



CSC

Conservation Science Consulting Sàrl

La science au service des monuments et des sites
Wissenschaft im Dienst historischer Bauten und Anlagen
Science for monuments and sites

R.0014.01f

BS, BE, FR ET VD - CATHÉDRALES DE BÂLE, DE BERNE, DE FRIBOURG ET DE LAUSANNE

PROJET DE CONTRÔLE ET DE SUIVI DES CONSOLIDATIONS - RÉSULTATS DES TESTS DE LABORATOIRE

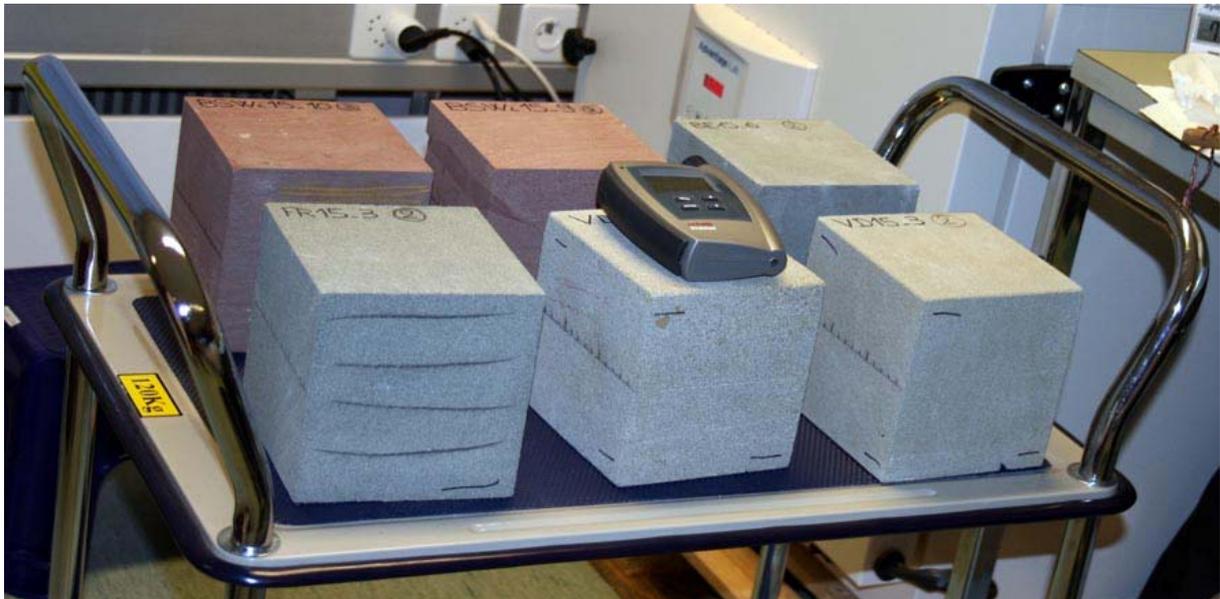
Commettants

Berner Münster-Stiftung / Wasserwerk-gasse 7 / Postfach / CH-3000 Bern 13

Stiftung Basler Münsterbauhütte / St. Alban-Vorstadt 53A / CH-4052 Basel

Service des bâtiments / Grand-Rue 32 / Case Postale / CH-1701 Fribourg

Service Immeubles, Patrimoine et Logistique / Département des infrastructures / Place de la Riponne 10 / CH-1014 Lausanne



Date : Fribourg, le 23 février 2009

Distribution : voir fin du rapport

Résumé : voir page suivante

Version allemande : R_0014_01d.pdf

Personnes chargées du dossier :

Dr Bénédicte Rousset & Dr Christine Bläuer

CSC Sàrl
Rue de l'industrie 10
CH-1700 Fribourg

Tél. : +41 26 422 12 44
e-mail: csc@conservation-science.ch
www.conservation-science.ch

Résumé :

Jusqu'à récemment il était courant de déposer les pierres présentant des altérations structurales même lorsqu'elles n'avaient pas d'implication grave pour la statique. La volonté actuelle est plutôt de conserver un maximum de matériau historique en place, et par conséquent, des méthodes de conservation visant à renforcer et protéger les pierres sont appliquées plus régulièrement. Parmi ces méthodes, les techniques de consolidation sont couramment employées depuis les trente dernières années. Malgré cette relative expérience, lorsqu'il s'agit d'estimer l'efficacité et la durabilité de ces traitements de consolidation, les praticiens comme les scientifiques ne savent pas très bien comment répondre aux questions. Pour tenter d'y remédier, nous avons souhaité mettre à disposition des praticiens des méthodes simples, si possible peu coûteuses et non destructives, qui leur permettraient de déterminer eux-mêmes les quantités de produits à appliquer, la méthode d'application appropriée et d'assurer eux-mêmes le suivi de leurs traitements.

Pour cela, nous avons sélectionné un MOIST 200B, permettant de mesurer la réflexion des micro-ondes et un COMBO 200, appareil mesurant la conductibilité électrique. Nous espérons que, par une mesure de surface, l'appareil MOIST 200B pourrait nous indiquer la profondeur de pénétration et la quantité de liquide (eau ou consolidant) ayant pénétré dans une pierre à la surface de laquelle ce liquide serait appliqué. Malheureusement, les résultats montrent que - pour les matériaux testés du moins - les valeurs fournies par cet appareil ne peuvent être utilisées ni pour estimer la teneur en liquide du matériau, ni pour évaluer la profondeur de pénétration de ce liquide. Quant au conductivimètre COMBO 200, que nous souhaitons utiliser pour confirmer ou préciser les informations fournies par le MOIST, les essais effectués au cours de cette étude ont montré qu'il n'était pas du tout adapté à des mesures de surface non destructives sur les pierres.

Cette étude, nous a néanmoins permis de mieux connaître les matériaux mis à disposition par les 4 cathédrales, c-à-d les grès de Maintal et de Wiesental pour la cathédrale de Bâle, le grès de Gurten pour la cathédrale de Berne, la molasse de Villarlod pour la cathédrale de Fribourg et enfin la molasse de la Mercerie pour la cathédrale de Lausanne.

De plus, les résultats permettent de mieux comprendre les phénomènes qui régissent la pénétration des liquides dans une pierre par imbibition capillaire. En particulier, nos résultats montrent qu'aucun test de laboratoire ne permet de déterminer la quantité de consolidant à appliquer pour assurer la consolidation optimale. Pratiquement, ceci implique que la meilleure façon d'appliquer un consolidant est une application "à refus", cette notion de "refus" étant à définir précisément au cas par cas : comme le montrent nos résultats, la quantité maximale de liquide absorbable par unité de temps et de surface d'application ainsi que la profondeur de pénétration correspondante, dépendent de la nature et de l'état de la pierre, de la méthode d'application et de la nature du produit (il est aussi probable que la présence de sels solubles ou d'anciens produits de traitement sur la surface et/ou dans la porosité influencent beaucoup cette quantité absorbable). L'application doit donc toujours être ajustée au cas par cas, édifice par édifice, pierre par pierre et même portion de pierre par portion de pierre pour les pierres affectées par des altérations inhomogènes ou graduelles, c-à-d dans la majorité des cas.

Par conséquent, l'application des consolidants ne peut pas être "mécanisée", l'œil et l'expérience de l'applicateur étant absolument nécessaires pour faire ces ajustements. D'après cette étude, les tests de laboratoire donnent des résultats trop éloignés de la réalité et aucune technique non destructive peu coûteuse ne semble actuellement permettre un contrôle (puis un suivi) des traitements de consolidation *in situ*. Ainsi, la seule façon de savoir exactement comment un consolidant pénètre et se répartit dans une pierre donnée, avec un état d'altération donné, est de procéder à des tests destructifs *in situ*. De plus, pour assurer un suivi intelligent et utile des essais de consolidation dans le temps, il est primordial

de documenter les interventions et de les documenter de façon pertinente et utilisable lorsque des personnes étrangères aux traitements voudront les comprendre dans le futur.

Cette étude nous pousse à nous poser des questions sur l'efficacité et la durabilité des consolidations aux silicates d'éthyle. Quel rôle joue exactement le gel de silice qui se forme lors de leur séchage ? Comment peut-il redonner une cohérence à des grains très désolidarisés ? Quelles sont les formes d'altération "consolidables" ? Quelles sont les relations exactes entre les conditions environnementales et les consolidants à base de silicates d'éthyle ? Quelle est l'influence des molécules qui restent hydrophobes après la formation du gel ? Quelle est l'influence du gel de silice lui-même sachant que certaines observations tendent à prouver qu'il peut, dans certains cas, accélérer l'apparition de dégradations de la pierre consolidée ? Comment ce gel évolue-t-il dans le temps ? Comment interagit-il avec la pierre et comment son vieillissement influence-t-il la durabilité de la consolidation ?

En raison de toutes ces questions actuellement sans réponse et des résultats de notre étude, nous concluons qu'il n'est pas possible de pronostiquer les conséquences exactes d'une consolidation aux silicates d'éthyle sur la durabilité de la pierre traitée et que par conséquent, une telle consolidation ne doit jamais être utilisée comme méthode de conservation préventive mais seulement et exclusivement comme remède.

Table des matières

1	Introduction.....	6
1.1	But du projet	6
1.2	Pourquoi quatre cathédrales.....	6
1.3	Démarche envisagée.....	6
2	Quelques considérations sur la consolidation.....	7
2.1	Pénétration du consolidant dans le réseau poreux.....	7
2.2	Processus chimique assurant la consolidation des grès	9
3	Grès sélectionnés.....	10
3.1	Nature géologique des matériaux.....	10
3.1.1	Grès de Maintal (cathédrale de Bâle, BSMa)	11
3.1.2	Grès de Wiesental (cathédrale de Bâle, BSWi).....	11
3.1.3	Grès (molasse) de Gurten (cathédrale de Berne, BEGu).....	11
3.1.4	Molasse de Villarod (Cathédrale de Fribourg, FRVi)	11
3.1.5	Molasse de la Mercerie (Cathédrale de Lausanne, VDMe).....	14
3.2	Échantillons à disposition	14
3.3	Mesures pétrophysiques effectuées sur ces matériaux.....	15
3.3.1	Porosité totale mesurée par imbibition d'eau sous vide.....	15
3.3.2	Cinétiques d'absorption et porosité capillaires.....	16
3.3.2.1	Absorption capillaire de l'eau (cubes de 4 et 15 cm d'arête)	17
3.3.2.2	Absorption capillaire de l'alcool (cubes de 4 et 15 cm d'arête).....	19
3.3.2.3	Absorption capillaire du consolidant (cubes de 4 et 15 cm d'arête).....	22
3.3.2.4	Tableaux et graphiques récapitulatifs et comparatifs.....	25
3.3.3	Isotherme d'adsorption de vapeur d'eau.....	29
3.3.4	Interprétations, comparaisons et implications pour la consolidation.....	32
3.3.4.1	Porosité totale et propriétés capillaires	32
3.3.4.2	Isothermes d'adsorption.....	36
4	Consolidants sélectionnés	37
5	Appareils utilisés et principes de fonctionnement	39
5.1	Bref principe de fonctionnement du MOIST 200B	39
5.2	Bref principe de fonctionnement du COMBO 200	40
6	Résultats des mesures	41
6.1	Réflexion des micro-ondes	41
6.1.1	Mesures effectuées sur les échantillons secs	41
6.1.2	Mesures effectuées en cours d'adsorption de vapeur d'eau	43
6.1.3	Mesures effectuées en cours d'imbibition capillaire à l'eau	47
6.1.4	Mesures effectuées pendant et après application des consolidants.....	51
6.2	Conductivimétrie électrique	55
6.2.1	Mesures effectuées en cours d'adsorption de vapeur d'eau	55
6.2.2	Mesures effectuées en cours d'imbibition capillaire à l'eau	56
7	Synthèse et questions ouvertes	57
8	Glossaire	59
9	Bibliographie.....	60
Annexe 1	- Quelques informations complémentaires sur les grès étudiés.....	62
A1.1	Grès de maintal (münster de bâle, bs).....	62
A1.2	Grès de wiesental (münster de bâle, bs).....	62
A1.3	Grès (molasse) de gurten (münster de berne, be).....	63
A1.4	molasse de villarod (cathédrale de fribourg, fr)	64
A1.5	molasse de la mercerie (cathédrale de lausanne, vd).....	64
A1.6	Bibliographie de l'annexe 1	65

Annexe 2 - Les mesures pétrophysiques effectuées.....	68
A2.1 Mesure de la porosité "totale"	68
A2.2 Imbibition capillaire	69
A2.3 adsorption de vapeur d'eau	72
A2.4 Bibliographie de l'annexe 2	75
Annexe 3 - Mode opératoire et limites d'utilisation du MOIST 200B	76
A3.1 limites d'utilisation	76
A3.2 généralités concernant les mesures et les précautions prises	78
A3.3 mesures effectuées sur les échantillons secs.....	79
A3.4 mesures effectuées en cours d'adsorption de vapeur d'eau	79
A3.5 mesures effectuées en cours d'imbibition capillaire à l'eau	80
A3.6 mesures effectuées pendant et après application des consolidants	81
Annexe 4 - Mode opératoire et limites d'utilisation du COMBO 200	83
A4.1 limites d'utilisation	83
A4.2 généralités concernant les mesures et les précautions prises	83
A4.3 mesures effectuées en cours d'adsorption de vapeur d'eau	84
A4.4 mesures effectuées en cours d'imbibition capillaire à l'eau	85

1 Introduction

1.1 But du projet

Les pierres mises en œuvre et exposées aux intempéries sur les monuments présentent diverses formes d'altération, telles que la formation de plaques ou la désagrégation sableuse, qui se caractérisent par une perte plus ou moins intense de leur cohésion.

