Évaluation d'une méthode de mesure *in situ* et non destructive de la perméabilité à l'air des matériaux poreux du patrimoine architectural bâti

Estel Colas[1], Jean-Didier Mertz[2,3], Roland Lenormand[4], Anissa Ben Yahmed[5]

[1] Fondation de l'Œuvre Notre-Dame, Strasbourg, France

[2] Laboratoire de recherche des Monuments historiques, Champs-sur-Marne, France

[3] Sorbonne Université, Centre de recherche sur la conservation (CRC, USR 3224), MNHN-MCC-CNRS, Paris, France

[4] R. Lenormand, entreprise Cydarex, Rueil-Malmaison, France

[5] École nationale des travaux publics de l'État, Lyon, France

Introduction

Pour des conditions d'exposition similaires, le vieillissement d'un matériau résulte des interactions qu'il subit en fonction des conditions environnementales et climatiques. Ainsi, l'évolution dans le temps des propriétés minéralogiques et pétrophysiques d'un matériau peut mener à son altération plus ou moins précoce. Dans le domaine du patrimoine, ces évolutions pouvant se produire sur des durées d'exposition longues, jusqu'à plusieurs centaines d'années, de faibles différences de propriétés sont capables d'entrainer des comportements de durabilité très contrastés [1]. À différentes échelles d'observation, ces évolutions ténues gouvernent la compatibilité des matériaux au niveau d'une façade autant que les érosions différentielles qui se produisent à l'échelle pluri-granulaires comme le délitage des roches sédimentaires [2].

La perméabilité des matériaux poreux revêt une forte importance puisqu'elle reflète la « respiration » du matériau qui régit son équilibre avec l'environnement. Cette propriété caractérise la capacité d'un milieu poreux à se laisser traverser par un fluide. La perméabilité intrinsèque d'un matériau reflète la microstructure de son réseau de

pores décrite par la porosité, la géométrie des pores, leur connectivité et la tortuosité du réseau. Toutefois, ces relations ne sont pas linéaires et un matériau très poreux peut s'avérer faiblement perméable et *vice versa*.

Classiquement, les mesures de perméabilité sont pratiquées en laboratoire et requièrent l'utilisation d'éprouvettes de forme cylindrique. Cependant, l'étude des propriétés des matériaux du patrimoine se confronte le plus souvent à la nécessité de leur préservation ; ce respect de la matière historique, qui conduit à limiter les prélèvements destructifs, justifie sans doute le faible nombre d'étude sur des matériaux mis en œuvre surtout lorsqu'il s'agit de les caractériser dans leur volume, à plusieurs centimètres en profondeur. Ces dernières décennies ont ainsi vu la naissance de développements technologiques s'orienter vers des méthodes non destructives. Issus du domaine pétrolier, les minipermeamètres portables autorisent une mesure non destructive, facile et rapide à mettre en œuvre, peu coûteuse [3, 4], dans la gamme de perméabilité adaptée aux matériaux poreux naturels et qui permettent la réalisation de cartographies d'affleurements rocheux à une échelle centimétrique [5]. Ainsi, contrairement aux mesures classiques qui moyennent les évolutions fines de surface dans la mesure de la perméabilité, l'application directe de la mesure à la surface d'un matériau semble judicieuse pour décrire les surfaces et volumes sous-jacents et mettre en évidence des évolutions microstructurales en lien avec le vieillissement ou les traitements de restauration/conservation.

Ce chapitre se propose d'étudier l'applicabilité de la mesure de perméabilité à l'aide d'un minipermeamètre portable sur des grès, matériaux de construction caractéristiques des édifices du Nord-Est de la France. Il expose les prémices d'une recherche dont les applications patrimoniales pourraient être variées, aussi bien en termes de nature de matériaux d'études qu'en termes de problématiques de conservation/restauration et de diagnostic. Après un rappel des paramètres qui régissent les transferts de fluide et décrivent le mode de calcul de la perméabilité dans le cas d'un minipermeamètre fonctionnant en régime transitoire, les grès d'étude et leurs problématiques de conservation sont présentés avant d'aborder l'apport des méthodes de mesure comparées. Le minipermeamètre TinypermII est utilisé d'une part dans sa configuration originale, en version prêt à l'emploi, et d'autre part, connecté au logiciel d'acquisition, d'exploitation et de calcul de la perméabilité Cydar^{TM} développé par l'entreprise Cydarex. Différentes expérimentations en laboratoire et sur la cathédrale de Strasbourg sont ensuite détaillées en développant : (a) les paramètres pouvant influencer sur la mesure de la perméabilité à l'air ; (b) des problématiques de chantier liées aux traitements de conservation comme la consolidation et le nettoyage ; (c) la sensibilité de la méthode à révéler de petites modifications pétrographiques ou texturales de surface à l'échelle centimétrique.

1 État de l'art

1.1 Perméabilité : définitions et mesures en laboratoire

La perméabilité caractérise la capacité d'un milieu à se laisser traverser par un fluide. En 1856, dans son ouvrage *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*, Henry Darcy établit la relation empirique entre le débit volumique Q d'un fluide incompressible,

l'eau, qui s'écoule au travers d'un milieu poreux de conductivité hydraulique K, de section S et de longueur L, et la différence de charge ΔH. La loi de Darcy s'écrit (équation 1) :

$$Q = K.S.\frac{\Delta H}{L}$$

Avec : Q, le débit de fluide ($m^3.\ s^{-1}$) ; S, la section traversée (m^2) ; L, la longueur traversée (m) ; ΔH, différence des hauteurs d'eau (m) et K, la conductivité hydraulique ($m.\ s^{-1}$).

La conductivité hydraulique K est une grandeur qui dépend des propriétés du milieu poreux (porosité, taille des pores, tortuosité, connectivité), des propriétés du fluide qui s'écoule et du degré de saturation du milieu. Elle s'exprime en fonction des caractéristiques du fluide en mouvement considéré et d'un paramètre k relatif au matériau, tel que (équation 2) :

$$K = \frac{k.\rho.g}{\mu}$$

Avec : K, la conductivité hydraulique ($m.\ s^{-1}$) ; ρ, la masse volumique du fluide ($kg.\ m^{-3}$) ; μ, la viscosité dynamique du fluide ($kg.\ m^{-1}.\ s^{-1}$) ; g, l'accélération de la pesanteur ($m.\ s^{-2}$) et k, la perméabilité intrinsèque du milieu poreux (m^2).

La relation entre la perméabilité intrinsèque k du matériau et le débit de fluide s'écrit ainsi (équation 3) :

$$k = \frac{Q}{H} * \frac{L}{S} * \frac{\rho g}{\mu}$$

La loi de Darcy est définie pour des conditions d'écoulement laminaire dans un milieu homogène, isotrope et continu. Elle n'est théoriquement valable que pour des fluides incompressibles et en absence d'interactions entre le fluide en mouvement et les minéraux du matériau poreux. Dans les milieux poreux naturels, l'écoulement est considéré comme laminaire lorsque l'énergie cinétique du fluide est négligeable par rapport à son énergie visqueuse, ce qui correspond à un nombre de Reynolds Re très inférieur à 1 [6].

La perméabilité intrinsèque k caractérise la capacité de transfert d'un milieu poreux indépendamment du fluide qui le traverse et ne dépend donc que de la microstructure du milieu [7]. Cette grandeur peut être considérée comme caractéristique de la surface utilisable pour l'écoulement du fluide [8] et s'exprime en $\mathbf{m^2}$. Pour des raisons pratiques dans les milieux poreux naturels, le Darcy (D) est l'unité de perméabilité la plus fréquemment utilisée et correspond à : 1 D $\approx$ 0,987. 10^{-12} $\mathbf{m^2}$. La perméabilité des pierres naturelles s'échelonne sur environ 11 ordres de grandeur (10 D à 10^{-7} mD).

En laboratoire, les expériences utilisant des gaz permettent des mesures rapides et fiables qui n'entrainent pas de modification du matériau contrairement aux expé-

riences utilisant de l'eau qui peuvent induire des gonflements pour des échantillons contenant des argiles [4].

