fin de la déconnexion hydraulique de la zone située à 10 mm de profondeur. Le séchage de la pierre de Richemont est plus rapide que celui du tuffeau, la déformation de la pierre de Richemont diminue donc plus vite et atteint plus rapidement un plateau bas. Tout ceci est cohérent avec la notion de retrait de dessiccation.

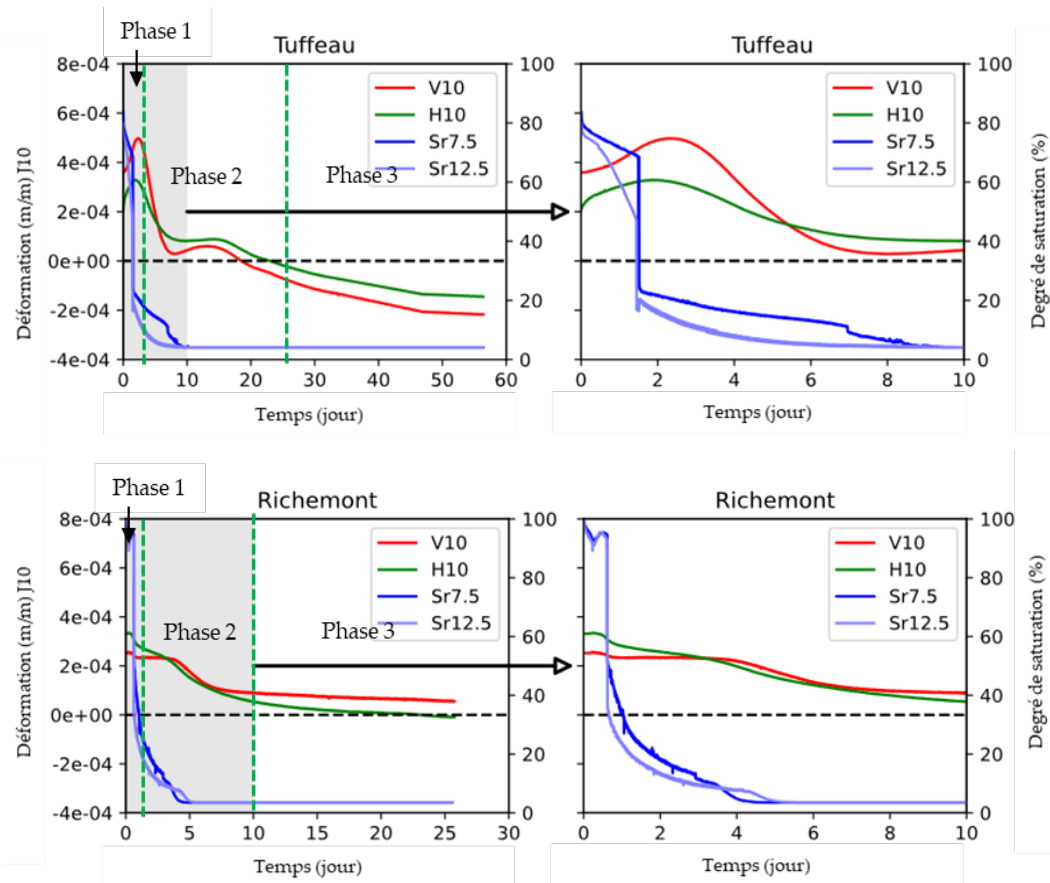
Cependant, plusieurs spécificités doivent être relevées :

- 1- Les mesures de degrés de saturation atteignent un plateau bas (phase 3 du séchage) plus rapidement que les mesures de déformation. La pierre continue donc à se contracter même si elle apparaît quasiment sèche.
- 2- Contrairement à la pierre de Richemont, le tuffeau poursuit un certain temps son expansion, comme si l'imbibition continuait, alors que le contact avec l'eau a été coupé et que le séchage a déjà démarré (début de la phase 1 du séchage).
- 3- Contrairement à la pierre de Richemont, le retrait du tuffeau démarre avant la fin de la phase 2 de la désaturation locale.
- 4- Contrairement à la pierre de Richemont qui atteint un plateau bas proche du zéro de déformation (i.e. retour à l'état de référence sec initial), le tuffeau passe progressivement en valeur négative durant la phase 3 du séchage, ce qui signifie qu'il se contracte davantage par rapport à son état de référence sec initial.

Pour expliquer le premier point, il faut rappeler que les mesures de résistance électrique sont sensibles à l'eau liquide présent dans le réseau poreux, très peu à l'humidité de l'air. Cela signifie que le régime diffusif de la vapeur d'eau en fin de séchage, correspondant à la phase 3 du séchage, est perçu comme une période sèche par les capteurs. Dès qu'il n'existe plus de film d'eau liquide, les transports d'eau sont beaucoup plus lents, ce qui ralentit fortement la cinétique de séchage. Cela correspond à la phase 3 du séchage global de l'échantillon (Figure 3) : au bout de 5 jours pour la pierre de Richemont et 10 jours pour le tuffeau.