Jusqu'à récemment il était courant de déposer les pierres présentant ces altérations structurales même lorsqu'elles n'avaient pas d'implication grave pour la statique. La volonté actuelle est plutôt de conserver un maximum de matériau historique en place, et par conséquent, des méthodes de conservation visant à renforcer et protéger les pierres sont appliquées plus régulièrement. Parmi ces méthodes, les techniques de consolidation sont couramment employées depuis les trente dernières années (Amoroso & Fassina, 1983 ; Price, 2006).

Malgré cette relative expérience, lorsqu'il s'agit d'estimer l'efficacité et la durabilité de ces traitements de consolidation, les praticiens comme les scientifiques ne savent pas très bien comment répondre aux questions. En effet, la documentation se référant aux interventions passées faisant le plus souvent défaut (Bläuer et al., 1988), il est impossible d'expliquer les observations qui peuvent être faites sur les bâtiments traités il y a quelques dizaines d'années. Il nous semble donc important d'aider les utilisateurs de consolidants à systématiser et documenter leurs interventions de manière à ce que le suivi des traitements fournisse dans le futur une meilleure maîtrise de ces techniques.

Pour ce faire, nous souhaitons mettre à disposition des praticiens des méthodes simples, si possible peu coûteuses et non destructives, qui leur permettront de déterminer eux-mêmes les quantités de produits à appliquer, la méthode d'application appropriée et d'assurer eux-mêmes le suivi de leurs traitements. Parallèlement, l'élaboration d'une documentation *ad hoc* permettra de déterminer plus précisément l'efficacité et la durabilité des traitements effectués.

Le projet présenté ici est à la première étape de cette démarche.

1.2 Pourquoi quatre cathédrales

Les cathédrales de Bâle, Berne, Fribourg et Lausanne sont quatre monuments construits en grès, roches sédimentaires détritiques essentiellement constituées de silicates (quartz et feldspaths), et ayant des structures poreuses similaires. Par conséquent, les formes de dégradation sont relativement semblables - quoique légèrement différentes - et par suite, les problématiques de conservation sont elles aussi très similaires. Il nous paraissait intéressant que les responsables de ces quatre monuments entrent en contact et qu'ils mettent en commun leurs savoirs et leurs ressources financières pour résoudre des problèmes comparables.

1.3 Démarche envisagée

Pour atteindre notre but, nous avons sélectionné des appareils simples d'utilisation, relativement bon marché et permettant de faire des mesures non destructives : un MOIST 200B®, permettant de mesurer la réflexion des micro-ondes et un COMBO 200®, appareil mesurant la conductibilité électrique.

Nous avons sélectionné ces appareils - vendus dans le commerce pour mettre en évidence des zones d'humidité dans les maçonneries - parce qu'après une étude de littérature (CSC, 2007), leurs principes de fonctionnement nous semblaient adaptés pour :

1. choisir la méthode d'application des consolidants la mieux appropriée et estimer avant traitement la quantité de produit à injecter pour assurer le renforcement optimal ;
2. contrôler et ajuster la profondeur de pénétration des produits pendant le traitement ;
3. suivre l'effet du traitement au cours du temps.

2 Quelques considérations sur la consolidation

Afin de mieux comprendre la consolidation des pierres, il nous paraît important de connaître quelques aspects théoriques concernant le processus de pénétration du produit de consolidation ainsi que les réactions chimiques qui tiennent place dans le réseau poreux après pénétration.

En effet, la connaissance du processus de pénétration permet de sélectionner une technique d'application adaptée à la pierre et à la profondeur de l'altération à traiter, tandis que la connaissance des réactions chimiques permet de savoir quelles conditions environnementales doivent être réunies pour assurer une bonne consolidation.

2.1 Pénétration du consolidant dans le réseau poreux

Les consolidants, appliqués sous forme liquide sur la surface des pierres à traiter au moyen d'une brosse ou pulvérisés à l'aide d'un appareil à basse pression, doivent être absorbés et véhiculés par capillarité à travers le réseau poreux jusqu'à la profondeur nécessaire.

Le processus de capillarité dépend des tensions capillaires qui dépendent elles-mêmes de la viscosité du fluide, de son affinité pour les surfaces solides qu'il rencontre, des dimensions et de l'arrangement géométrique des pores.

Quel que soit le liquide considéré, l'imbibition capillaire peut être divisée en capillarité massique, qui détermine la quantité de liquide qui peut pénétrer dans un milieu poreux par unité de temps, et en capillarité linéaire qui définit la profondeur atteinte par le front du liquide dans le matériau poreux après un certain temps. Ces deux phénomènes sont linéaires en fonction de la racine carrée du temps (cf. figures 1 et 2).

Pour une structure poreuse, un liquide et une surface d'application donnés, la quantité de liquide pouvant être absorbée par capillarité pendant un intervalle de temps t ne peut pas être supérieure à un volume - ou un poids - de liquide limite correspondant à la porosité capillaire P_{0c} . Le liquide absorbé par capillarité dans le réseau poreux d'un matériau pierreux piègeant inévitablement des bulles d'air dans les macropores, la porosité capillaire est systématiquement inférieure à la porosité totale P_{0t} (cf. figure 1).

Pour la consolidation ceci signifie concrètement :

- qu'il est inutile d'appliquer une quantité de produit consolidant supérieure à ce que la pierre peut absorber par unités de temps et de surface ;
- que pour atteindre une certaine profondeur de pénétration, il est théoriquement possible de calculer quelle quantité de produit doit être appliquée et comment cette application doit être faite.

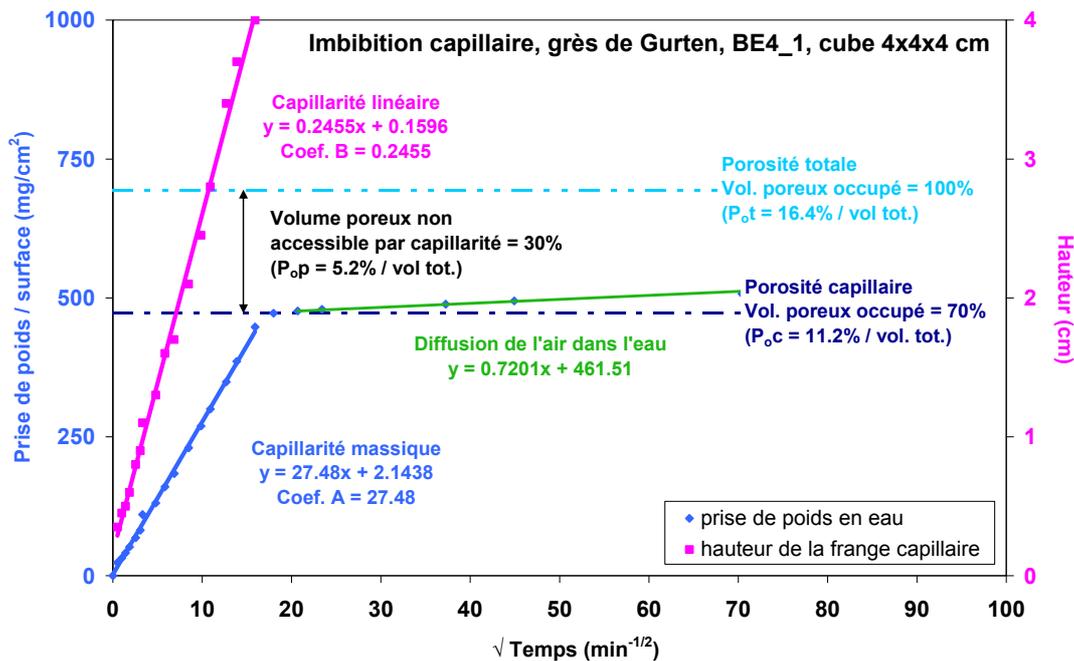


Figure 1. Courbes de capillarité typiques pour un échantillon de grès de Gurten (cube de 4 cm d'arête): les cinétiques de capillarité massique (courbe bleue) et linéaire (courbe rose) sont représentées en fonction de la racine carrée du temps. Sont aussi représentées la porosité totale (P_{0t}), la porosité capillaire (P_{0c}) et la différence appelée porosité piégée ($P_{0p} = P_{0t} - P_{0c}$). Lorsque la frange capillaire atteint le sommet de l'échantillon, tout le volume poreux pouvant être rempli par le processus de capillarité est occupé par le liquide et définit la porosité capillaire. Si l'alimentation en liquide n'est pas interrompue, l'air piégé dans la porosité peut lentement être remplacé par le liquide par le processus de diffusion (courbe verte).

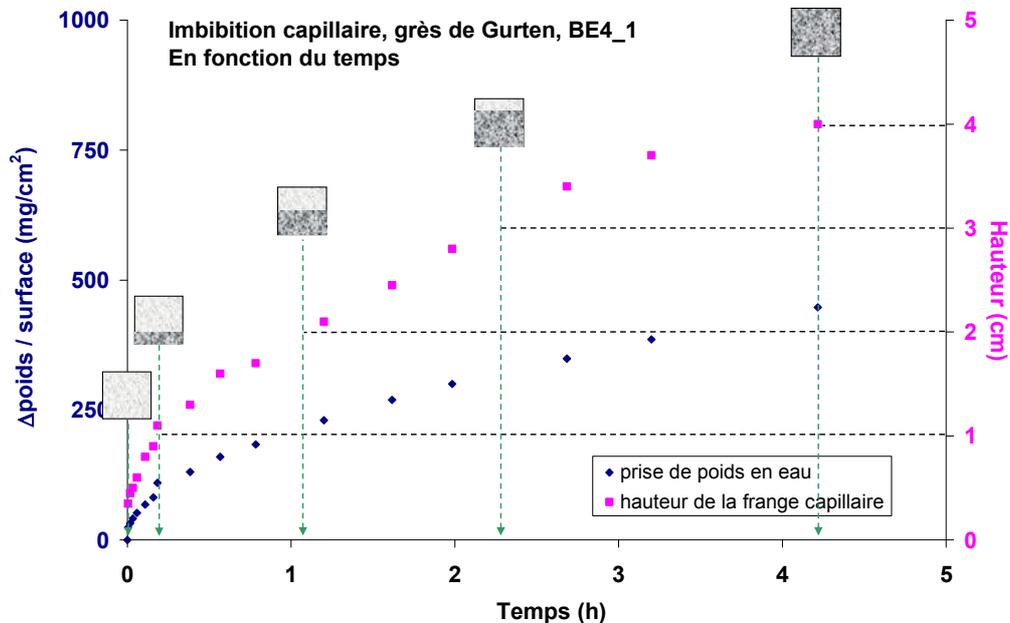


Figure 2. Même courbes de capillarité que sur la figure 1, mais représentée en fonction du temps. Les carrés montrent après quels intervalles de temps la frange capillaire, ou profondeur de pénétration, atteint 1, 2, 3 et 4 cm.

2.2 Processus chimique assurant la consolidation des grès

Nous ne nous intéresserons ici qu'à la consolidation des roches gréseuses et plus particulièrement aux consolidations à l'aide de silicates d'éthyle - ou esters de silice - puisqu'il s'agit de la famille de consolidants qui est utilisée sur les quatre édifices étudiés¹

Les silicates d'éthyle sont actuellement les molécules les plus fréquemment utilisées pour consolider les roches gréseuses présentant une désagrégation sableuse en raison de la structure chimique du gel qu'ils forment dans les pores qui est similaire à celle du quartz - minéral prépondérant des roches gréseuses - mais aussi en raison de leur faible poids moléculaire qui leur permet d'atteindre des profondeurs de pénétration généralement suffisantes pour les dégradations à traiter². De plus, ces matériaux ne sont pas dégradés par les rayonnements ultraviolets comme c'est le cas pour les résines ou autres produits organiques utilisés pour la consolidation des pierres.

Il s'agit de composés organiques de la famille des silanes, dont les molécules sont formées d'un atome de silicium (Si) central lié à un ou plusieurs radicaux éthyle ($-C_2H_5$) par l'intermédiaire de liaisons Si-O et à d'autres radicaux hydrocarbonés plus ou moins complexes (cf. figure 3).

Ces molécules, généralement additionnées d'un catalyseur, sont appliquées sous forme de liquide de faible viscosité sur la surface des pierres à traiter où elles pénètrent par capillarité. La faible quantité d'eau présente dans le réseau poreux - adsorbée aux parois des pores - hydrolyse les molécules de silicates d'éthyle (cf. figure 4), libérant ainsi de l'éthanol qui se volatilise, puis les molécules hydrolysées se condensent pour former le polymère, ou gel d'acide silicique, qui tapisse les parois des pores en formant ainsi un nouveau liant entre les grains. Après polymérisation du consolidant, la porosité reste majoritairement libre.

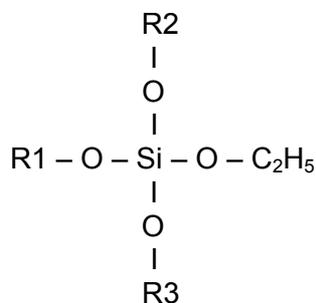


Figure 3. Formule chimique de base des monomères de silicates d'éthyle. Dans le cas des consolidants utilisés dans cette étude, les radicaux R1, R2 et R3 sont tous des radicaux éthyle C_2H_5 , il s'agit donc de tétraéthylsilicates ou tétraéthoxysilanes (TEOS).

Ces réactions chimiques sont relativement dépendantes des conditions de température (entre 10 et 20°C environ, suivant les fournisseurs) mais aussi et surtout d'humidité. En effet, les radicaux hydrocarbonés du produit appliqué sont naturellement hydrophobes. Pour que cette hydrophobicité ne soit que temporaire, il faut faire en sorte que la majorité de ces radicaux puissent être hydrolysés. Pour cela, la porosité de la pierre doit contenir une

¹ Pour une énumération des divers types de consolidants qui existe actuellement, nous renvoyons le lecteur intéressé au travail de synthèse de Price (2006) ou au livre de Horie (1987).