Dans le cas d'un écoulement de gaz, le calcul de la perméabilité au gaz k_g est rendu possible grâce à une modification de la loi de Darcy et à l'application de la loi de Hagen-Poiseuille [9]. Bien que les fluides soient généralement inertes vis-à-vis du matériau dans les conditions d'écoulement stationnaire visqueux, la perméabilité étant liée aux conditions expérimentales, il est question de perméabilité effective ou apparente. En considérant la compressibilité du gaz, le calcul de la perméabilité au gaz k_g s'exprime par (équation 4) :

$$k_g = \frac{2.\mu.Q.L.P_{\text{ref}}}{S.(P_{\text{in}}^2 - P_{\text{out}}^2)}$$

Avec : k_g, la perméabilité apparente au gaz (m^2) ; Q, le débit du fluide ($m^3.\ s^{-1}$) ; S, la section traversée (m^2) ; L, la longueur traversée (m) ; μ, la viscosité dynamique du gaz (kg. $m^{-1}.\ s^{-1}$) et P_{ref}, P_{in} et P_{out}, respectivement les pressions de référence (atmosphérique), en amont et en aval.

En laboratoire, la perméabilité au gaz se mesure le plus souvent à l'aide d'une cellule Hassler® dans laquelle on insère l'échantillon au travers duquel circule le gaz soumis à un gradient de pression ΔP. Une fois que les conditions d'écoulement laminaire sont établies, la mesure du débit volumique du gaz permet de calculer la perméabilité du milieu poreux. Plus le réseau de pores est hétérogène ou mal connecté, plus le gradient de pression devra être faible pour s'affranchir de pressions trop élevées et s'assurer d'un écoulement laminaire du gaz [6]. Différents effets peuvent alors perturber la mesure [10], dont les plus connus sont l'effet d'inertie (effet Forchheimer) et l'effet Klinkenberg. L'effet d'inertie se produit lorsque le débit de gaz est trop important, conduisant à un régime d'écoulement turbulent pour lequel la loi de Darcy n'est plus applicable. Dans ce cas, le nombre de Reynolds est proche de 1 et l'expression de la perméabilité doit être corrigée par le coefficient de Forchheimer appliqué sur la vitesse de transfert [11]. Dans d'autres configurations de milieux peu perméables, Klinkenberg [12] a montré que des mesures de perméabilité au gaz peuvent être supérieures aux mesures de perméabilité à l'eau et interprète ce résultat comme un phénomène de collisions des molécules de gaz sur les parois du réseau de pores qui devient prédominant dans leur déplacement au sein du réseau. Les molécules de gaz interagissant entre elles, produisent un effet de glissement de ces molécules aux parois des pores. Cet effet est négligeable lorsque les pores sont micrométriques, mais devient d'autant plus important que la taille des pores et des conduits dans lesquels le gaz circule est petite. Expérimentalement, cet effet traduit une surestimation de la perméabilité et ne devient effectif que pour les faibles perméabilités, inférieures à quelques mD.

Bien que la perméabilité au gaz ait été établie pour un régime stationnaire permanent, des méthodes de mesure de la perméabilité en régime transitoire, ou *Pulse Decay*, ont été développés principalement pour l'étude des roches réservoirs dans le domaine de la recherche pétrolière. Dans le cas de roches peu perméables comme les *gas shales* et les argilites, les faibles débits ainsi que les durées d'expérimentation souvent impor-

tantes que nécessite la prise en compte de l'effet Klinkenberg, induisent de potentiels biais expérimentaux qui sont inacceptables d'un point de vue industriel [13]. En 1968, Brace *et al.* [14] proposent une solution analytique sur une carotte homogène qui implique d'éliminer les effets Klinkenberg pour un matériau de porosité nulle. Ultérieurement, Jones [15] détaille une méthode graphique qui exploite le différentiel de pressions obtenu au cours d'une expérience *Pulse Decay* pour en extraire les valeurs de perméabilité intrinsèque et du coefficient de Klinkenberg.

Quel que soit le type de régime, permanent ou transitoire, la mesure de la perméabilité en laboratoire requiert l'échantillonnage d'une éprouvette. Bien que des progrès aient été réalisés afin de réduire les volumes de matière nécessaires pour l'obtention de mesures fiables [10], l'étude des matériaux du patrimoine et de leurs propriétés privilégie le développement de techniques de mesure non destructives respectueuses de leur intégrité et permettant leur conservation.

1.2 Mesures sur site

Des minipermeamètres portables à injection de gaz fonctionnant en surpression et permettant une mesure non destructive ont été développés dès le milieu du XX^{e} siècle [16, 17]. Le principe consiste à générer un flux de gaz sous une pression contrôlée à la surface du matériau poreux et à mesurer le débit correspondant. En 1992, Jones [18] modifie un minipermeamètre à gaz qui opère en dépression de gaz en supprimant les contrôleurs de débit et en ajoutant des réservoirs de volume calibré, correspondant à l'établissement d'un régime transitoire.

Ces minipermeamètres présentent l'avantage d'une mesure non destructive, rapide, facile à mettre en œuvre et applicable aussi bien sur des éprouvettes en laboratoire que sur des affleurements rocheux et pour des natures de roches variées, grès, carbonates, tuffs volcaniques [3] ainsi que sur des pierres en œuvre [19]. Le succès de ces minipermeamètres réside également dans leur fort potentiel à révéler des hétérogénéités de perméabilité imputables au litage, à la diagénèse ou à des dommages induits à une échelle centimétrique.

Contrairement aux essais de laboratoire réalisés avec une cellule Hassler® pour lesquels le volume de l'échantillon est connu et les lignes de courant de l'écoulement du gaz sont linéaires et uniformes, dans le cas des minipermeamètres, les lignes de courant de l'écoulement du gaz sont divergentes. Or, la connaissance de la géométrie des lignes de champs lors de l'écoulement est cruciale afin de prendre en compte les caractéristiques dimensionnelles de l'échantillon équivalent, dont les valeurs de section S et de longueur L sont des variables qui entrent dans la formulation de l'équation de Darcy. Pour des matériaux homogènes et isotropes, les lignes de courant dessinent un hémisphère [20] de sorte que le volume réel pris en compte lors d'une mesure de perméabilité est souvent imprécis. En 1988, Goggin *et al.* [21] ont montré que les lignes de courant d'un écoulement de fluide en régime permanent dépendent de la géométrie de l'embout qui assure l'étanchéité entre l'appareil de mesure et le matériau poreux. Ces auteurs introduisent un facteur de correction adimensionnel G_0 expérimental fonction du rapport entre les rayons externe et interne de l'embout, tel que (équations 5 et 6) :

$$\frac{L}{S} = \frac{1}{G_0 + r_i} \quad \text{et} \quad G_0 = f(r_0/r_i)$$

Avec : r_i, le rayon interne de l'embout et r_0, le rayon externe.

Plusieurs auteurs ont cherché à justifier la validité de la fonction G_0 et après modélisation des paramètres, Selvadurai et Selvadurai [22] ont proposé une formulation numérique simulant la courbe expérimentale de Goggin *et al.* [21]. La prise en compte de ce facteur correctif G_0 n'est valable que si les effets de bords n'ont pas d'influence sur la valeur de perméabilité ce qui se traduit par l'établissement de dimensions limites à satisfaire. Dans le cas d'un échantillon de forme quelconque non cylindrique, la largeur du matériau doit être au moins quatre fois supérieure au rayon interne r_i tandis que pour une éprouvette cylindrique, le rayon doit être au moins 12 fois supérieur ; dans les deux cas, l'épaisseur de l'échantillon équivalent doit être au moins quatre fois supérieure au rayon interne r_i [20].

Expérimentalement, la rapidité de mesure et la qualité du contact étant plus faciles à assurer entre l'embout et le matériau en générant un vide partiel, les minipermeamètres qui fonctionnent en régime transitoire en créant une dépression sont souvent préférés pour les mesures de terrain. Ainsi, bien que le régime d'écoulement ne soit pas permanent, le facteur G_0 peut être utilisé dès lors que l'on considère que les lignes de courant isobares dans le matériau sont similaires dans le cas d'une surpression et d'une dépression.

Certaines limitations réduisent cependant les possibilités d'application de la méthode : les surfaces de test doivent être propres, cohérentes et, dans la mesure du possible, planes et sèches. Dans le cas des minipermeamètres, la qualité de la mesure dépend fortement de la qualité du contact entre la surface du matériau d'étude et l'embout qui assure l'étanchéité. Ce contact est influencé par la pression appliquée sur l'embout, par l'angle de contact entre l'embout et la surface, par la rugosité du matériau [4] et également par la nature et les propriétés mécaniques de l'embout considéré (élasticité, rigidité, souplesse) [23] qui peuvent évoluer dans le temps. Ainsi, l'application de la technique de mesure à un panel de matériaux très différents suppose une adaptation préalable des conditions techniques expérimentales.