Le deuxième et le troisième point peuvent être étudiés ensemble. L'explication implique le fait que le réseau poreux du tuffeau est multiéchelles de  $0,003\ \mu\text{m}$  à  $100\ \mu\text{m}$ , à comparer avec le réseau monomodal de la pierre de Richemont, centré autour de  $1\ \mu\text{m}$ . En fin d'imbibition, la plus grande proportion de la porosité du tuffeau est saturée, notamment les pores les plus gros où les cinétiques de transport d'eau liquide sont les plus grandes, d'où un ralentissement très net de l'imbibition, donnant l'impression qu'une limite haute a été atteinte et que l'imbibition est terminée. Ceci se voit au début de la phase 1 du séchage. Cependant, le réseau poreux secondaire du tuffeau, beaucoup plus fin, avec donc des cinétiques de transport plus faibles, met davantage de temps à se saturer. Ce réseau secondaire, bien que représentant un volume total très faible, semble être responsable d'une part importante du gonflement hydrique. Ainsi, le gonflement se poursuit durant la phase 1 du séchage alors que l'on pensait l'imbibition terminée, l'échantillon paraissant saturé visuellement. Ensuite, au début de la phase 2 du séchage, le retrait de dessiccation démarre lors de la désaturation des pores les plus gros, puis se poursuit au fur et à mesure dans les pores de plus en plus fins. Ainsi la déconnexion hydraulique dans la pierre de Richemont est atteinte dans toute la porosité au même moment, car le réseau est monomodal. Au contraire, dans le tuffeau, la déconnexion hydraulique intervient d'abord dans les pores les plus gros, puis progresse vers les pores les plus fins, rendant le processus beaucoup plus progressif.

Le quatrième point peut être expliqué par la présence d'argiles dans le tuffeau, absentes dans la pierre de Richemont. L'eau faiblement liée dans les feuillets d'argiles du tuffeau pourrait présenter une cinétique distincte, nécessitant un temps de séchage particulièrement long, visible dans la phase 3 du séchage. De plus, l'état final en déformation peut dépendre du chemin, comme cela a pu être observé sur des sols naturels qui peuvent contenir des argiles (Andrieux et al. 2011). Pour rappel, dans notre étude, l'état sec de référence initiale est mesuré après un séchage à 50°C pendant 92h en enceinte climatique (Hassine et al. 2018b), et donc beaucoup plus rapide que les 60 jours de séchage du test à 20°C. Il est ainsi possible qu'un séchage plus lent d'un matériau comportant des argiles comme l'est le tuffeau amène à un état plus contracté, générant ainsi une forte hystérésis de retrait.



**FIGURE 6** Variation simultanée des déformations locales et de la saturation à 10 mm de profondeur pour le séchage total du tuffeau et de la pierre de Richemont, zoom sur les 10 premiers jours (à droite)

#### IV. CONCLUSION

Cet article présente la suite des travaux de Hassine (Hassine et al., 2018a ; Hassine et al., 2018b) qui s'est intéressé aux mesures conjointes de déformation et de résistance électrique lors d'une imbibition, cette fois en présentant la phase suivante et donc le séchage. Comme dans les travaux précédents, deux pierres ont été étudiées : le tuffeau et la pierre de Richemont.

Le régime de séchage peut être divisé en trois phases :

- 1- Séchage rapide en surface de l'échantillon avec alimentation de l'eau par le réseau capillaire
- 2- Phase de transition avec une progressive déconnexion hydraulique du réseau poreux
- 3- Séchage lent par régime diffusif de vapeur, avec absence d'eau liquide dans la macroporosité.

L'estimation du degré de saturation par mesure de résistance électrique est peu fiable à très forte proportion d'eau liquide, en phase 1. À l'opposé, en phase 3, les rainures dans lesquelles les électrodes sont placées ne comportent plus aucun film liquide, la mesure électrique donne donc un résultat sec. Finalement, c'est en phase 2 que la mesure de résistance électrique est la plus sensible.