² La petitesse de ces molécules est un avantage vis-à-vis de la profondeur de pénétration qui peut être atteinte dans le cas de désagrégations peu importantes, mais elle devient un "inconvenient" lorsque de grandes discontinuités apparaissent dans la matière. Dans ce cas, ces consolidants seuls ne sont plus efficaces.

quantité adéquate de vapeur d'eau (plus ou moins adsorbée aux parois des pores) avant, pendant et après traitement, vapeur d'eau qui permettra les réactions d'hydrolyse des radicaux hydrocarbonés et par suite la formation de films polymères continus.

Par contre, la porosité de la pierre ne doit pas contenir d'eau liquide avant, pendant et après l'application, l'eau liquide ayant tendance à isoler de multiples fragments de polymères, ou oligomères, dont les contours resteront toujours hydrophobes (Wendler, 2008 ; Wheeler, 2005).

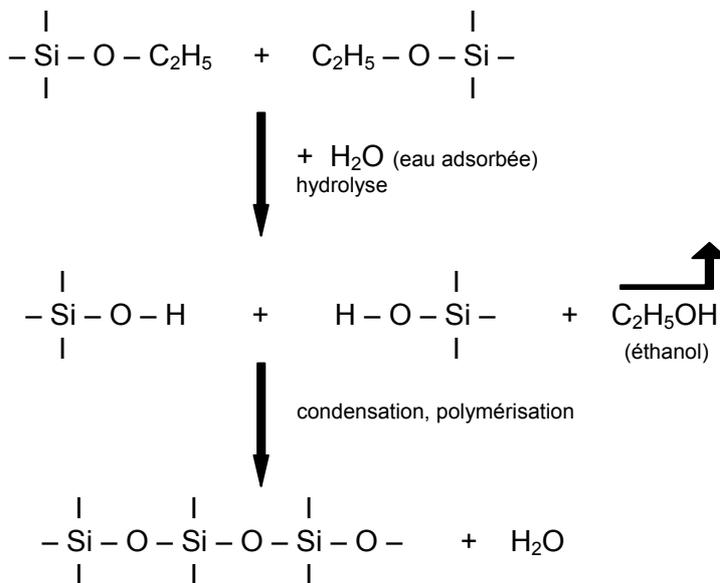


Figure 4. Réactions chimiques ayant lieu dans le réseau poreux des roches après application des silicates d'éthyle : hydrolyse des monomères en présence de l'eau adsorbée, avec dégagement d'éthanol, puis condensation ou polymérisation des molécules hydrolysées.

Pratiquement, ceci signifie :

- que la température ambiante lors du traitement doit être comprise entre 10 et 20°C environ ;
- que la pierre à traiter doit être "sèche" (elle ne doit pas contenir d'eau liquide) avant, pendant et après l'application des silicates d'éthyle ;
- que l'humidité relative ambiante doit être au moins égale à 50% avant, pendant et après l'application de sorte que la quantité d'eau présente dans le réseau poreux soit suffisante pour permettre l'hydrolyse ;
- que l'humidité à l'intérieur de la pierre doit être répartie le plus uniformément possible afin d'éviter l'apparition de strates d'hydrophobicités différentes sur toute la profondeur de pénétration du produit consolidant.

3 Grès sélectionnés

3.1 Nature géologique des matériaux

Chaque cathédrale nous a confié des échantillons d'un seul type de grès correspondant à l'une des pierres régulièrement consolidées sur le monument et sur lequel nous aurions la possibilité de travailler *in situ*. Exceptionnellement, nous avons accepté de tester deux types de grès pour la cathédrale de Bâle.

En Annexe 1 sont résumées les quelques informations que l'on peut trouver dans la littérature se rapportant aux 5 grès sélectionnés. Ces données sont regroupées sous les 3 thèmes principaux suivants : "géologie, minéralogie, pétrographie", "propriétés pétrophysiques et mécaniques" et "formes d'altérations".

3.1.1 Grès de Maintal (cathédrale de Bâle, BS_{Ma})

Ce grès s'est formé par induration d'un sable déposé dans un bassin sédimentaire continental au Trias inférieur (ère secondaire), plus précisément au Buntsandstein (il y a environ 250-245 millions d'années), dans la région du Main, dans le Land de Hesse en Allemagne. Il est essentiellement composé de quartz, de feldspaths et de minéraux secondaires peu abondants tels que des oxydes de fer qui lui confèrent sa couleur rouge, des argiles et des micas (cf. figure 5).

3.1.2 Grès de Wiesental (cathédrale de Bâle, BS_{Wi})

Le grès de Wiesental est aussi un grès rouge du Buntsandstein (250-245 Ma) provenant d'Allemagne. Il vient du Land de Baden-Wurtemberg, au sud de la forêt noire, à environ 50 km de Bâle. La composition minéralogique du grès de Wiesental est très similaire à celle du grès de Maintal (cf. figure 6), mais si l'on se réfère aux échantillons dont nous disposons, on constate que le premier est beaucoup moins homogène que le second.

3.1.3 Grès (molasse) de Gurten (cathédrale de Berne, BE_{Gu})

Le grès de Gurten - ou molasse bernoise - est une molasse burdigalienne (16-20 Ma, ère tertiaire, époque du miocène), c-à-d un grès à ciment calcaire vert à gris-bleu ou gris-jaunâtre, formé en bordure nord des Alpes lors de leur plissement par l'induration d'un sable marneux déposé dans une mer tropicale. Il est extrait du mont Gurten, la montagne de Berne. Il est essentiellement composé de quartz, de feldspaths, de lithoclastes³, de quelques bioclastes⁴, d'argiles, d'oxy-hydroxydes de fer et de micas, le tout étant cimenté par une phase calcitique (cf. figure 7). La coloration verdâtre est due la glauconite, un minéral argileux vert typique des dépôts marins. Quant aux teintes jaunâtres, elles proviennent de l'oxydation des minéraux ferreux qu'il contient.

3.1.4 Molasse de Villarod (Cathédrale de Fribourg, FR_{Vi})

La molasse de Villarod - ou molasse fribourgeoise -, est aussi une molasse burdigalienne (16-20 Ma). Elle a donc la même origine géologique que la molasse bernoise. Elle est extraite sur la commune de Villarsel-le-Gibloux dans le canton de Fribourg. Sa composition minéralogique est très similaire à celle du grès de Gurten, même si la granulométrie des éléments qui les constituent sont parfois très différente et si les bioclastes sont beaucoup plus abondants dans la molasse de Villarod, du moins pour les échantillons dont nous disposons (cf. figure 8).

³ Lithoclaste = débris de roche ou de sédiment re-sédimenté.

⁴ Bioclaste = élément fossile entier ou fragmentaire, d'origine végétale ou animale.

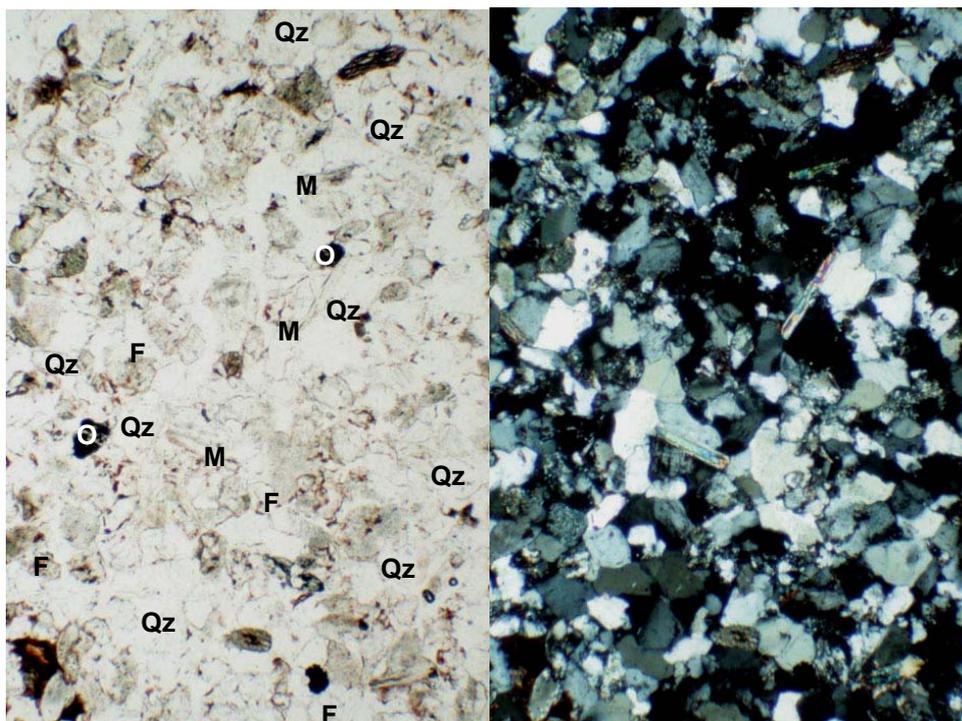


Figure 5. Grès de Maintal observé au microscope optique à lumière transmise avec analyseur (à gauche : couleurs naturelles) et avec analyseur et polariseur croisés à 90° (à droite : teintes de biréfringence). Hauteur des images : 2,7 mm. Qz = quartz, F = feldspath, M = mica, O = amas d'argiles et d'oxy-hydroxydes.

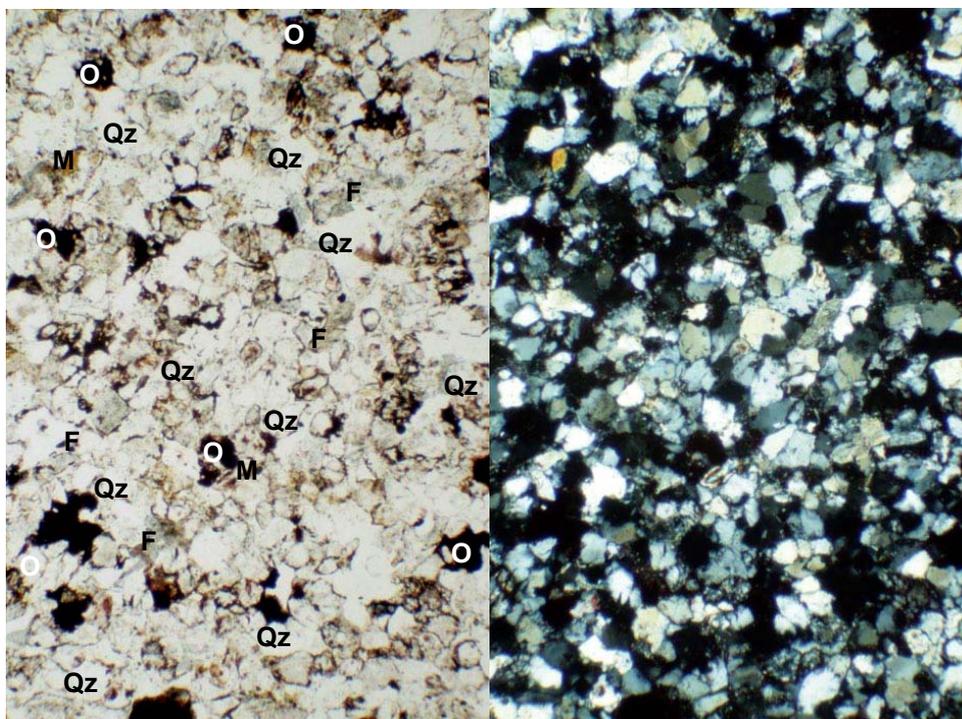


Figure 6. Grès de Wiesental observé au microscope optique à lumière transmise avec analyseur (à gauche : couleurs naturelles) et avec analyseur et polariseur croisés à 90° (à droite : teintes de biréfringence). Hauteur des images : 2,7 mm. Qz = quartz, F = feldspath, M = mica, O = amas d'argiles et d'oxy-hydroxydes.

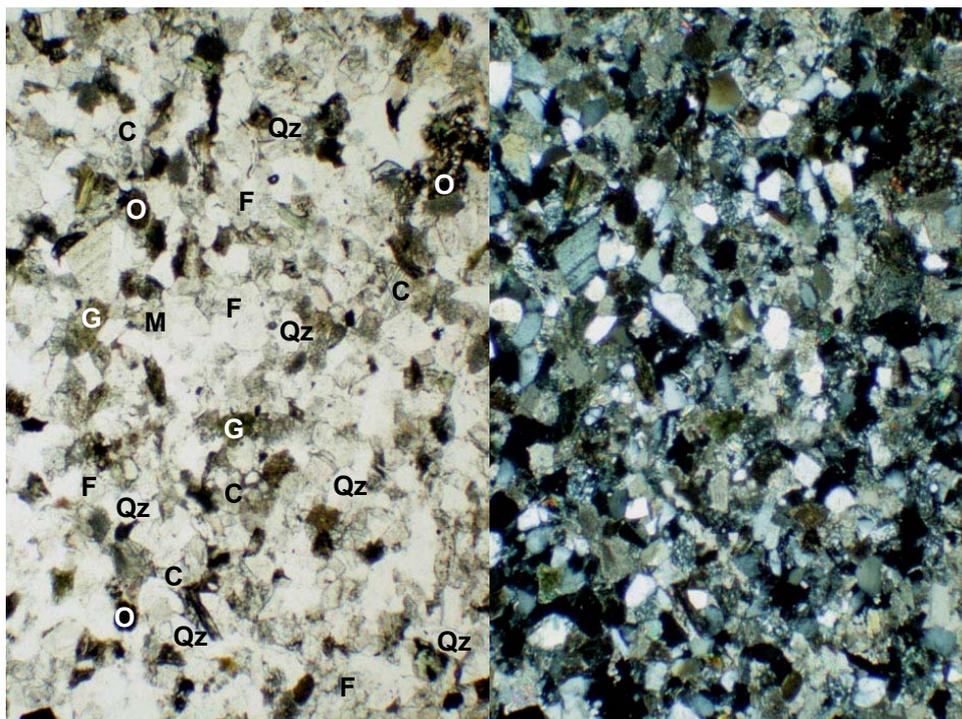


Figure 7. Grès de Gurten observé au microscope optique à lumière transmise avec analyseur (à gauche : couleurs naturelles) et avec analyseur et polariseur croisés à 90° (à droite : teintes de biréfringence). Hauteur des images : 2,7 mm. Qz = quartz, F = feldspath, M = mica, O = amas d'argiles et d'oxy-hydroxydes, C = calcite, G = glauconite