2 Matériaux et méthodes

2.1 Les grès à Meules

Les grès à Meules constituent la pierre de construction de nombreux édifices bâtis du Nord-Est de la France dont l'un des plus prestigieux est la cathédrale Notre-Dame de Strasbourg.

Le grès à Meules, appartenant au faciès des grès à Voltzia, est une roche sédimentaire du Trias (Buntsandstein supérieur, -245 MA) formée dans un contexte fluvio-deltaïque et caractérisée par une cinétique de déposition lente et des apports détritiques variés. Les minéraux mineurs correspondent à des concentrations d'oxy/hydroxydes de fer qui confèrent aux grès des teintes allant du rouge lie-de-vin au jaune ou gris selon la

quantité et la nature de ces phases. Les analyses microstructurales et microscopiques attestent de phénomènes de *pressure solution* qui conduisent à une compaction accrue par cimentation siliceuse et/ou à la création d'une porosité secondaire [24, 25] acquise lors des processus post-diagénétiques ou d'évènements hydrothermaux. Ainsi, les grès à Meules présentent des variations locales très importantes de leur porosité d'origine [26] qui leur confèrent une forte hétérogénéité de perméabilité à l'échelle centimétrique. Ces pierres siliceuses sont constituées majoritairement de quartz dont les tailles de grains varient de 25 à 250 µm (65-75 %), de feldspaths potassiques (15-25 %) et de micas, principalement des muscovites. Les oxy/hydroxydes de fer, surtout goethite et dans une moins mesure hématite, peuvent se présenter parfois sous la forme de grains mais principalement sous la forme d'amas aux contours diffus intimement liés aux minéraux argileux sous la forme d'un *coating* microporeux. Ces *coatings* argilo-ferrugineux représentent de 6 à 9 % en masse pour des tailles de particules inférieures à 2 µm et sont composés principalement d'illite, de kaolinite, d'interstratifiés illite / smectite et localement de smectite et/ou de chlorite [1, 27].

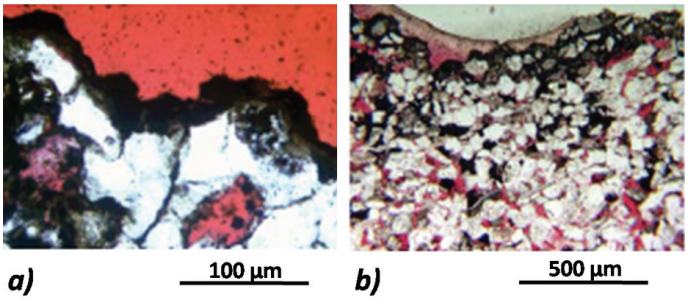


Figure 1 – Observations microscopiques sur lame mince de grès présentant un encroûtement noir vernissé : (a) aspect de la patine d'épaisseur constante recouvrant la surface des grains ; (b) concentration des oxydes et hydroxydes formant la patine au voisinage de la surface exposée du grès (extrait de [30]).

Au cours des années 2000, différents travaux [25, 28-30] ont permis d'établir les différences d'origine et de mécanismes de formation des croûtes noires gypseuses résultantes de la pollution atmosphérique soufrée. Ces croûtes de surface, généralisées et très communément détectées sur tous les édifices historiques en Europe, mènent à la formation d'une couche plus ou moins friable responsable du dessertissage superficiel des grains du grès. Dans d'autres situations où la surface des grès est intensément exposée aux intempéries, aux lessivages et aux pluies, des patines noires vernissées, riches en fer et manganèse forment un recouvrement noir, compact et très adhérant à la surface des grès. Ces patines, dont l'épaisseur n'excède pas 100 µm, résultent de la succession des imbibitions et séchages qui entraînent les oxydes normalement dispersés dans les grès et les reprécipitent à la surface sous forme d'oxydes non solubles qui peuvent ainsi persister sur ces pierres exposées aux pluies battantes [25] (Figure 1). Ces patines, qui ne doivent pas être confondues avec les croûtes gypseuses [31] sont souvent enrichies en minéraux argileux transportés en suspension dans le réseau poreux. Elles conduisent à une modification significative des propriétés pétrophysiques originelles du grès pouvant affecter une zone allant jusqu'à des profondeurs de 2,5 cm [30]. Les mécanismes impliqués dans la formation de ces patines noires vernissées sont

encore mal connus et rendent difficile une approche expérimentale tant les cinétiques de formation sont lentes. Issues de la remobilisation d'éléments préexistants et constitutifs du grès vers sa surface, elles ont plutôt un rôle protecteur [31] et de ce fait, leur élimination ne devrait pas consister un but à atteindre du point de vue de la conservation matérielle.

2.2 Méthodes de mesure

2.2.1 Le minipermeamètre TinyPermII

Le minipermeamètre TinypermII est un système de mesure portable commercialisé par New England Research Inc. Il permet une mesure non destructive et rapide de la perméabilité à l'air en régime transitoire (Figure 2). Dans son utilisation standard, l'équipement fonctionne comme une pompe inversée et la procédure expérimentale est assez simple : l'embout est appliqué manuellement à la surface du matériau poreux puis le piston est enfoncé afin de générer une dépression au voisinage de la zone d'application de l'embout. Une unité de pilotage et de contrôle permet de suivre l'évolution du vide transitoire créé dans le matériau. Après dissipation du vide et retour à la pression atmosphérique, un algorithme de calcul fournit une valeur caractéristique T qui est linéairement corrélée à la perméabilité à l'air k_g, exprimée en mD. Selon le fabricant, la relation suivante s'applique (équation 7) :

$$T = -0,8206 \log_{10} k_g + 12,8737$$



Figure 2 – Aspects des composants du minipermeamètre TinypermII.

Théoriquement, la technique permet de couvrir une gamme de perméabilité comprise entre 1 mD et 10 D. Différents auteurs rapportent que la valeur T est empiriquement corrélée à la durée de la mesure et déterminent la limite basse de valeur de perméabilité. Cette valeur expérimentale minimale est égale à 0,034 mD et correspond à une valeur de T de 14,08 pour une mesure d'une durée de dix heures sur une plaque d'aluminium [4]. Toutefois, compte tenu des difficultés à maintenir le perméamètre sans bouger, ils considèrent des durées maximales de mesures de l'ordre de cinq minutes

équivalent à une limite basse de la perméabilité à l'air de 10 mD pour les mesures sur site [4]. En considérant une durée maximale équivalente à dix minutes, la limite basse devient égale à 5 mD.

2.2.2 Mesures couplées au logiciel Cydar^{TM}

Le miniperméamètre TinyPermII peut également être utilisé couplé au logiciel Cydar^{TM} de Cydarex qui se substitue ainsi à l'unité de pilotage et de contrôle. Ce logiciel est dédié au traitement et au calcul de la perméabilité des matériaux poreux pour des conditions de mesures variées autorisant la modification des conditions expérimentales (type de fluide, température, etc.). Le volet « Acquisition » permet de visualiser l'évolution des valeurs de pression en temps réels lors de la mesure et ainsi d'évaluer la qualité du vide. Le volet « Exploitation » permet, par exemple, de prendre en compte les propriétés de porosité du matériau ou de vérifier la validité du calcul de la perméabilité en contrôlant la valeur du nombre de Reynolds. Une fois les données corrigées, le calcul de la perméabilité est obtenu par ajustement d'une courbe calculée à la courbe mesurée, par itération basée sur la méthode de Newton-Raphson. Une valeur de porosité de 21 % a été retenue comme valeur par défaut et intégrée dans le logiciel lorsque les porosités n'ont pas été mesurées.

L'embout est l'élément déterminant puisque c'est l'organe qui assure l'étanchéité lors de la mesure. Généralement, les dimensions minimales recommandées pour l'embout sont telles que r_0/r_i soit égal à 1,5 [32] ou encore 2,19 [33]. Les dimensions de l'embout utilisé pour toutes les mesures présentées par la suite montrent un rapport r_0/r_i égal à 2,42 pour $r_i = 4{,}8$ mm.

La qualité du contact de l'embout sur la surface de test est améliorée par l'adjonction d'une feutrine ou d'une mousse additionnelle qui permet de réduire de manière significative les fuites entre l'embout et la surface [34].