En comparant l'estimation du degré de saturation avec les déformations du retrait de dessiccation, on constate une bonne cohérence des résultats sur la pierre de Richemont : c'est la disparition du film liquide dans la porosité qui génère le retrait de dessiccation (fin de la phase 2 du séchage), jusqu'à revenir à l'état sec de référence. Avec le tuffeau, l'analyse est plus complexe. En raison de son réseau poreux multi-échelles, le tuffeau présente des cinétiques rapides de saturation et désaturation de son réseau capillaire (les plus gros pores), tout en montrant une réponse beaucoup plus lente dans son réseau secondaire, beaucoup plus fin. Ainsi, le retrait de séchage du tuffeau démarre avant celui de la pierre de Richemont, et se poursuit plus longtemps. De plus, la fraction argileuse du tuffeau semble être à l'origine d'une hystérésis importante lors du retrait, dont la valeur finale dépendrait de la vitesse de séchage. Une perspective à ce travail serait d'utiliser la corrélation d'images en complément des jauges de déformation afin d'étudier le comportement dilatométrique des pierres suivant leur degré de saturation en eau, que ça soit en sorption par l'imbibition capillaire ou en désorption par le séchage. La technique utilisant la corrélation d'images permettrait d'avoir une mesure champs en 2D et d'avoir des mesures à une échelle plus petite que la taille de la jauge de déformation qui moyenne les informations.

## RÉFÉRENCES

- Al-Omari, A., Brunetaud, X., Beck, K., Al-Mukhtar, M., (2013). Effect of thermal stress, condensation and freezing-thawing action on the degradation of stones of Chambord Castle, France. *Environmental Earth Sciences*, 71(9), 3977-3989 (<https://doi.org/10.1007/s12665-013-2782-4>)
- Al-Omari, A., Beck, K., Brunetaud, X., Al-Mukhtar, M., (2014). Hygrothermal stress and damage risk in the stones of the Castle of Chambord-France, *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering* 4(3), 402-418 (<https://doi.org/10.6088/ijcser.201304010039>)
- Al-Omari, A., Beck, K., Brunetaud, X., Török, A., Al-Mukhtar, (2015). Critical degree of saturation: A control factor of freeze–thaw damage of porous limestones at Castle of Chambord, France, *Engineering Geology*, 185, 71-80 (<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.11.018>)
- Andrieux, C., Chrétien, M., Denis, A., Fabre, R., Lataste, J-F., (2011). Shrinkage and swelling of clay soil, *European Journal of Envir. and Civil Engineering*, 15(5), 819-838, 2011, (<https://doi.org/10.1080/19648189.2011.9693367>)
- Beck, K., Al-Mukhtar, M., Rozenbaum, O., Rautureau, M., (2003). Characterization, water transfer properties and deterioration in tuffeau: building material in the Loire valley-France. *Building and Environment*, 38(9), 1151–1162 ([https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00074-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00074-X))
- Benavente, D., Cultrone, G., Gomez-Heras, M., (2008). The combined influence of mineralogical, hygric and thermal properties on the durability of porous building stones. *European Journal of Mineralogy*, 20, 673–685 (<https://doi.org/10.1127/0935-1221/2008/0020-1850>)
- Berthonneau, J., (2013). Le rôle des minéraux argileux dans la dégradation de la pierre. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille.

- Brunet-Imbault, B., (1999). Étude des patines de pierres calcaires mises en oeuvre en région Centre. Thèse de doctorat, Université d'Orléans.
- Coussot, P., (2000). Scaling approach of the convective drying of a porous medium. *Eur Phys J B*, 15, 557–566.
- Hassine, M.A., Beck, K., Brunetaud, X., Al-Mukhtar, M., (2018a). Use of electrical resistance measurement to assess the water saturation profile in porous limestones during capillary imbibition. *Constr Build Mater* 165, 206–217  
(<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.238>)
- Hassine, M.A., Beck, K., Brunetaud, X., Al-Mukhtar, M., (2018b). Strain measurements during capillary water infiltration in porous limestones. *Constr Build Mater* 175, 439–447  
(<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.182>)
- Janvier-Badosa, S., Beck, K., Brunetaud, X., Al-Mukhtar, M. (2014). The occurrence of gypsum in the scaling of stones at the Castle of Chambord (France). *Environ Earth Sci*, 71, 4751–4759  
(<https://doi.org/10.1007/s12665-013-2865-2>)
- Janvier-Badosa, S., Beck, K., Brunetaud, X., Guirimand-Dufour, A., Al-Mukhtar, M., (2015). Gypsum and spalling decay mechanism of tuffeau limestone. *Environ Earth Sci*, 74, 2209–2221  
(<https://doi.org/10.1007/s12665-015-4212-2>)
- Janvier-Badosa S., Brunetaud, X., Beck, K., Al-Mukhtar, M., (2016). Kinetics of stone degradation of the Castle of Chambord - France, *Int. J. of Architectural Heritage*, 10(1), 96-105  
(<https://doi.org/10.1080/15583058.2014.971194>).
- Le Goër, J.-L., Avril, J., (1992). Capteurs à jauges extensométriques. *Techniques de l'Ingénieur*.  
[doi.org/10.51257/a-v2-r1860](https://doi.org/10.51257/a-v2-r1860)