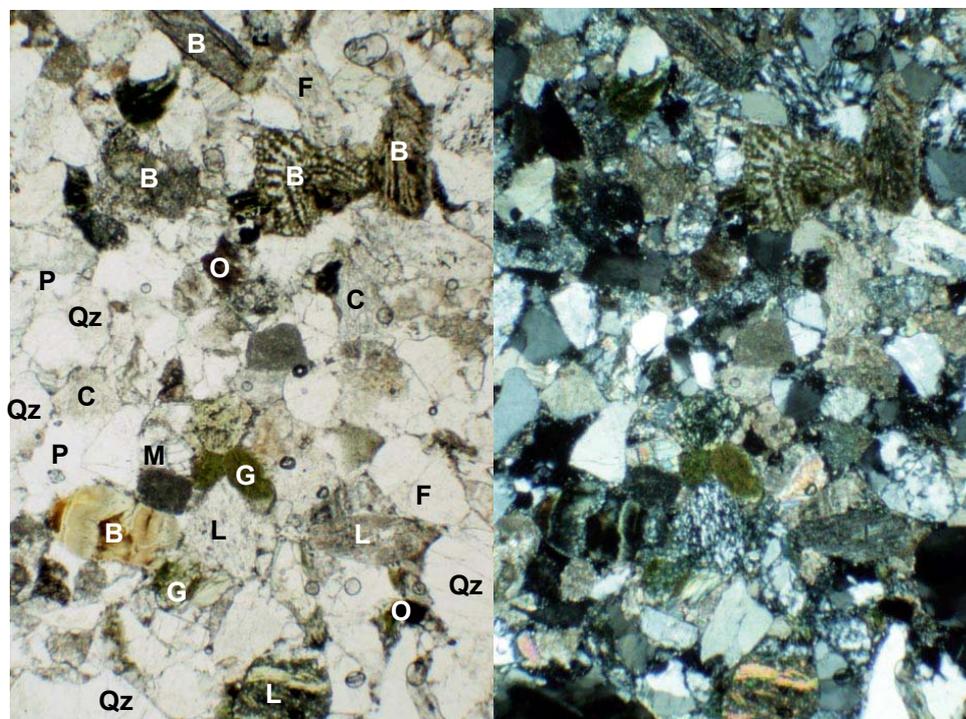


Figure 8. Molasse de Villarlod observée au microscope optique à lumière transmise avec analyseur (à gauche : couleurs naturelles) et avec analyseur et polariseur croisés à 90° (à droite : teintes de biréfringence). Hauteur des images : 2,7 mm. Qz = quartz, F = feldspath, M = mica, O = amas d'argiles et d'oxy-hydroxydes, C = calcite, G = glauconite, B = bioclaste, L = lithoclaste, P = pore

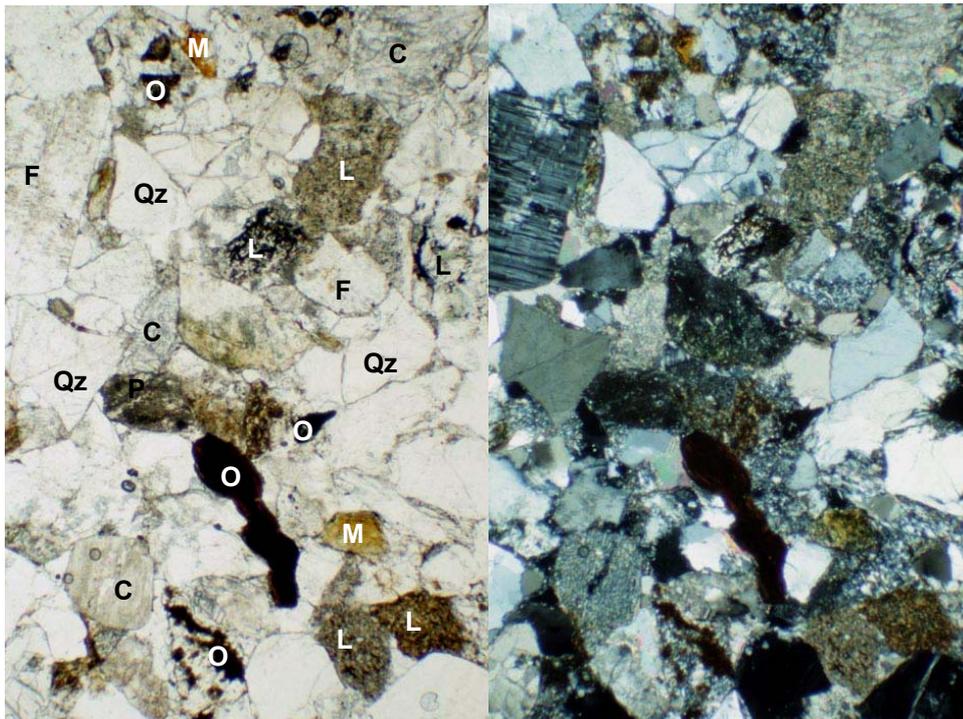


Figure 9. Molasse de la Mercerie observée au microscope optique à lumière transmise avec analyseur (à gauche : couleurs naturelles) et avec analyseur et polariseur croisés à 90° (à droite : teintes de biréfringence). Hauteur des images : 2,7 mm. Qz = quartz, F = feldspath, M = mica, O = amas d'argiles et d'oxy-hydroxydes, C = calcite, L = lithoclaste.

3.1.5 Molasse de la Mercerie (Cathédrale de Lausanne, VDMe)

La molasse de la Mercerie - ou molasse grise de Lausanne - est une molasse aquitanaïenne (20-24 Ma, ère tertiaire, époque du miocène). Il s'agit d'un grès feldspathique à ciment calcaire gris-bleu ou gris-jaunâtre, déposé en milieu lacustre, sous forme de sable et de marne, en bordure nord des Alpes lors de leur plissement et après le retrait de la mer dans laquelle se sont déposées les molasses burdigaliennes. Cette molasse a été extraite du lieu dit La Mercerie en ville de Lausanne. Elle est essentiellement composée de quartz, de feldspaths, de lithoclastes et de bioclastes, d'argiles et de micas, le tout étant cimenté par une phase calcitique (cf. figure 9). Cette molasse est de manière générale beaucoup moins homogène que les molasses marines burdigaliennes. Cette hétérogénéité, caractérisée par l'alternance de strates de granulométries plus ou moins grossières, s'observe très bien dans les échantillons à disposition.

3.2 Échantillons à disposition

La caractérisation des matériaux a été faite sur des cubes de 4 cm d'arête, tandis que les mesures avec les appareils MOIST 200B® et COMBO 200® ont été effectuées sur des cubes de 15 cm d'arête. D'autre part, des prismes de base carrée de 15 cm de côté et de diverses hauteurs ainsi que du sable grossier des pierres sélectionnées ont été fournis afin de simuler des altérations en plaques caractérisées par des fissures parallèles à la surface externe à des profondeurs de 1, 2.5, 4 et 6 cm, vides ou plus ou moins remplies de pierre désagrégée.

Le nombre et le type des échantillons fournis pour chaque matériau sont reportés dans le tableau 1.

Échantillons à disposition	BS Maintal	BS Wiesental	BE Gurten	FR Villarlod	VD Mercerie
Prismes (cm)					
4x4x4	10	18	21	20	14
15x15x15	6	13	10	10	9
15x15x1	-	2	1	1	1
15x15x2.5	-	1	1	1	1
15x15x4	-	1	1	1	1
15x15x6	-	1	1	1	1
15x15x9	-	1	1	1	1
15x15x11	-	1	1	1	1
15x15x12.5	-	1	1	1	1
15x15x14	-	1	1	1	2
Sable grossier	-	≈ 1 kg	≈ 1 kg	≈ 1 kg	≈ 1 kg

Tableau 1. Nombre et type des échantillons fournis par les 4 cathédrales.

3.3 Mesures pétrophysiques effectuées sur ces matériaux

Afin de caractériser les matériaux sélectionnés, nous avons procédé à des mesures :

- de porosité totale par imbibition d'eau sous vide ;
- de cinétiques d'absorption capillaire de l'eau, de l'alcool et du consolidant ;
- d'adsorption de vapeur d'eau.

Les méthodes utilisées sont détaillées en annexe 2. Les résultats sont exposés ci-après.

3.3.1 Porosité totale mesurée par imbibition d'eau sous vide

Les mesures de la porosité totale ont été faites sur tous les cubes de 4 cm d'arête fournis. Les moyennes obtenues pour l'ensemble des cubes de chaque faciès sont reportées dans le tableau 2.

Ayant identifié deux sous faciès parmi les échantillons de grès de Wiesental (Wiesental "homogène" et "hétérogène") ainsi que dans les échantillons de molasse de la Mercerie (Mercerie "grossier" et "fin"), nous avons séparé les valeurs représentatives de ces sous faciès respectivement dans les tableaux 3 et 4.

Porosité totale	Nb d'éch.	Moyenne (%)	Écart type (%)	Min. (%)	Max. (%)
BS / Maintal	10	15.8	0.2	15.4	16.0
BS / Wiesental	18	19.6	3.2	13.8	23.1
BE / Gurten	21	16.2	0.2	15.9	16.6
FR / Villarlod	20	15.8	0.2	15.6	16.0
VD / Mercerie	14	11.5	1.8	8.6	12.9

Tableau 2. Moyennes des porosités totales mesurées sur l'ensemble des cubes de 4 cm d'arête.

Porosité totale	Nb d'éch.	Moyenne (%)	Écart type (%)	Min. (%)	Max. (%)
BS / Wiesental "homogène"	7	22.7	0.3	22.4	23.1
BS / Wiesental "hétérogène"	11	17.6	2.6	13.8	21.2

Tableau 3. Moyennes des porosités totales mesurées sur les deux sous faciès identifiés dans les échantillons de grès de Wiesental (BS). Mesures effectuées sur des cubes de 4 cm d'arête.

Porosité totale	Nb d'éch.	Moyenne (%)	Écart type (%)	Min. (%)	Max. (%)
VD / Mercerie "grossier"	10	12.6	0.4	11.6	12.9
VD / Mercerie "fin"	4	8.9	0.5	8.6	9.6

Tableau 4. Moyennes des porosités totales mesurées sur les deux sous faciès identifiés dans les échantillons de molasse de la Mercerie (VD). Mesures effectuées sur des cubes de 4 cm d'arête.

3.3.2 Cinétiques d'absorption et porosité capillaires

Dans un premier temps, les propriétés capillaires des différentes roches sélectionnées ont été évaluées avec de l'eau déminéralisée, sur les échantillons cubiques de 4 cm d'arête.

Afin de comparer l'affinité des pierres pour l'eau, l'alcool et le consolidant, quelques uns des cubes testés avec de l'eau ont été choisis pour subir les mêmes mesures avec de l'alcool puis avec le consolidant.

Ensuite, des imbibitions capillaires à l'eau ont été effectuées sur quelques cubes de 15 cm d'arête afin de vérifier que les mesures faites sur les cubes de 4 cm d'arête peuvent représenter les caractéristiques d'échantillons plus grands. Puis une simulation de consolidation à l'aide d'un pinceau a été effectuée sur les grands cubes. La cinétique de prise de poids a été suivie et les résultats sont reportés au § 3.3.2.3.

L'ensemble des mesures est résumé dans la figure 10 et les résultats sont comparés dans le § 3.3.2.4.

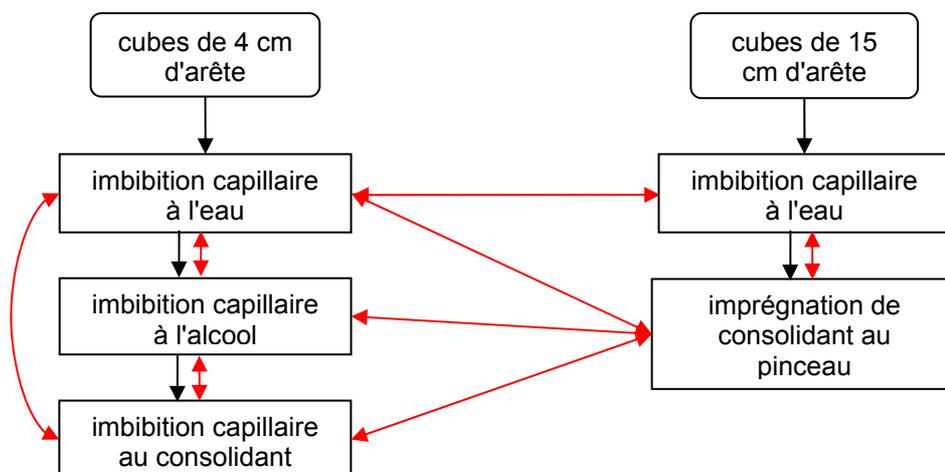


Figure 10. Schéma résumant les différentes imbibitions capillaires qui ont été faites. Flèches rouges = comparaison des résultats correspondants.

3.3.2.1 Absorption capillaire de l'eau (cubes de 4 et 15 cm d'arête)

Absorption capillaire de l'eau						
BS Maintal	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{0c} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	10	10	10	10	3	3
Moyenne	29.8	0.355	9.5	60.4	31.3	0.364
Ecart type	1.3	0.015	0.0	0.7	0.9	0.008
Minimum	27.5	0.333	9.5	59.3	30.8	0.356
Maximum	31.3	0.373	9.6	61.6	32.3	0.371

Tableau 5. Résultats des imbibitions capillaires à l'eau effectuées sur les cubes de 4 et 15 cm d'arête de grès de Maintal. A : coefficient de capillarité massique ; B : coefficient de capillarité linéaire ; P_{0c} : porosité capillaire = volume poreux occupé par de l'eau à la fin de l'imbibition capillaire rapporté au volume total de l'échantillon ; S : coefficient d'Hirschwald ou de saturation capillaire = P_{0c}/P_{0t} x100 où P_{0t} = porosité totale = volume poreux rapporté au volume total de l'échantillon.