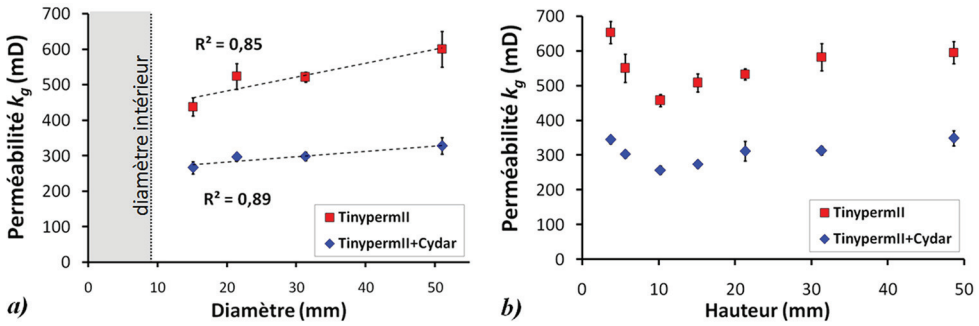


FIGURE 3 – Évolution de la perméabilité à l'air en fonction de la diminution des dimensions de l'éprouvette cylindrique de grès : (a) en fonction du diamètre ; (b) en fonction de la hauteur.

2.3 Influence des paramètres sur la mesure de la perméabilité à l'air

2.3.1 Influence du volume

Dans sa seconde édition, l'American Petroleum Institute (API) [20] recommande des tailles d'échantillons minimales permettant de s'assurer que les valeurs de perméabilité mesurées ne sont pas influencées par le volume. Dans notre configuration rapportée à une éprouvette cylindrique, ces dimensions d'échantillon-équivalent correspondent à une épaisseur de 19 mm et à un diamètre de 57 mm. Cependant, dans le domaine des matériaux du patrimoine, il n'est pas rare d'analyser des matériaux dont les volumes sont inférieurs aux recommandations de l'API [20] sur les dimensions minimales des matériaux. Ainsi, l'incidence du volume de l'éprouvette sur la mesure de la perméabilité à l'air est étudiée à partir de deux éprouvettes cylindriques de hauteur et de diamètre 5 cm dont on diminue progressivement pour l'une, le diamètre par carottages successifs et, pour l'autre, la hauteur par sciages. Les mesures sont réalisées sur le grès à Meules provenant de la carrière d'Adamswiller (F) et sont traitées de manière statistique sur une moyenne de 10 mesures consécutives, effectuées dans les conditions standard du laboratoire (20°C, 50% d'HR). La porosité, déterminée par porosimétrie au mercure, est de 21,1%.

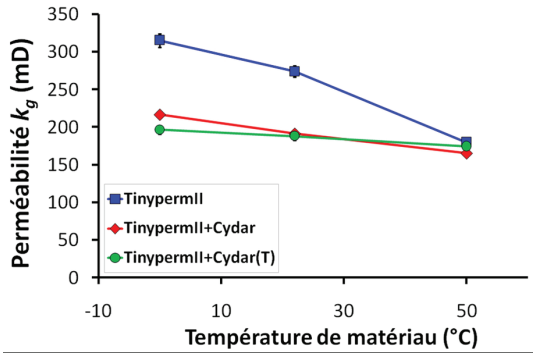


FIGURE 4 – Variation de la perméabilité à l'air dans la gamme de température 0 - 50 °C, en fonction de la méthode de calcul.

Au fur et à mesure de la réduction des dimensions, hauteur et diamètre, les valeurs de perméabilité diminuent (Figure 3). Avec la diminution du diamètre de 51 mm à 15 mm (Figure 3*a*), les valeurs de perméabilité à l'air décroissent de manière quasi constante et dessinent des droites dont les coefficients de régression linéaire sont de 0,85 et de 0,89 pour les mesures réalisées respectivement avec TinypermII et TinypermII+Cydar^{TM}. Ainsi, les valeurs de perméabilité diminuent de 27 % pour les valeurs de TinypermII et de 19 % pour les valeurs TinypermII+Cydar^{TM}. Par ailleurs, si l'on considère les valeurs de perméabilité mesurées au centre d'un échantillon parallélépipédique plus volumineux (10*10*5 cm) de grès provenant de la même carrière, également en fonction de la réduction du volume, les valeurs de perméabilité diminuent alors de 43 % avec TinypermII et de 32 % avec TinypermII+Cydar^{TM}. Ceci corrobore les données de Filomena *et al.* [4] qui rapportent une diminution moyenne de 37 % de la perméabilité à l'air pour des mesures réalisées sur les mêmes éprouvettes de

perméabilité comprise entre 1 et 1000 mD, présentant d'abord une forme cubique (d'arrête 10 cm) puis une forme cylindrique de 2,5 cm de diamètre.

Avec la diminution de la hauteur du cylindre (Figure 3*b*), les valeurs de perméabilité tendent à décroitre ; elles sont d'autant plus influencées que les épaisseurs sont faibles, jusqu'à une valeur seuil en deçà de laquelle les perméabilités augmentent. Pour les deux modes de calcul présentés, le point d'inflexion de la courbe se situe à une épaisseur de 10 mm. Dans la configuration des essais et pour la géométrie de l'embout utilisé, cette valeur minimale est interprétée comme l'épaisseur du matériau effectivement prise en compte dans le calcul de la perméabilité. De plus, les valeurs de perméabilité diminuent plus fortement pour des hauteurs inférieures à 20 mm confirmant ainsi les dimensions limites éditées par l'API [20].

2.3.2 Influence de la température

Les mesures sur site étant soumises aux variations des conditions environnementales, l'impact de la température sur les valeurs de perméabilité à l'air est évalué. Les mesures sont réalisées sur trois cubes d'arrêtes 7 cm placés dans une étuve ventilée à des températures de 0, 21 et 50 °C. Après 24 heures de conditionnement à la température désirée, un délai de six heures entre les mesures réalisées avec le TinypermII puis avec le TinypermII+Cydar^{TM} a été respecté afin de s'assurer de la stabilité des températures entre les différentes mesures. Les valeurs de perméabilité correspondent à la moyenne de trois mesures effectuées sur trois cubes de grès à Meules provenant de la carrière de Niderviller (F) dont la porosité au mercure est égale à 20,1 %.

Tandis que les valeurs obtenues avec TinypermII ne permettent aucune correction, les différentes variables d'entrée peuvent être paramétrées dans le logiciel Cydar^{TM} permettant de présenter deux modes de calculs qui prennent en compte les corrections liées aux températures différentes. L'un, TinypermII+Cydar^{TM}, considère la température ambiante de la pièce dans laquelle sont réalisées les mesures soit 21 ± 2 °C tandis que pour l'autre, TinypermII+Cydar^{TM}(T) (Figure 4), les températures réelles des blocs lors des mesures sont prises en compte, soit 0, 21 ou 50 °C.

a)

Quantité de produit (l/m²)	A	B	C
PKSE 30	1,2	2,2	3,4
BS OH 100	1,2	1,9	3,4
KSE® 500 E	1,0	2,2	3,6

b)



FIGURE 5 – Traitement de consolidation pour trois quantités croissantes de produits appliquées sur un pavé de grès d'Adamswiller : (a) quantité de produits appliqués par zone ; (b) aspect du pavé après application des produits de consolidation.

Les mesures réalisées avec TinypermII apparaissent plus sensibles à la variation de température que les mesures TinypermII+Cydar^{TM} et pour TinypermII+Cydar^{TM} (T) ; elles diminuent sur l'intervalle de température 0 - 50 °C respectivement de 42 %

contre 24 et 11 %. Les précisions augmentent avec l'application de corrections, les valeurs moyennes de perméabilité et leurs variations sont égales à 257 mD et 27 % pour TinypermII, à 191 mD et 14 % pour TinypermII+Cydar^{TM} et enfin à 187 mD et 7 % pour TinypermII+Cydar^{TM}(T). L'adaptation des paramètres aux conditions de mesure, permise par le logiciel Cydar^{TM}, réduit les erreurs sur la mesure. Les mesures réalisées pour des conditions de température extérieure variables influent sur les propriétés physico-chimiques, de viscosité dynamique et de densité de l'air. La perméabilité résultante suggère une diminution de la valeur de k_g avec l'augmentation de la température. Cette évolution traduit la compétition entre un effet thermique qui s'exprime par la dilatation des phases minérales et par un rétrécissement du réseau de pores, qui prédominent sur l'élévation de l'agitation thermique de l'air en mouvement.

3 Application à des problématiques de conservation

3.1 Traitement de consolidation

La sensibilité des méthodes de mesure de la perméabilité à l'air à un traitement de consolidation a été évaluée à l'occasion d'essais comparatifs réalisés avant et après application de produits. Trois consolidants différents fréquemment utilisés en conservation de la pierre ont été sélectionnés : les tétraéthoxysilanes MOTEMA® PKSE 30 d'Interacryl, SILRES® BS OH 100 de Wacker et KSE® 500 E de Remmers. Un pavé (10*10*5 cm) de grès à Meules d'Adamswiller (F), de porosité égale à 21,1 %, est divisé en neuf sections sur lesquelles sont appliqués des quantités croissantes de produits (Figure 5). Les quantités de produits appliquées pour chaque surface de 9 cm^2 varient de 1,0 à 3,6 l/m^2.

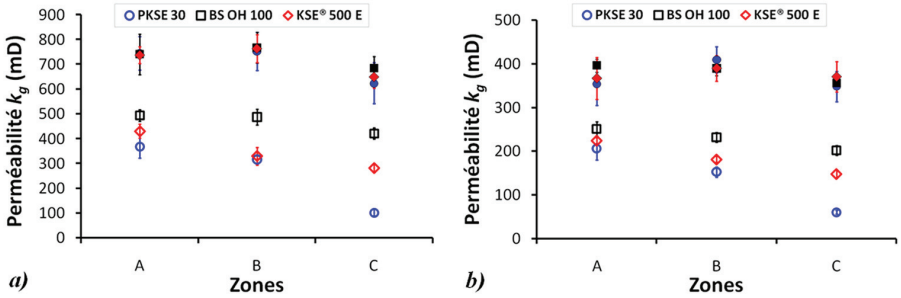


Figure 6 – Mesures de la perméabilité à l'air avant application des produits (symboles pleins) et après application des produits de consolidation (symboles vides) : (a) avec le système TinypermII ; (b) avec le système TinypermII+Cydar^{TM}.

Après application des produits de consolidation, quelle que soit la nature et la consommation du grès en produit, les valeurs de perméabilité à l'air montrent une diminution significative (Figures 6 et 7). Bien que les valeurs TinypermII soient plus élevées que les valeurs TinypermII+Cydar^{TM}, les perméabilités soulignent les mêmes évolutions d'une surface à l'autre, la diminution de perméabilité étant d'autant plus importante que la quantité de produit appliqué est plus élevée. Ainsi, pour les deux méthodes de mesure, les plus faibles diminutions de perméabilité à l'air, respectivement égales à 33 % et 37 %, se corrèlent avec la plus faible quantité de BS® OH 100 tandis que les

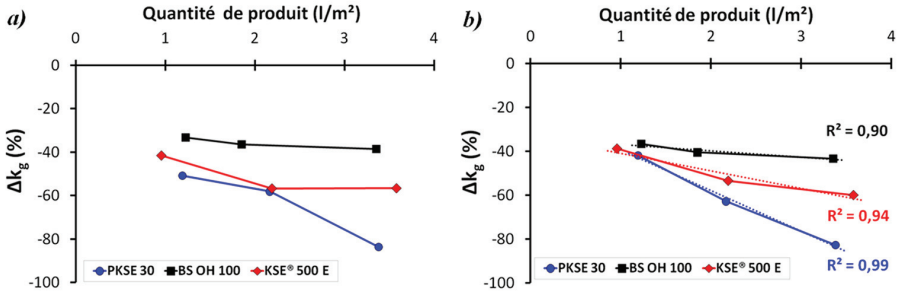


FIGURE 7 – Variation, en pourcentage, de la perméabilité à l'air en fonction de la quantité des produits de consolidation appliqués : (a) avec le système TinypermII ; (b) avec le système TinypermII+Cydar™.

diminutions maximales, respectivement de 84 % et 83 %, se manifestent pour la plus forte quantité de PKSE® 30. Cette diminution de la perméabilité à l'air des surfaces consolidées traduit une diminution des propriétés de transferts de fluide attribuée à un effet de colmatage de la porosité par les produits. Cependant, cette évaluation macroscopique globale ne fournit pas d'information sur la localisation, la répartition et la géométrie des espaces poreux préférentiellement affectés par le produit de consolidation.

Les valeurs de perméabilité apparaissent pour toutes les configurations de traitement, fortement impactées soulignant la sensibilité des méthodes de mesures. Dans le cas du TinypermII+Cydar™, la diminution de perméabilité à l'air se corrèle avec les quantités de produit de consolidation appliquées et permet une différenciation des produits en fonction de leur incidence sur les propriétés de transfert de fluide (Figure 7). Ainsi, le produit PKSE® 30 induit un plus fort effet de bouchage sur la structure de pores que le KSE® 500 E tandis que le BS® OH 100 présente l'effet le moins prononcé. Enfin, les variations de perméabilité entre les traitements semblent entièrement liées aux propriétés consolidantes des produits et ne montrent pas de lien direct avec leur teneur en matière sèche. La méthode de calcul impliquant le logiciel Cydar™ permet une discrimination plus linéaire de la diminution de perméabilité avec la puissance du traitement appliqué.

3.2 Incidence d'un nettoyage par micro-abrasion

Afin de mieux comprendre l'incidence du nettoyage par micro-abrasion sur la « respiration » du grès, des mesures de perméabilité à l'air sont réalisées comparativement avant et après nettoyage de blocs provenant de la cathédrale Notre-Dame de Strasbourg. Lors du chantier de restauration de la façade sud du transept sud de la cathédrale de Strasbourg, la flèche est a été déposée et les blocs conservés ont été nettoyés par la méthode de micro-abrasion. Le nettoyage est réalisé pour des pressions allant de 1 à 2 bars et une distance de travail de 10 à 20 cm, à l'aide d'Archifine© blanche, silicate d'alumine de granulométrie moyenne 40 microns (Semanaz) et de dureté 6 sur l'échelle de Mohs. Les mesures de perméabilité à l'air sont réalisées en trois zones verticalement espacées de 10 cm l'une de l'autre, sur deux blocs d'origine

mis en œuvre entre 1225 et 1235, et deux blocs de restauration mis en œuvre autour de 1850-1855. Les valeurs de perméabilité à l'air représentent une moyenne de cinq mesures successives.

Pour les éléments de restauration, les deux méthodes de calcul montrent une augmentation significative de la perméabilité à l'air après le nettoyage des surfaces (Figure 8*a* et 8*b*), à l'exception d'une zone (Zone C, bloc 8/5, Figure 8a). Les valeurs maximales avant et après nettoyage sont de 140 et 360 mD avec TinypermII et de 140 et 290 mD avec TinypermII+Cydar^{TM}. En revanche, pour les blocs d'origine, les valeurs de perméabilité à l'air sont inférieures à 30 mD et les effets du nettoyage sont moins marqués, voire divergents en fonction de la méthode de calcul considérée (Figures 8c et 8d). Avec TinypermII, les valeurs de perméabilité ne montrent pas d'évolution nette en lien avec le nettoyage. En effet, les perméabilités mesurées étant faibles, proches de la limite basse permise par la technique dans sa configuration standard, les erreurs relatives sont importantes ce qui ne permet pas de conclure en terme d'impact du nettoyage sur l'état et la conservation matérielle des épidermes. L'utilisation du logiciel Cydar^{TM} permet de réduire les durées d'acquisition de la mesure, l'ajustement à la courbe ne nécessitant pas le retour total à la pression atmosphérique dès lors que le nombre de points de mesure est suffisant pour ajuster la courbe expérimentale. Il est ainsi possible de réduire les erreurs liées aux contraintes expérimentales, ce qui autorise une mesure fiable de perméabilité pour des valeurs inférieures à 5 mD. Les valeurs de perméabilité TinypermII+Cydar^{TM} sont toutes plus élevées après le nettoyage des surfaces, à l'exception d'une zone de perméabilité équivalente avant et après nettoyage.

D'une manière générale, les perméabilités mesurées sont plus élevées après nettoyage des surfaces, ce qui confirme l'efficacité du procédé de nettoyage et l'élimination de dépôts de surface. Cette évolution atteste que ces dépôts de surface restreignent les échanges entre le matériau et son environnement. Toutefois, d'autres effets du nettoyage peuvent localement participer aux évolutions des valeurs de perméabilité. L'augmentation de la perméabilité post-nettoyage peut résulter d'un risque de fuite accru au niveau de l'interface entre l'embout et le substrat. Lorsque le nettoyage est excessif et que les particules de poudres projetées dégradent sélectivement les grains selon leu dureté, un nouveau profil de rugosité superficiel se dessine et se caractérise par une accentuation de la distance entre les creux et les sommets, propice à un contact plus imparfait entre l'embout et la surface nettoyée. D'autre part, une réduction de la perméabilité d'une surface nettoyée peut traduire soit le déplacement plus en profondeur de particules de salissure venant combler la porosité en subsurface, soit un broyage des grains exposés sous l'effet d'un poinçonnement des particules de poudre projetées. La modification des valeurs de perméabilité obtenues après nettoyage peut donc être interprétée différemment et traduire soit des effets techniques liés au procédé, soit des conséquences de la performance du nettoyage. Le couplage d'une investigation visuelle de l'état après nettoyage avec les résultats de mesures de perméabilité est susceptible de fournir de précieux renseignements sur la qualité et l'adaptation d'un nettoyage.