Absorption capillaire de l'eau						
BS Wiesental homogène	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{0c} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	7	7	7	7	-	-
Moyenne	102.2	0.781	14.5	64.0	-	-
Ecart type	9.6	0.062	0.2	0.4	-	-
Minimum	92.6	0.720	14.2	63.3	-	-
Maximum	120.4	0.892	14.9	64.4	-	-

Tableau 6. Résultats des imbibitions capillaires à l'eau effectuées sur les cubes de 4 cm d'arête du faciès homogène de grès de Wiesental.

Absorption capillaire de l'eau						
BS Wiesental hétérogène	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{0c} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	11	11	11	11	5	5
Moyenne	20.1	0.245	12.3	71.2	26.0	0.227
Ecart type	7.7	0.092	0.5	8.2	5.3	0.042
Minimum	12.6	0.123	11.4	61.2	20.9	0.178
Maximum	39.9	0.398	13.0	87.7	34.6	0.294

Tableau 7. Résultats des imbibitions capillaires à l'eau effectuées sur les cubes de 4 et 15 cm d'arête du faciès hétérogène de grès de Wiesental. L'hétérogénéité se traduit parfois par plusieurs cinétiques capillaires successives représentant chacune une strate de propriétés capillaires différentes des voisines. Pour plus de clareté, ces cinétiques successives ont toutes été moyennées.

Absorption capillaire de l'eau						
BE Gurten	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	15	15	15	15	4	4
Moyenne	26.8	0.247	11.0	67.7	28.9	0.284
Ecart type	0.8	0.009	0.2	0.8	3.9	0.028
Minimum	25.6	0.234	10.7	65.7	26.6	0.261
Maximum	28.5	0.271	11.3	68.7	34.8	0.324

Tableau 8. Résultats des imbibitions capillaires à l'eau effectuées sur les cubes de 4 et 15 cm d'arête de grès de Gurten.

Absorption capillaire de l'eau						
FR Villarlod	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	12	12	12	12	3	3
Moyenne	34.7	0.298	11.1	70.6	31.1	0.291
Ecart type	1.5	0.012	0.2	1.0	4.3	0.035
Minimum	32.3	0.279	10.6	67.5	26.7	0.255
Maximum	37.3	0.323	11.3	71.3	35.3	0.325

Tableau 9. Résultats des imbibitions capillaires à l'eau effectuées sur les cubes de 4 et de 15 cm d'arête de molasse de Villarlod.

Absorption capillaire de l'eau						
VD Mercerie grossier	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	10	10	10	10	-	-
Moyenne	28.4	0.361	8.0	64.1	-	-
Ecart type	1.8	0.026	0.2	1.1	-	-
Minimum	24.0	0.314	7.7	62.9	-	-
Maximum	29.8	0.400	8.3	66.7	-	-

Tableau 10. Résultats des imbibitions capillaires à l'eau effectuées sur les cubes de 4 cm d'arête du faciès grossier de molasse de la Mercerie.

Absorption capillaire de l'eau						
VD Mercerie fin	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{0c} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	4	4	4	4	-	-
Moyenne	13.6	0.204	6.4	72.3	-	-
Ecart type	3.0	0.045	0.1	4.5	-	-
Minimum	11.4	0.171	6.3	65.6	-	-
Maximum	18.0	0.269	6.6	74.8	-	-

Tableau 11. Résultats des imbibitions capillaires à l'eau effectuées sur les cubes de 4 cm d'arête du faciès fin de molasse de la Mercerie.

Absorption capillaire de l'eau						
VD Mercerie fin et grossier	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{0c} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	-	-	-	-	3	3
Moyenne	-	-	-	-	19.1	0.250
Ecart type	-	-	-	-	3.4	0.060
Minimum	-	-	-	-	15.2	0.182
Maximum	-	-	-	-	21.4	0.296

Tableau 12. Résultats des imbibitions capillaires à l'eau effectuées sur les cubes de 15 cm d'arête de molasse de la Mercerie, faciès fin et grossier confondus.

3.3.2.2 Absorption capillaire de l'alcool (cubes de 4 et 15 cm d'arête)

Absorption capillaire de l'alcool						
BS Maintal	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{0c} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	5	5	5	5	-	-
Moyenne	20.3	0.249	9.4	59.9	-	-
Ecart type	0.8	0.006	0.1	0.6	-	-
Minimum	19.5	0.238	9.2	59.1	-	-
Maximum	21.5	0.255	9.6	60.8	-	-

Tableau 13. Résultats des imbibitions capillaires à l'alcool effectuées sur les cubes de 4 cm d'arête du grès de Maintal.

Absorption capillaire de l'alcool						
BS Wiesental homogène	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	4	4	4	4	-	-
Moyenne	57.5	0.496	14.7	64.7	-	-
Ecart type	3.3	0.017	0.2	0.3	-	-
Minimum	53.5	0.471	14.4	64.4	-	-
Maximum	61.3	0.509	15.0	65.0	-	-

Tableau 14. Résultats des imbibitions capillaires à l'alcool effectuées sur les cubes de 4 cm d'arête du faciès homogène du grès de Wiesental.

Absorption capillaire de l'alcool						
BS Wiesental hétérogène	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	5	5	5	5	-	-
Moyenne	23.4	0.243	12.0	64.9	-	-
Ecart type	12.0	0.107	1.5	8.2	-	-
Minimum	7.8	0.088	9.8	58.0	-	-
Maximum	35.9	0.356	13.2	79.1	-	-

Tableau 15. Résultats des imbibitions capillaires à l'alcool effectuées sur les cubes de 4 cm d'arête du faciès hétérogène du grès de Wiesental.

Absorption capillaire de l'alcool						
BE Gurten	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	5	5	5	5	-	-
Moyenne	21.9	0.214	11.1	68.5	-	-
Ecart type	0.5	0.013	0.1	0.3	-	-
Minimum	21.2	0.198	11.0	68.1	-	-
Maximum	22.6	0.231	11.4	69.0	-	-

Tableau 16. Résultats des imbibitions capillaires à l'alcool effectuées sur les cubes de 4 cm d'arête du grès de Gurten.

Absorption capillaire de l'alcool						
FR Villarlod	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	5	5	5	5	-	-
Moyenne	28.3	0.265	11.1	70.2	-	-
Ecart type	1.8	0.013	0.1	0.5	-	-
Minimum	26.1	0.255	10.9	69.6	-	-
Maximum	30.0	0.287	11.2	70.8	-	-

Tableau 17. Résultats des imbibitions capillaires à l'alcool effectuées sur les cubes de 4 cm d'arête de la molasse de Villarlod.

Absorption capillaire de l'alcool						
VD Mercerie grossier	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	4	4	4	4	-	-
Moyenne	21.4	0.295	7.9	63.1	-	-
Ecart type	1.2	0.010	0.3	0.6	-	-
Minimum	19.7	0.282	7.4	62.6	-	-
Maximum	22.4	0.305	8.1	64.0	-	-

Tableau 18. Résultats des imbibitions capillaires à l'alcool effectuées sur les cubes de 4 cm d'arête du faciès grossier de la molasse de la Mercerie.

Absorption capillaire de l'alcool						
VD Mercerie fin	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P ₀ c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	2	2	2	2	-	-
Moyenne	10.5	0.137	6.3	72.4	-	-
Ecart type	0.4	0.005	0.1	0.5	-	-
Minimum	10.3	0.133	6.2	72.0	-	-
Maximum	10.8	0.140	6.3	72.8	-	-

Tableau 19. Résultats des imbibitions capillaires à l'alcool effectuées sur les cubes de 4 cm d'arête du faciès fin de la molasse de la Mercerie.

3.3.2.3 Absorption capillaire du consolidant (cubes de 4 et 15 cm d'arête)

Absorption capillaire du consolidant						
BS Maintal	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{oc} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	5	5	5	5	3	3
Moyenne	19.3	0.227	9.2	58.5	13.6	0.156
Ecart type	0.6	0.003	0.2	0.2	0.6	0.011
Minimum	18.3	0.224	9.0	58.1	12.9	0.144
Maximum	20.0	0.229	9.4	58.7	14.2	0.164

Tableau 20. Résultats des imbibitions capillaires du consolidant effectuées sur les cubes de 4 cm d'arête et des imprégnations de consolidant effectuées au pinceau sur des cubes de 15 cm d'arête du grès de Maintal.

Absorption capillaire du consolidant						
BS Wiesental homogène	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{oc} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	4	4	7	7	-	-
Moyenne	55.4	0.416	14.5	63.5	-	-
Ecart type	3.8	0.025	0.4	1.1	-	-
Minimum	51.5	0.394	13.9	61.9	-	-
Maximum	59.7	0.446	14.9	64.5	-	-

Tableau 21. Résultats des imbibitions capillaires du consolidant effectuées sur les cubes de 4 cm d'arête du faciès homogène du grès de Wiesental.

Absorption capillaire du consolidant						
BS Wiesental hétérogène	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{oc} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	5	5	11	11	-	-
Moyenne	19.6	0.188	13.3	63.0	-	-
Ecart type	11.5	0.086	0.1	0.6	-	-
Minimum	8.4	0.093	13.2	62.5	-	-
Maximum	36.4	0.306	13.4	63.4	-	-

Tableau 22. Résultats des imbibitions capillaires du consolidant effectuées sur les cubes de 4 cm d'arête du faciès hétérogène du grès de Wiesental. L'hétérogénéité se traduit parfois par plusieurs cinétiques capillaires successives représentant chacune une strate de propriétés capillaires différentes des voisines. Pour plus de clareté, ces cinétiques successives ont toutes été moyennées.

Absorption capillaire du consolidant						
BS Wiesental homo- et hétérogène	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{0c} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	-	-	-	-	3	3
Moyenne	-	-	-	-	11.9	0.116
Ecart type	-	-	-	-	1.5	0.016
Minimum	-	-	-	-	11.0	0.097
Maximum	-	-	-	-	13.7	0.126

Tableau 23. Résultats des imprégnations de consolidant effectuées au pinceau sur des cubes de 15 cm d'arête du grès de Wiesental, faciès homo- et hétérogène confondus.

Absorption capillaire du consolidant						
BE Gurten	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{0c} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	5	5	5	5	3	3
Moyenne	24.6	0.191	10.4	63.6	13.7	0.165
Ecart type	0.9	0.005	0.1	0.3	2.5	0.039
Minimum	23.6	0.185	10.3	63.3	11.9	0.123
Maximum	26.0	0.199	10.6	64.0	16.5	0.199

Tableau 24. Résultats des imbibitions capillaires du consolidant effectuées sur les cubes de 4 cm d'arête et des imprégnations de consolidant effectuées au pinceau sur des cubes de 15 cm d'arête du grès de Gurten.

Absorption capillaire du consolidant						
FR Villarlod	4x4x4 cm				15x15x15	
	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _{0c} %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	5	5	5	5	3	3
Moyenne	29.0	0.269	10.5	66.7	17.5	0.200
Ecart type	1.9	0.015	0.2	0.4	2.5	0.007
Minimum	27.1	0.246	10.3	65.9	15.5	0.192
Maximum	31.4	0.284	10.7	67.0	20.3	0.205

Tableau 25. Résultats des imbibitions capillaires du consolidant effectuées sur les cubes de 4 cm d'arête et des imprégnations de consolidant effectuées au pinceau sur des cubes de 15 cm d'arête de la molasse de Villarlod.

Absorption capillaire du consolidant						
VD	4x4x4 cm				15x15x15	
Mercurie grossier	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _o c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	4	4	4	4	-	-
Moyenne	21.5	0.306	7.5	59.7	-	-
Ecart type	1.1	0.006	0.4	0.3	-	-
Minimum	19.9	0.299	6.9	59.5	-	-
Maximum	22.4	0.312	7.8	60.1	-	-

Tableau 26. Résultats des imbibitions capillaires du consolidant effectuées sur les cubes de 4 cm d'arête du faciès grossier de la molasse de la Mercurie.

Absorption capillaire du consolidant						
VD	4x4x4 cm				15x15x15	
Mercurie fin	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _o c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	2	2	2	2	-	-
Moyenne	10.3	0.187	5.9	67.8	-	-
Ecart type	0.4	0.007	0.0	1.0	-	-
Minimum	10.0	0.182	5.9	67.1	-	-
Maximum	10.6	0.192	5.9	68.5	-	-

Tableau 27. Résultats des imbibitions capillaires du consolidant effectuées sur des cubes de 4 cm d'arête du faciès fin de la molasse de la Mercurie.

Absorption capillaire du consolidant						
VD	4x4x4 cm				15x15x15	
Mercurie fin et grossier	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}	P _o c %	S %	A mg/cm ² .min ^{1/2}	B cm/min ^{1/2}
Nb d'éch.	-	-	-	-	3	3
Moyenne	-	-	-	-	10.7	0.163
Ecart type	-	-	-	-	0.7	0.022
Minimum	-	-	-	-	9.9	0.138
Maximum	-	-	-	-	11.2	0.180

Tableau 28. Résultats des imprégnations de consolidant effectuées au pinceau sur des cubes de 15 cm d'arête de la molasse de la Mercurie, faciès grossier et fin confondus.