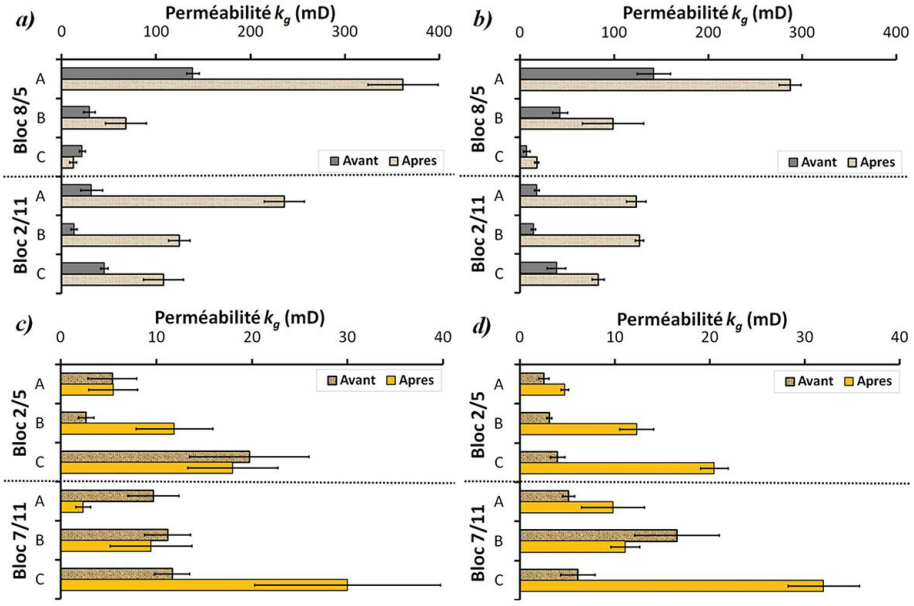


FIGURE 8 – Valeurs de perméabilité à l'air avant et après nettoyage par micro-abrasion sur des surfaces gréseuses mises en œuvre au XIX^{e} siècle (en gris) et au XIII^{e} siècle (en jaune) avec le minipermeamètre TinypermII (a et c) et avec le TinypermII associé au logiciel Cydar^{TM} (b et d).

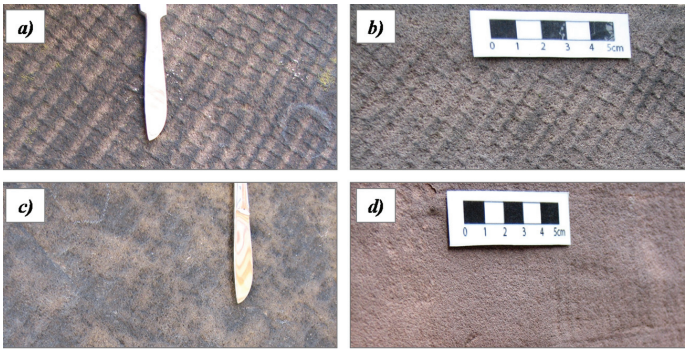


FIGURE 9 – Aspects macroscopiques des surfaces gréseuses mises en œuvre au XIX^{e} siècle (en haut) et au XIII^{e} siècle (en bas), avant (a et c) et après (b et d) nettoyage par micro-abrasion.

Les grès mis en œuvre au XIX^{e} siècle montrent des surfaces qui conservent de beaux aspects de tailles (Figure 9) avant et après nettoyage. Cette qualité de nettoyage, efficace et respectueuse des épidermes, se corrèle avec des valeurs de perméabilité à l'air de certaines zones recouvrant des valeurs proches de celles de grès de carrière (200-500 mD). En revanche, dans le cas des grès mis en œuvre au XIII^{e} siècle, les surfaces très émoussées et les faibles valeurs de perméabilité avant et après nettoyage sou-

lignent des modifications pétrographiques et texturales profondes corroborant ainsi les observations microscopiques de Thomachot *et al.* [30].

4 Application à l'étude du vieillissement des matériaux

4.1 Profils de perméabilité

À l'occasion du chantier de restauration de la façade sud du transept sud de la cathédrale de Strasbourg, un bloc de grès à Meules d'origine mis en œuvre vers 1225 a été déposé et conservé par la pose d'empiècement de grès. Pendant cette opération, une découpe à la scie est effectuée laissant une surface propre et nette sur laquelle des mesures sont réalisées depuis la surface extérieure vers la surface intérieure du bloc, dessinant ainsi deux profils transversaux de perméabilité à l'air. Chaque profil correspond à une série de mesures espacées d'environ 3 cm l'une de l'autre, distance égale à la largeur de l'embout, et chaque valeur correspond à une moyenne de quatre mesures. Un profil similaire est réalisé sur une pierre de restauration de la corniche mise en œuvre autour de 1850 et qui est déposée pour être substituée par une copie conforme.

Pour tous les profils, les valeurs de perméabilité à l'air présentent des évolutions similaires que les mesures soient réalisées avec TinypermII ou TinypermII+Cydar^{TM} (Figures 10 et 11). Pour les deux types de blocs, les mesures réalisées sur les surfaces extérieures, directement exposées aux intempéries, correspondent aux plus faibles valeurs de perméabilité des profils. Ces valeurs sont conformes aux ordres de grandeur des valeurs mesurées sur les surfaces extérieures de blocs de grès avant nettoyage (§ 3.2). Tous les profils de perméabilité sont effectués parallèlement au plan du litage. De plus, les mesures réalisées sur la surface externe étant localisées à proximité de la tranche, les conditions d'applications de la mesure de perméabilité intègrent les mêmes effets de bords que les mesures soient réalisées sur une surface naturelle vieillie ou sur une surface sciée et ne sont donc pas à l'origine des différences mises en évidence.

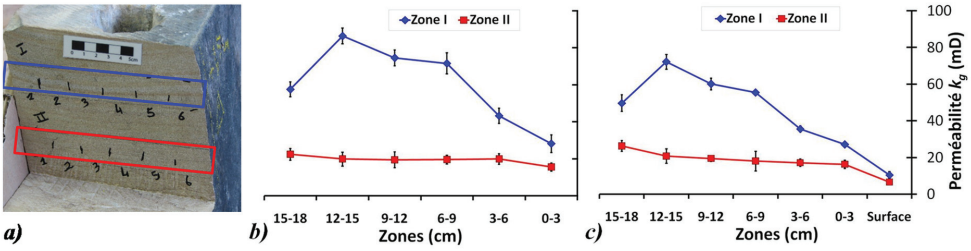


Figure 10 – Profils de mesures de la perméabilité à l'air de l'élément de grès d'origine mis en œuvre au XIII^{e} siècle : (a) localisation des zones de profil ; (b) mesures réalisées avec TinypermII ; (c) mesures réalisées avec TinypermII+Cydar^{TM}.

Pour le bloc d'origine, le profil rouge qui est le plus distant de la surface supérieure maçonnée du bloc, présente des valeurs faibles, inférieures à 20 mD, et constantes sur toute l'épaisseur du bloc (Figure 10). En revanche, le profil bleu, plus proche de la bordure extérieure, montre une augmentation progressive de la perméabilité à l'air,

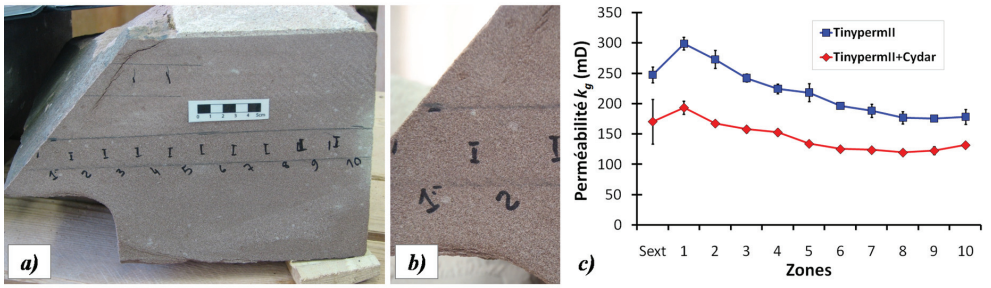


FIGURE 11 – Profils de mesures de la perméabilité à l'air sur un bloc de restauration du XIX^{e} siècle de couleur grise : (a) photographie de la zone de profil ; (b) agrandissement de la subsurface ; (c) mesures réalisées avec TinypermII et TinypermII+Cydar^{TM}.

de 30 à 70 mD, avec l'éloignement à la surface extérieure exposée. Ce comportement illustre l'obstruction progressive de la porosité par la remobilisation des éléments profonds vers la surface, comme énoncé par Jeannette [25]. De surcroît, la mesure la plus proche de la surface intérieure non lessivée du bloc présente une diminution soudaine à une valeur proche de 50 mD. Ceci souligne les modifications qui se produisent en subsurface du grès pour des surfaces exposées à l'air et interprétées soit comme des dépôts de particules atmosphériques soit comme la remobilisation d'amas argilo-ferrugineux comme l'a montré Thomachot *et al.* [30].

Le grès de restauration présente des valeurs de perméabilité à l'air plus élevées que celles du grès d'origine, supérieures à 150 mD (Figure 11c). Elles dessinent un profil qui diminue graduellement avec l'éloignement à la surface exposée illustrant une évolution contraire à celle du bloc d'origine. La valeur maximale se localise en subsurface, dans la zone située entre 0 et 3 cm de profondeur. Elle traduit l'existence d'un réseau de microfissures pourtant invisible à l'œil nu au niveau du profil mais situé directement dans le prolongement des fissures visibles en subsurface (Figures 11a et b).

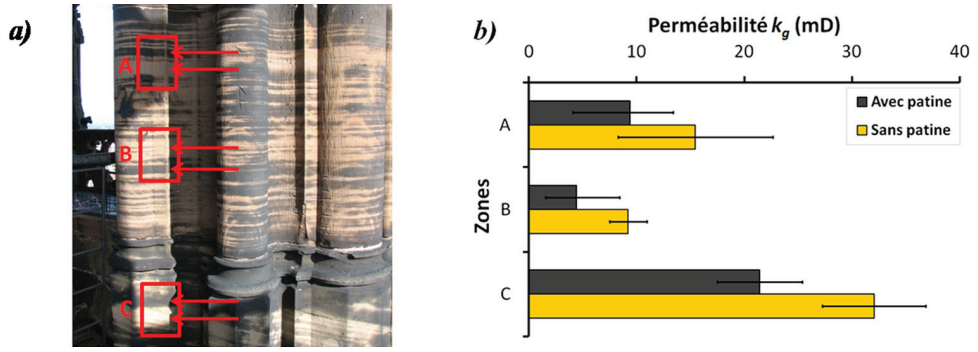


FIGURE 12 – Mesures de perméabilité à l'air sur des éléments de la Haute-Tour de la cathédrale de Strasbourg : (a) localisation des zones de tests A, B et C montrant une surface noire recouverte de patine noire vernissée et une surface jaune-rose, couleur d'origine du grès ; (b) valeurs de perméabilité à l'air représentant une moyenne de cinq mesures. Les zones A et B appartiennent au même bloc.

Ainsi, l'utilisation d'un miniperméamètre portable permet d'établir des profils transversaux de perméabilité à l'air capable de détecter la présence d'un réseau connecté de microfissures ce qui constitue un intérêt majeur de la technique dans l'élaboration d'un diagnostic ou d'un contrôle non destructif. Les faibles valeurs de perméabilité au niveau des surfaces exposées et en subsurface attestent de modifications locales des propriétés de transport du grès en lien avec l'obstruction de sa porosité consécutive de la formation de patines noires vernissées sur ce bloc du XIII^{e} siècle. Ces phénomènes affectent toute l'épaisseur du bloc de grès mais les variations les plus marquées se localisent pour des profondeurs jusqu'à 6 cm de la surface. Cette méthode est donc en mesure de fournir de précieuses informations sur l'anisotropie de perméabilité d'un bloc donné, dépendante de l'évolution des propriétés initiales des matériaux et/ou de l'impact des conditions extérieures sur leur vieillissement.

4.2 Incidence de la patine de surface

Au niveau de la Haute-Tour de la cathédrale de Strasbourg, les mouvements de convection de l'eau et de l'air ont dessiné avec le temps des motifs striés (Figure 12a). Afin d'évaluer si ces différences visuelles à l'échelle centimétrique résultent de différences pétrophysiques, des mesures sont réalisées sur des surfaces de grès d'origine, mis en œuvre au XV^{e} siècle, au niveau des parties noires et des parties jaunes à roses, couleurs d'origine du grès.

Seules les mesures avec le système TinypermII+Cydar^{TM} ont pu être effectuées. En effet, les faibles valeurs de perméabilité entrainent des durées de mesures pour lesquelles il devient difficile de conserver un bon contact tout au long de la mesure. Les valeurs de perméabilité à l'air représentent une moyenne de cinq mesures successives.

Pour toutes ces zones, les perméabilités à l'air présentent des valeurs faibles, comprises entre 4 et 32 mD (Figure 12b), en comparaison de valeurs mesurées sur les faciès équivalents en sortie de carrière ($\approx$ 200 - 500 mD). Ces valeurs sont cohérentes avec les perméabilités à l'azote indiquées par Thomachot et Jeannette [29] sur des éléments exposés provenant de la cathédrale de Strasbourg. Bien que la dispersion de perméabilité soit importante entre les zones testées due aux hétérogénéités pétrographiques originelles, les perméabilités à l'air des zones noires présentant la patine vernissée sont systématiquement plus faibles que celles des zones jaunes exemptes de patine. L'erreur sur la mesure représente une quantité non-négligeable de la valeur globale de perméabilité à l'air mesurée. Cette erreur doit être rapprochée des difficultés pratiques de mesures liées aux bordures arrondies des surfaces des éléments constitutifs de la Haute-Tour.

Conclusion

Les miniperméamètres fonctionnant sur le principe d'un écoulement transitoire en dépression autorisent une mesure rapide de la perméabilité à l'air *in situ* sur les matériaux poreux inorganiques. Cette mesure facile à mettre en œuvre et non destructive, est fortement influencée par les caractéristiques de l'embout qui assure le contact et l'étanchéité sur la surface du matériau de test. Le volume de l'échantillon-équivalent dépend des dimensions géométriques de l'embout, les mesures expérimentales réali-

sées ayant montré que les valeurs de perméabilité décroissent progressivement avec la diminution du volume de grès jusqu'à une valeur-seuil à 10 mm de profondeur en deçà de laquelle la perméabilité n'est plus caractéristique du matériau. Ces ordres de grandeurs justifient pleinement l'utilisation de ce système de mesure pour mettre en évidence des interventions en conservation/restauration sur les épidermes des matériaux exposés aux intempéries.

Avec le système TinypermII seul, certains facteurs comme la température ne sont pas pris en compte dans le calcul de la perméabilité dans sa configuration actuellement commercialisée. Il en résulte non seulement une imprécision sur la mesure mais aussi une plus forte erreur. L'utilisation du logiciel de contrôle et de calcul de la perméabilité Cydar^{TM} permettant de paramétrer certains facteurs, amène une meilleure précision et une plus grande justesse des valeurs obtenues. En outre, ce logiciel autorise également de réduire la durée d'acquisition de la mesure et d'accroître la sensibilité de la mesure pour les plus faibles valeurs de perméabilité, en particulier en dessous de 10 mD. Cependant, les différentes expériences effectuées sur les grès de la cathédrale de Strasbourg soulignent la capacité du minipermeamètre TinypermII, couplé ou non au logiciel Cydar^{TM}, à effectuer des mesures fiables aussi bien en laboratoire que sur site. Elles permettent de discriminer aisément l'évolution des propriétés pétrophysiques des grès suite à des traitements de conservation/restauration. Ainsi, la diminution de la perméabilité à l'air traduit soit un colmatage d'une partie de la porosité avec l'application de produits de consolidation, soit des évolutions fines des propriétés de transfert des grès à l'échelle centimétrique menant à l'obstruction d'une partie de la porosité et soulignant l'interaction avec l'environnement. L'augmentation de la perméabilité à l'air après nettoyage par la méthode de micro-abrasion suggère qu'il se produit à l'échelle micrométrique, une « ouverture » des pores de surface, ainsi libérés de leur encrassement, et pouvant conduire à une modification substantielle de la rugosité originelle des surfaces traitées.