3.3.2.4 Tableaux et graphiques récapitulatifs et comparatifs

cubes 4x4x4	Porosité capillaire P_{oc} (%)			Coeff. de saturation S (%)		
	eau	alcool	consol.	eau	alcool	consol.
BS Maintal	9.5	9.4	9.2	60.4	59.9	58.5
BS Wiesental hom.	14.5	14.7	14.5	64.0	64.7	63.5
BS Wiesental hét.	12.3	12.0	13.3	71.2	64.9	63.0
BE Gurten	11.0	11.1	10.4	67.7	68.5	63.6
FR Villarlod	11.1	11.1	10.5	70.6	70.2	66.7
VD Mercerie gros.	8.0	7.9	7.5	64.1	63.1	59.7
VD Mercerie fin	6.4	6.3	5.9	72.3	72.4	67.8

Tableau 29. Comparaison des porosités capillaires (P_{oc}) et des coefficients de saturation capillaire (S) obtenus par imbibition capillaire de l'eau, de l'alcool et du consolidant sur les cubes de 4 cm d'arête pour les différentes pierres testées.

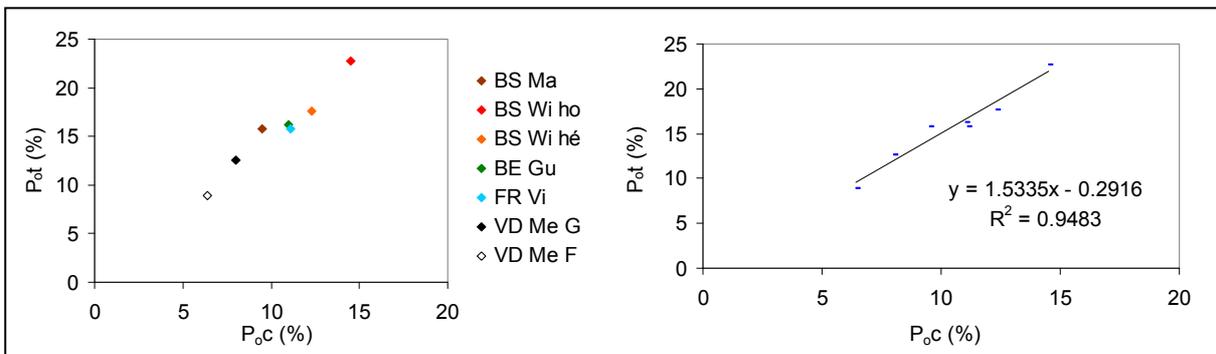


Figure 11. Corrélation entre la porosité totale moyenne (P_{ot}) et la porosité capillaire moyenne à l'eau (P_{oc}) pour le grès de Maintal (BS Ma), le grès de Wiesental homogène (BS Wi ho) et hétérogène (BS Wi hé), le grès de Gurten (BE Gu), la molasse de Villarlod (FR Vi) et la molasse de la Mercerie grossière (VD Me G) et fine (VD Me F)

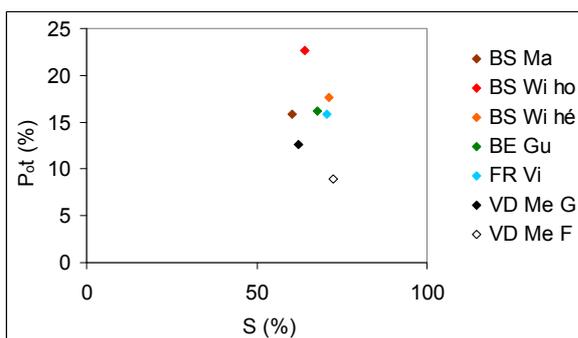


Figure 12. Corrélation entre la porosité totale moyenne (P_{ot}) et le coefficient de saturation capillaire moyen à l'eau (S) pour le grès de Maintal (BS Ma), le grès de Wiesental homogène (BS Wi ho) et hétérogène (BS Wi hé), le grès de Gurten (BE Gu), la molasse de Villarlod (FR Vi) et la molasse de la Mercerie grossière (VD Me G) et fine (VD Me F)

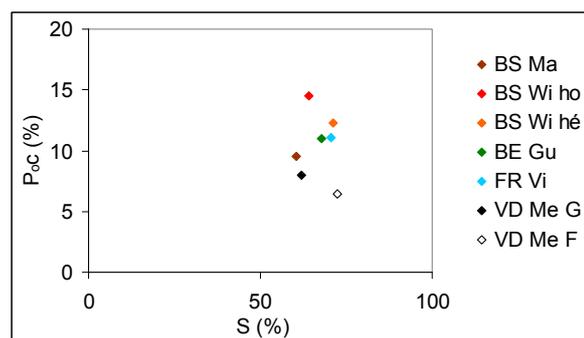


Figure 13. Corrélation entre le coefficient de saturation capillaire moyen à l'eau (S) et la porosité capillaire moyenne à l'eau (P_{oc}) pour le grès de Maintal (BS Ma), le grès de Wiesental homogène (BS Wi ho) et hétérogène (BS Wi hé), le grès de Gurten (BE Gu), la molasse de Villarlod (FR Vi) et la molasse de la Mercerie grossière (VD Me G) et fine (VD Me F)

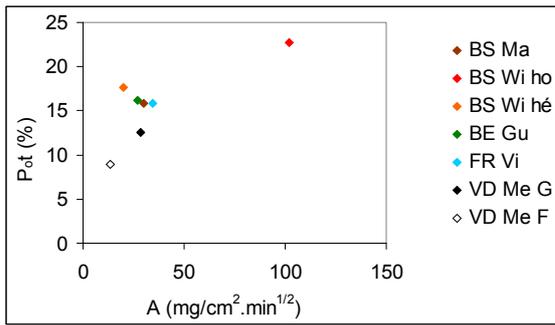


Figure 14. Corrélation entre la porosité totale moyenne (P_{ot}) et le coefficient capillaire massique moyen à l'eau (A) pour le grès de Maintal (BS Ma), le grès de Wiesental homogène (BS Wi ho) et hétérogène (BS Wi hé), le grès de Gurten (BE Gu), la molasse de Villarlod (FR Vi) et la molasse de la Mercerie grossière (VD Me G) et fine (VD Me F)

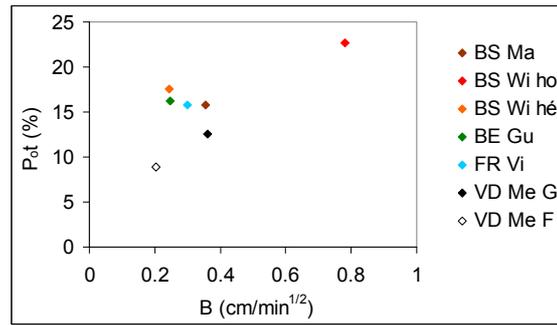


Figure 15. Corrélation entre la porosité totale moyenne (P_{ot}) et le coefficient capillaire linéaire moyen à l'eau (B) pour le grès de Maintal (BS Ma), le grès de Wiesental homogène (BS Wi ho) et hétérogène (BS Wi hé), le grès de Gurten (BE Gu), la molasse de Villarlod (FR Vi) et la molasse de la Mercerie grossière (VD Me G) et fine (VD Me F)

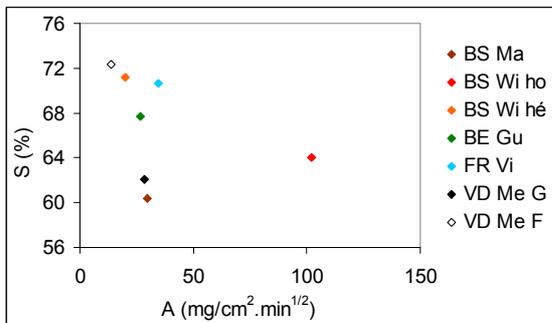


Figure 16. Corrélation entre la saturation capillaire (S) et le coefficient capillaire massique moyen à l'eau (A) pour le grès de Maintal (BS Ma), le grès de Wiesental homogène (BS Wi ho) et hétérogène (BS Wi hé), le grès de Gurten (BE Gu), la molasse de Villarlod (FR Vi) et la molasse de la Mercerie grossière (VD Me G) et fine (VD Me F)

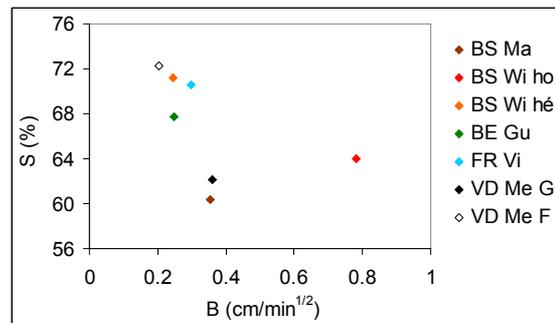


Figure 17. Corrélation entre la saturation capillaire (S) et le coefficient capillaire linéaire moyen à l'eau (B) pour le grès de Maintal (BS Ma), le grès de Wiesental homogène (BS Wi ho) et hétérogène (BS Wi hé), le grès de Gurten (BE Gu), la molasse de Villarlod (FR Vi) et la molasse de la Mercerie grossière (VD Me G) et fine (VD Me F)

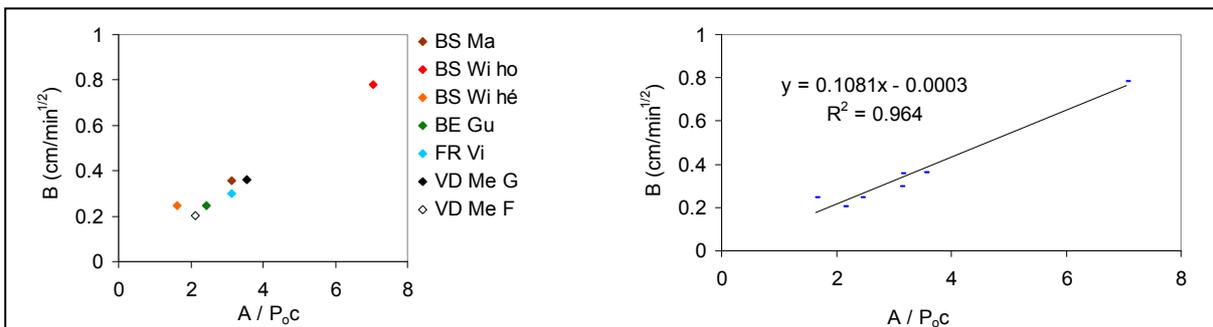


Figure 18. Imbibition capillaire de l'eau : corrélation entre le coefficient capillaire linéaire moyen (B) et le coefficient capillaire massique moyen corrigé de la porosité capillaire (A/P_{oc}) pour le grès de Maintal (BS Ma), le grès de Wiesental homogène (BS Wi ho) et hétérogène (BS Wi hé), le grès de Gurten (BE Gu), la molasse de Villarlod (FR Vi) et la molasse de la Mercerie grossière (VD Me G) et fine (VD Me F)

Coef. capillaire A (mg/cm ² .min ^{1/2})	eau / imbib.		alcool / imbib.	consol. / imbib.	consol. / pinceau
	4x4x4	15x15x15	4x4x4	4x4x4	15x15x15
BS Maintal	29.8	31.3	20.3	19.3	13.6
BS Wiesental hom.	102.2	-	57.5	55.4	-
BS Wiesental hét.	20.1	26.0	23.4	19.6	-
BS Wiesental hom. et hét.	-	-	-	-	11.9
BE Gurten	26.8	29.0	21.9	24.6	13.7
FR Villarlod	34.7	31.1	28.3	29.0	17.5
VD Mercerie gros.	28.4	-	21.4	21.5	-
VD Mercerie fin	13.6	-	10.5	10.3	-
VD Mercerie fin et gros.	-	19.1	-	-	10.7

Tableau 30. Comparaison des coefficients de capillarité massique (A) exprimés en mg/cm².min^{1/2}, obtenus pour les différentes pierres par imbibition capillaire (/imbib.) ou par application au pinceau (/pinceau) avec l'eau, l'alcool ou le consolidant (consol.), sur des cubes de 4 (4x4x4) ou 15 cm d'arête (15x15x15).

Coef. capillaire A' (l/m ² .h ^{1/2})	eau / imbib.		alcool / imbib.	consol. / imbib.	consol. / pinceau
	4x4x4	15x15x15	4x4x4	4x4x4	15x15x15
BS Maintal	2.31	2.43	1.27	1.49	1.05
BS Wiesental hom.	7.92	-	3.61	4.28	-
BS Wiesental hét.	1.56	2.01	1.47	1.51	-
BS Wiesental hom. et hét.	-	-	-	-	0.92
BE Gurten	2.08	2.24	1.37	1.90	1.06
FR Villarlod	2.69	2.41	1.77	1.24	1.35
VD Mercerie gros.	2.20	-	1.34	1.66	-
VD Mercerie fin	1.05	-	0.66	0.79	-
VD Mercerie fin et gros.	-	1.48	-	-	0.82

Tableau 31. Comparaison des coefficients de capillarité volumique (A') exprimés en l/m².h^{1/2}, obtenus pour les différentes pierres par imbibition capillaire (/imbib.) ou par application au pinceau (/pinceau) avec l'eau, l'alcool ou le consolidant (consol.), sur des cubes de 4 (4x4x4) ou 15 cm d'arête (15x15x15).

Coef. capillaire B (cm/min ^{1/2})	eau / imbib.		alcool / imbib.	consol. / imbib.	consol. / pinceau
	4x4x4	15x15x15	4x4x4	4x4x4	15x15x15
BS Maintal	0.355	0.364	0.249	0.227	0.156
BS Wiesental hom.	0.781	-	0.496	0.416	-
BS Wiesental hét.	0.245	0.227	0.243	0.188	-
BS Wiesental hom. et hét.	-	-	-	-	0.116
BE Gurten	0.247	0.284	0.214	0.191	0.165
FR Villarlod	0.298	0.291	0.265	0.269	0.200
VD Mercerie gros.	0.361	-	0.295	0.306	-
VD Mercerie fin	0.204	-	0.137	0.187	-
VD Mercerie fin et gros.	-	0.250	-	-	0.163

Tableau 32. Comparaison des coefficients de capillarité linéaire (B) exprimés en cm/min^{1/2}, obtenus pour les différentes pierres par imbibition capillaire (/imbib.) ou par application au pinceau (/pinceau) avec l'eau, l'alcool ou le consolidant (consol.), sur des cubes de 4 (4x4x4) ou 15 cm d'arête (15x15x15).