La qualité du contact avec les surfaces des matériaux d'étude est déterminante dans la mesure où elle contrôle le risque de fuite à l'interface embout-matériau ; c'est en particulier le cas des surfaces présentant une rugosité macroscopique élevée comme les surfaces historiques montrant des traces d'outils et/ou de technique de taille, ou encore de surfaces concavo-convexes omniprésentes dans le cas d'objets sculptés. Un travail expérimental mené sur la rhéologie de différentes mousses interposées à l'interface embout-matériau support [20] permet d'optimiser l'équipement TinyermII et de permettre son utilisation sur un panel élargi de matériaux présentant des états de surface très différents.

In fine, l'utilisation d'un minipermeamètre portable et non destructif offre la possibilité de réaliser une mesure fiable sur site, caractéristique de modifications subies par ces matériaux poreux inorganiques à l'échelle centimétrique dans leur contexte environnemental. L'intérêt de cette méthode d'investigation se justifie pleinement pour les études de diagnostic ou de constat d'état afin de quantifier les propriétés physiques des matériaux du patrimoine soumis à des contraintes susceptibles d'initier des dommages, des altérations de surface ou pour caractériser l'efficacité de traitements de restauration/conservation. De plus, les possibilités d'adaptation ultérieures

du système sont multiples et pas toutes encore exploitées pour s'affranchir au mieux des limitations actuelles. Des améliorations significatives ont déjà été obtenue parmi lesquelles l'adjonction d'un matériau d'interface épousant la topographie des surfaces naturelles [23], ou encore l'utilisation d'embouts plus adaptés présentant des caractéristiques propres (nature, géométrie, taille) plus appropriées aux supports. D'autres suivront comme l'automatisation de la prise de mesure.

Références

[1] E. Colas, « Impact de l'humidité et des solutions salines sur le comportement dimensionnel de grès du Buntsandstein : application à la sélection de faciès de restauration », thèse de doctorat de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, 274 pages, 2011.

[2] ICOMOS-ISCS, Illustrated glossary on stone deterioration patterns, Edition V. Vergès-Belmin, 78 pages, 2008.

[3] V. C. Tidwell, « Air permeability measurements in porous media » dans Gas Transport in Porous Media, éds. C. Ho et S. Webb, Springer, p. 273-286, 2006.

[4] C. M. Filomena, J. Hornung, H. Stollhofen, Assessing accuracy of air-driven permeability measurements : a comparative study of diverse hassler-cell and probe permeameter devices. Solid Earth. 5, 1-11, 2014.

[5] M. Huysmans, L. Peetersa, G. Moermansa, A. Dassarguesa, Relating small-scale sedimentary structures and permeability in a cross-bedded aquifer. Journal of Hydrology. 361, 41–51, 2008.

[6] J.-D. Mertz, « Structures de porosités et propriétés de transport dans les grès », thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, 154 pages, 1991.

[7] J.-F. Daïan, Equilibre et transferts en milieux poreux, 646 pages, 2013.

[8] Y. Gueguen, V. Palciauskas, Introduction à la physique des roches, Hermann Editeur, 312 pages, 1997.

[9] C. Gallé, M. Pin, J.-F. Daïan, Etude de la perméabilité au gaz de matériaux cimentaires. Rapport scientifique CEA Saclay, Direction du Cycle du Combustible. 221-227, 1999.

[10] R. Lenormand, F. Bauget, G. Ringot, « Permeability measurements on small rock samples », International Symposium of the Society of Core Analysts, Halifax, Nova Scotia, Canada, SCA2010-32, 12 pages, 2010.

[11] B. Zinszner, F.-M. Pellerin, A Geoscientist's guide to petrophysics, Editions Technip, 384 pages, 2007.

[12] L. J. Klinkenberg, « The permeability of porous media to liquids and gases » dans Drilling and Production Practice, American Petroleum Institute, New York, p. 200–213, 1941.

[13] S. Profice, « Mesures de propriétés monophasiques de milieux poreux peu perméables par voie stationnaire », thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux, 127 pages, 2015.

[14] W. F. Brace, J. B. Walsh, W. T. Frangos, Permeability of granite under high pressure. Journal Geophysical Research. 73, 2225-2236, 1968.

[15] S. C. Jones, A rapid accurate unsteady-state klinkenberg permeameter. SPE Journal. 12(5), 383-397, 1972.

[16] H. Dykstra, R. L. Parsons, « The prediction of oil recovery by water flood » dans Secondary Recovery of Oil in the United States, 2nd ed. American Petroleum Institute, New York, p. 160-174, 1950.

[17] R. Eijpe, K. J. Weber, Mini-permeameters for consolidated rock and unconsolidated sand. AAPG Bulletin. 55(2), 307-309, 1971.

[18] S. C. Jones, « The profile permeameter-A new, fast, accurate minipermeameter », papier SPE 24757, 67th Annual Technical Conference, Soc. Of Pet. Eng., Washington, DC, 1992.

[19] J.-D. Mertz, E. Colas, A. Ben Yahmed, R. Lenormand, « Assesment of a Non-Destructive and Portable Mini Permeameter Based on a Pulse Decay Flow Applied to Historical Surfaces of Porous Materials », Science and Art : A Future for Stone, Proc. of the 13th Int. Cong. on the Det. and Cons. of Stone, Vol. 1, eds. J. Hughes & T. Howind, Paisley : University of the West of Scotland, p. 415-422, 2016.

[20] American Petroleum Institute, Recommended practices for core analysis, Editions STEP, 2nd ed., 263 pages, 1998.

[21] D. J. Goggin, R. L. Thrasher, L. W. Lake, A theoretical and experimental analysis of mini-permeameter response including gas slippage and high velocity flow effects. In Situ. 12(1-2), 79-116, 1988.

[22] A. P. S. Selvadurai, P. A. Selvadurai, Surface permeability tests : experiments and modelling for estimating effective permeability. Proc. R. Soc. A. 466, 2122, 2819-2846, 2010.

[23] E. Huby, « Optimisation de la mesure de perméabilité au gaz », mémoire de Master 2 Recherche, ENSCP Chimie Paris PSL, rapport confidentiel, 71 pages, 2017.

[24] D. Jeannette, « Structures de porosité, mécanismes de transfert des solutions et principales altérations des roches des monuments » dans La pietra Dei Monumenti In Ambiante Fisico E Culturale, Centro Universitario Europeo Per I Beni Culturali, Ravello-Firenze, p. 49–77, 1994.

[25] D. Jeannette, Les grès de la cathédrale : origines, évolutions et altérations. Bulletin de la cathédrale de Strasbourg. XXVI, 157-172, 2004.

[26] J.-D. Mertz, Sur quelques propriétés microstructurales des pierres de construction. Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris. 43(4), 3-11, 2006.

[27] E. Colas, J.-D. Mertz, C. Thomachot-Schneider, V. Barbin, F. Rassineux, Influence of the clay coating properties on dilation behavior of sandstones. Applied Clay Science. 52, 245-252, 2011.

[28] D. Jeannette, « Importance of the pore structures during the weathering process of stones in monuments » dans Soil and Sediments, éds. H. Paquet, N. Clauer, Springer, Berlin, Heidelberg, p. 177-190, 1997.

[29] C. Thomachot, D. Jeannette, Effects of iron black varnish on petrophysical properties of building sandstone. Environmental Geology. 47, 119-131, 2004.

[30] C. Thomachot-Schneider, M. Gommeaux, G. Fronteau, Modifications of the porous network of sandstone accompanying the formation of the black varnish. Environmental Geology. 56, 571-582, 2008.

[31] J.-D. Mertz, « Etat des lieux, diagnostic des pathologies et perspectives » dans Restauration des façades des monuments urbains, contraintes, problèmes et satisfactions, Collection « Un Chantier », éd. D. Carré, MCC, OPPIC, p. 8-13, 2010.

[32] M. A. Suboor, J. P. Heller, Minipermeameter characteristics critical to its use. In Situ. 19, 225-248, 1995.

[33] R. Meyer, F. F. Krause, A comparison of plug-derived and probe-derived permeability in cross-bedded sandstones of the Virgelle Member, Alberta, Canada : The influence of flow directions on probe permeametry. AAPG Bulletin. 85, 477-489, 2001.

[34] A. Ben Yahmed, « Perméabilité à l'air des matériaux inorganiques poreux : Validation d'un perméamètre portable applicable dans le domaine de la conservation du patrimoine architectural bâti », mémoire de master de l'ENTPE, Lyon, 87 pages, 2015.