Coef. capillaire B (cm/h ^{1/2})	eau / imbib.		alcool / imbib.	consol. / imbib.	consol. / pinceau
	4x4x4	15x15x15	4x4x4	4x4x4	15x15x15
BS Maintal	2.8	2.8	1.9	1.8	1.2
BS Wiesental hom.	6.0	-	3.8	3.2	-
BS Wiesental hét.	1.9	1.8	1.4	1.3	-
BS Wiesental hom. et hét.	-	-	-	-	0.9
BE Gurten	1.9	2.2	1.7	1.5	1.3
FR Villarlod	2.3	2.3	2.1	2.1	1.6
VD Mercerie gros.	2.8	-	2.3	2.4	-
VD Mercerie fin	1.6	-	1.1	1.5	-
VD Mercerie fin et gros.	-	1.9	-	-	1.3

Tableau 33. Comparaison des coefficients de capillarité linéaire (B) exprimés en cm/h^{1/2}, obtenus pour les différentes pierres par imbibition capillaire (/imbib.) ou par application au pinceau (/pinceau) avec l'eau, l'alcool ou le consolidant (consol.), sur des cubes de 4 (4x4x4) ou 15 cm d'arête (15x15x15).

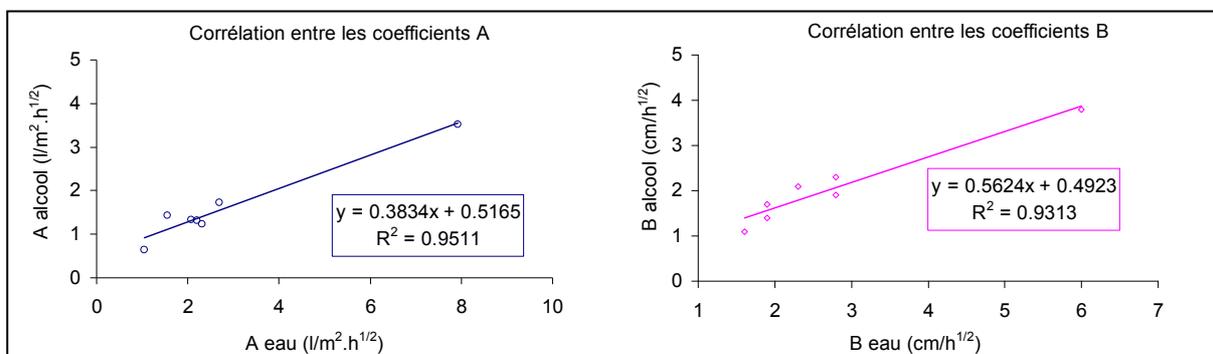


Figure 19. Graphique représentant la corrélation entre les coefficients capillaires massiques (A) et linéaires (B) à l'eau et à l'alcool

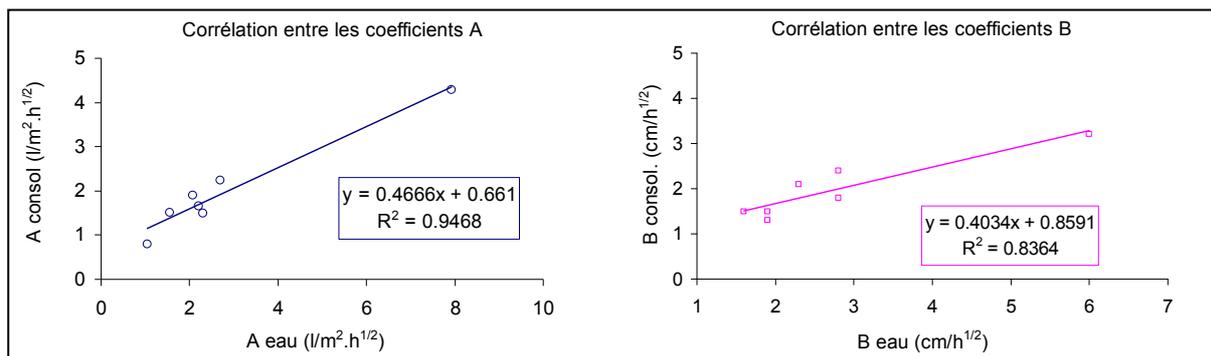


Figure 20. Corrélation entre les coefficients capillaires massiques (A, à gauche) et linéaires (B, à droite) à l'eau et aux consolidants

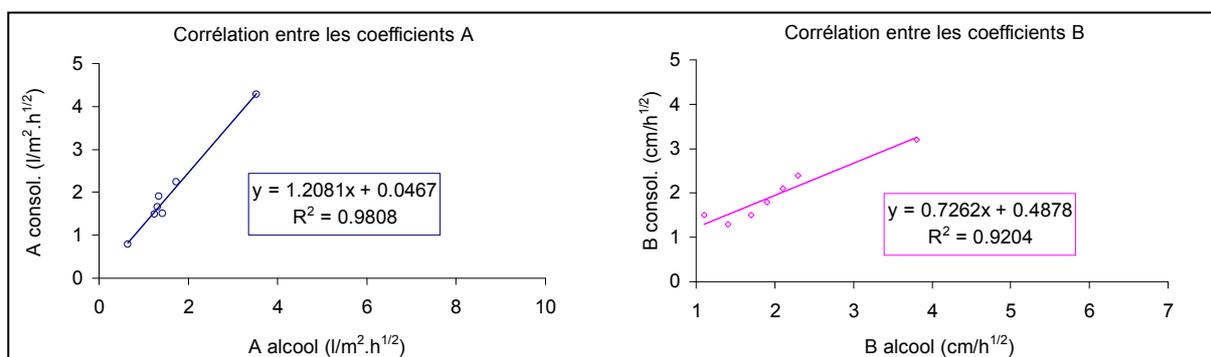


Figure 21. Corrélation entre les coefficients capillaires massiques (A, à gauche) et linéaires (B, à droite) à l'alcool et aux consolidants

3.3.3 Isotherme d'adsorption de vapeur d'eau

Les mesures d'adsorption de vapeur d'eau ont été réalisées sur des cubes de 4 cm d'arête. Un seul faciès a été testé pour le grès de Wiesental et la molasse de la Mercerie : respectivement le faciès homogène et le faciès grossier.

Adsorption de vapeur d'eau sur des cubes de 4 cm d'arête					
$\Delta P_d / P_{d,s} \times 100$ (%)					
HR (%)	33	55	75	86	97
BS Maintal	0.09	0.14	0.22	0.30	0.68
BS Wiesental homogène	0.16	0.25	0.35	0.45	0.84
BE Gurten	0.27	0.40	0.54	0.63	0.97
FR Villarlod	0.32	0.47	0.61	0.74	0.99
VD Mercerie grossier	0.27	0.33	0.42	0.48	0.75

Tableau 34. Résultats des adsorptions de vapeur d'eau effectuées sur des cubes de 4 cm d'arête des différentes pierres testées, exprimés en pourcentage de prise de poids en eau à l'équilibre (ΔP_d) par rapport au poids sec de l'échantillon ($P_{d,s}$). HR = humidité relative.

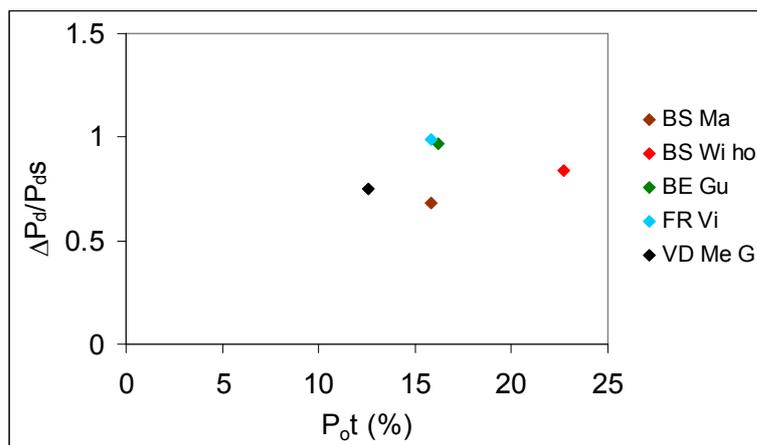


Figure 22. Graphique représentant la corrélation entre l'adsorption de vapeur d'eau à 97% d'humidité relative exprimée en poids d'eau adsorbé rapporté au poids sec de l'échantillon ($\Delta P_d/P_{ds}$) et la porosité totale (P_{0t})

Adsorption de vapeur d'eau sur des cubes de 4 cm d'arête					
Vads / Vvide x 100 (%)					
HR (%)	33	55	75	86	97
BS Maintal	1.3	1.9	3.1	4.2	9.8
BS Wiesental homogène	1.5	2.3	3.2	4.1	7.7
BE Gurten	3.8	5.6	7.5	8.7	13.5
FR Villarlod	4.6	6.8	8.9	10.6	14.4
VD Mercerie grossier	5.1	6.2	7.9	9.0	14.0

Tableau 35. Résultats des adsorptions de vapeur d'eau effectuées sur des cubes de 4 cm d'arête des différentes pierres testées, exprimés en volume de vapeur d'eau adsorbée à l'équilibre (Vads) rapporté au volume poreux total (Vvide) ; HR = humidité relative.

Adsorption de vapeur d'eau sur des cubes de 4 cm d'arête					
Vads / Vcapil x 100 (%)					
HR (%)	33	55	75	86	97
BS Maintal	2.1	3.2	5.2	7.0	16.1
BS Wiesental homogène	2.3	3.5	5.0	6.4	11.9
BE Gurten	5.6	8.3	11.2	13.0	20.5
FR Villarlod	6.5	9.5	12.5	15.1	21.3
VD Mercerie grossier	7.9	9.7	12.4	14.0	21.6

Tableau 36. Résultats des adsorptions de vapeur d'eau effectuées sur des cubes de 4 cm d'arête des différentes pierres testées, exprimés en volume de vapeur d'eau adsorbée à l'équilibre (Vads) rapporté au volume poreux capillaire (Vcapil = volume des vides occupé par de l'eau à la fin d'une imbibition capillaire à l'eau) ; HR = humidité relative

Les données des tableaux 34 et 36 représentées graphiquement sont appelées isothermes d'adsorption. Ces isothermes d'adsorption sont reportées dans les figures 23 à 25. La figure 22 représente la corrélation entre la porosité totale et la quantité d'eau adsorbée dans le réseau poreux.

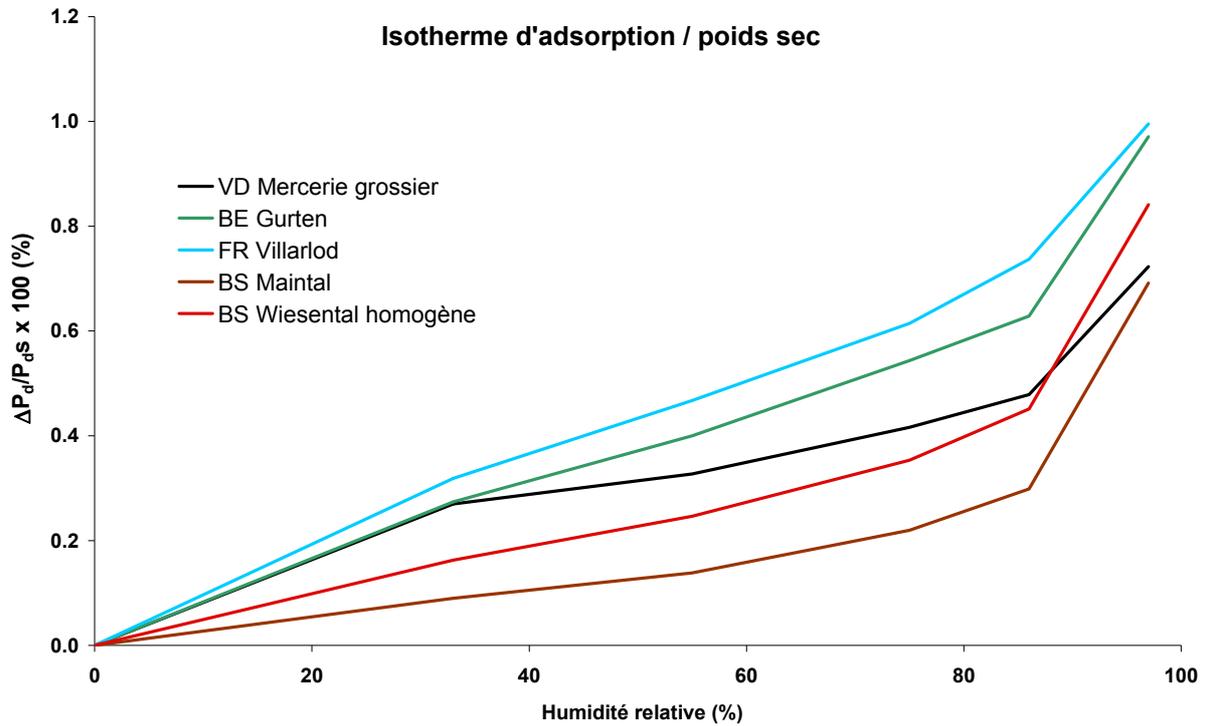


Figure 23. Isotherme d'adsorption représentant le pourcentage de prise de poids en eau à l'équilibre (ΔP_d) par rapport au poids sec de l'échantillon ($P_{d,s}$) pour différentes humidités relatives. Voir les données correspondantes tableau 34.

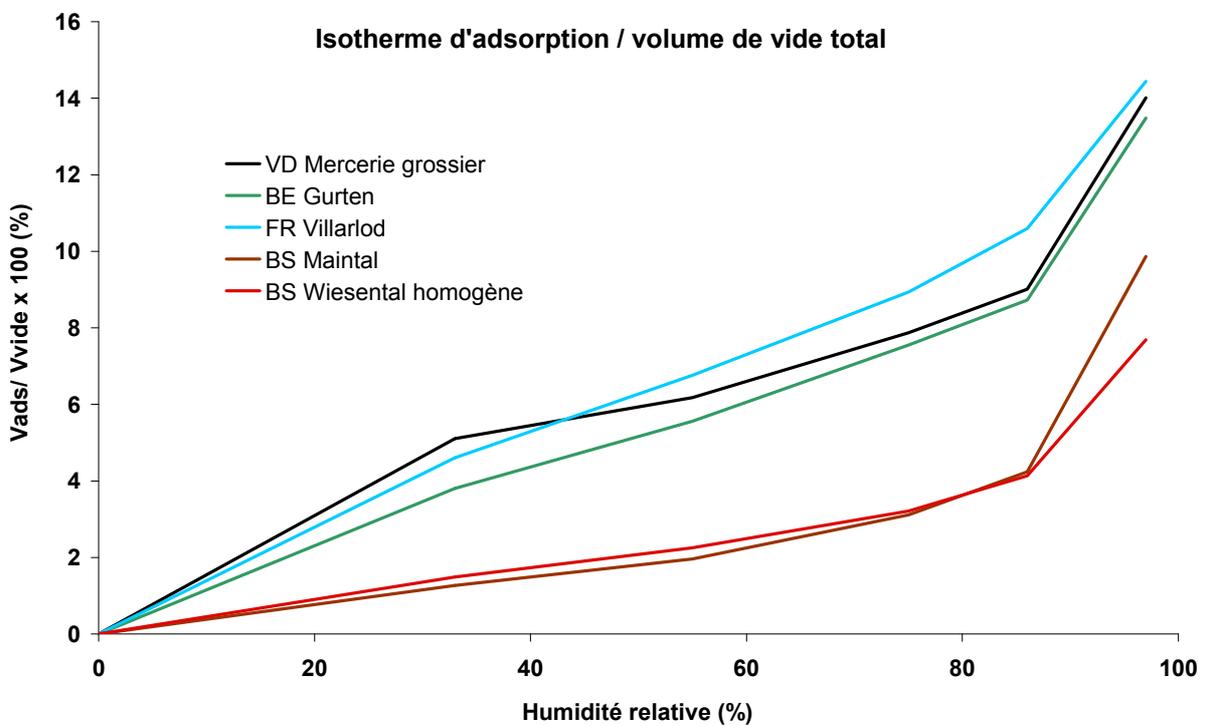


Figure 24. Isotherme d'adsorption représentant le pourcentage du volume poreux total (V_{vide}) occupé par la vapeur d'eau à l'équilibre pour différentes humidités relatives. Voir les données correspondantes tableau 35.

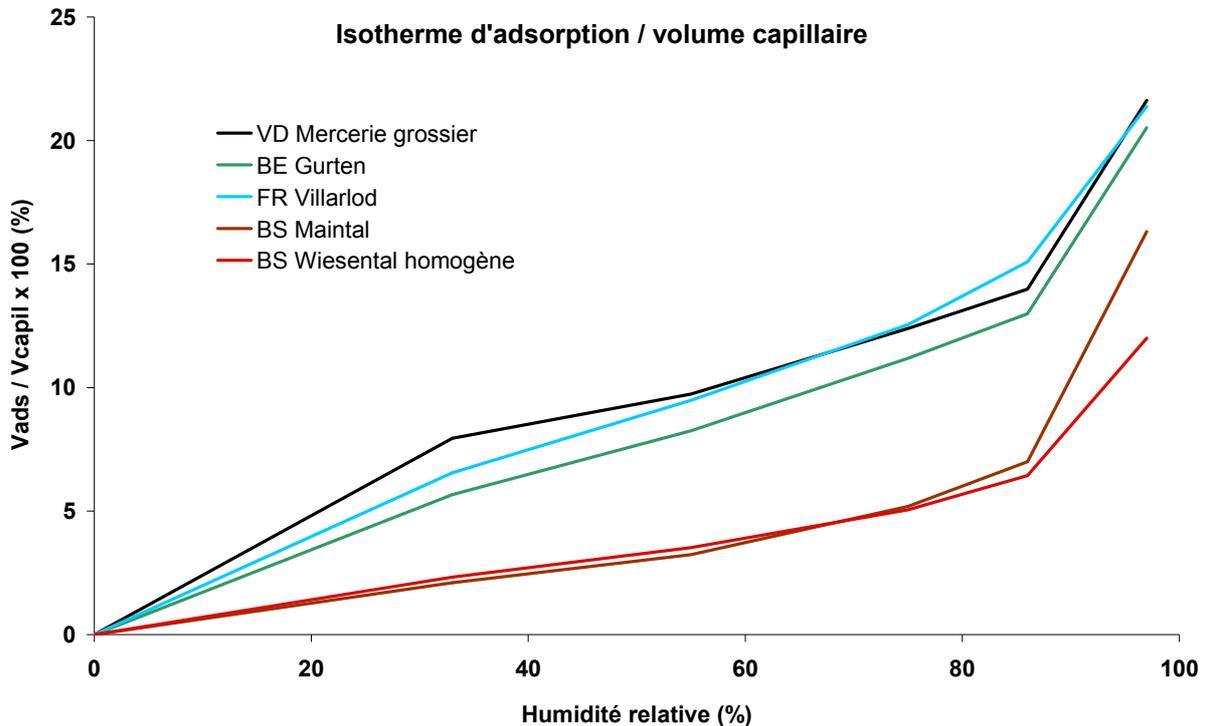


Figure 25. Isotherme d'adsorption représentant le pourcentage du volume poreux capillaire (V_{capil}) occupé par la vapeur d'eau à l'équilibre. Voir les données correspondantes tableau 36.

3.3.4 Interprétations, comparaisons et implications pour la consolidation

3.3.4.1 Porosité totale et propriétés capillaires

Parmi les cinq principaux faciès étudiés, le grès de Gurten, la molasse de Villarlod et le grès de Maintal ont des porosités totales très proches : respectivement 16.2, 15.8 et 15.8%. La pierre la plus poreuse est le grès de Wiesental avec une porosité totale moyenne de 19.6%, tandis que la moins poreuse est la molasse de la Mercerie avec 11.5% (tableau 2, p.15).

Parmi les cinq faciès, le grès de Wiesental et la molasse de la Mercerie sont les plus hétérogènes : dans les échantillons à disposition, deux sous-faciès peuvent être différenciés tant optiquement que grâce aux valeurs de porosité totale. Nous distinguons un faciès homogène ($P_{ot} = 22.7\%$) et un faciès hétérogène ($P_{ot} = 17.6\%$) pour le grès de Wiesental et un faciès grossier ($P_{ot} = 12.6\%$) et un faciès fin ($P_{ot} = 8.9\%$) pour la molasse de la Mercerie (cf. respectivement tableau 3 et tableau 4 p.16).

Comme le montre la figure 11 (p.25), les porosités moyennes totales et les porosités capillaires à l'eau des pierres étudiées sont bien corrélées. Ce qui signifie que - pour les pierres étudiées du moins - le volume vide librement occupé par un fluide mouillant lors d'une imbibition capillaire (P_{oc}) est directement corrélé à la quantité de volume vide total (P_{ot}). Ou autrement dit, pour ces pierres, plus un échantillon est poreux, plus il aura tendance à absorber beaucoup d'eau par capillarité. Cette relation témoigne d'une bonne homogénéité de leur réseau poreux, même pour la molasse de la Mercerie et le grès de Wiesental, pourtant macroscopiquement plus hétérogènes.

Cette homogénéité des échantillons testés est confirmée par la corrélation qui existe entre le coefficient de capillarité linéaire (B) et le coefficient de capillarité massique corrigé de la porosité capillaire (A/P_{0c})⁵ (cf figure 18 p.26).

Les résultats exposés au chapitre 3.3.2.1 illustrent bien le fait qu'il est impossible de remplir totalement le volume poreux d'une pierre avec quelque liquide que ce soit par simple capillarité : les saturations ou coefficients de saturation capillaires (S), ou bien encore les pourcentages du volume poreux total pouvant être occupés par un fluide mouillant après une imbibition capillaire sont tous compris entre 60.4% (pour le grès de Maintal) et 72.3% (pour le faciès fin de la molasse de la Mercerie) (cf. tableau 5 p.17 à tableau 27 p.24 et tableau 29 p.25). Ces valeurs de S impliquent que parmi toutes les pierres testées aucune n'est théoriquement sensible au gel⁶.

La figure 12 et la figure 13 (p.25) montrent que la saturation capillaire, S, est indépendante des valeurs des porosités totale (P_{0t}) et capillaire (P_{0c}). Ces deux grandeurs P_{0t} et P_{0c} étant dépendantes du volume total⁷ de l'échantillon, ce résultat met en évidence le fait que le taux d'occupation du volume de vide par le fluide mouillant en fin d'une imbibition capillaire (S) est indépendante du volume total correspondant.

Les coefficients de capillarité massiques (A) ou linéaires (B) étant principalement liés à la géométrie du réseau poreux (distribution des tailles de pores, tortuosité, connectivité) et à la nature du fluide utilisé pour l'imbibition capillaire (viscosité dynamique, affinité pour le solide, tension superficielle), ils ne sont pas corrélés à la porosité totale (cf. figure 14 et figure 15 p.26). Ces coefficients capillaires ne sont pas non plus corrélés aux coefficients de saturation capillaire S (cf. figure 16 et 17, p.26), parce que la quantité de volume poreux occupé par un fluide en fin d'imbibition capillaire est totalement indépendante de la vitesse de pénétration de ce fluide, que l'on considère la vitesse de pénétration linéaire (B), massique (A) ou volumique (A').

Les données des tableaux 30 et 33 montrent que, pour un même matériau, pour autant que ce matériau soit homogène, les cinétiques d'imbibition capillaires massiques, volumiques ou linéaires obtenues pour des cubes de 4 ou de 15 cm d'arête sont comparables (cf. grès de Maintal, grès de Gurten ou molasse de Villarlod). Ceci implique que pour ces échantillons, le degré de complexité du réseau poreux des pierres correspondantes est quasiment identique sur des volumes de 62 ou de 3375 cm³ et que pour de tels matériaux, les résultats

⁵ Les coefficients A et B ne sont pas directement comparables : le coefficient A intègre - comme le coefficient B - la vitesse de déplacement linéaire du liquide mais aussi le volume poreux accessible au liquide mouillant lors de l'imbibition, c-à-d la porosité capillaire (Fischer, 1993). Pour obtenir la proportionnalité entre les facteurs A et B il faut corriger le coefficient A de la valeur de la porosité capillaire, ce que nous avons fait dans la figure 18, p.26.

⁶ L'expansion volumique de l'eau lors de sa solidification étant de 9%, la saturation critique au-delà de laquelle le gel risque de détériorer un matériau poreux est théoriquement de l'ordre de 90%. Or la structure du réseau poreux a une influence sur la capacité de l'eau capillaire à se déplacer plus ou moins facilement au moment du gel. Ainsi, divers auteurs ont pu montrer expérimentalement que la saturation critique moyenne est de l'ordre de 80%, mais elle peut aussi être supérieure ou inférieure à cette valeur suivant le matériau considéré (voir par exemple : - Hirschwald J., 1912. Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung, Berlin Borntraeger; - Kreüglér H., 1924. Investigation of the effects of weathering on buildings, Ingeniörs Vetenskaps Akademien, Handlingar, N°24, Stockholm ; - Thomas W.N., 1938. Experiments on the freezing of certain building materials, Building Research, Technical Paper N°17). En nous basant sur les résultats de Hirschwald, nous admettons que tout matériau poreux ayant un coefficient de saturation capillaire, S, supérieur à 85% est susceptible d'être gélif et que tout matériau poreux ayant un coefficient S est inférieur à 75% n'est pas gélif.

⁷ Volume total d'un échantillon = volume de solide + volume de vide

d'imbibition capillaire obtenus sur les cubes de 4 cm d'arête sont extrapolables aux cubes de 15 cm d'arête et inversement.

Pour les pierres plus hétérogènes, comme le grès de Wiesental ou la molasse de la Mercerie, la comparaison entre les valeurs obtenues sur les petits et les grands cubes est beaucoup moins évidente à faire, le degré d'hétérogénéité des petits et des grands cubes n'étant pas toujours identiques.

Mis à part pour faciès hétérogène du grès de Wiesental, justement trop hétérogène, les porosités capillaires, P_{0c} , et les coefficients de saturation capillaires, S , calculés pour les cubes de 4 cm d'arête d'une même pierre sont similaires pour l'eau, pour l'alcool ou pour les consolidants (cf. tableau 29, p.25) : de manière générale, les valeurs pour l'eau et l'alcool sont quasiment identiques et légèrement supérieures à celles obtenues pour les consolidants. Par contre, les coefficients de capillarité massiques (A), volumiques (A') et linéaires (B) obtenus pour les cubes de 4 cm d'arête d'une même pierre varient suivant le liquide d'imbibition utilisé (cf. tableau 30, p.27 à tableau 33, p.28).

Ces résultats impliquent :

- que le pourcentage de volume poreux occupé par un liquide mouillant⁸ en fin d'imbibition capillaire *sensu stricto*⁹, est quasiment le même, quelle que soit la nature chimique du liquide et, comme déjà mentionné plus haut, quelles que soient ses cinétiques d'imbibition capillaires linéaire, massique et volumique ;
- que les valeurs de P_{0c} et de S sont beaucoup moins sensibles aux hétérogénéités de structures poreuses que les cinétiques d'imbibition linéaires, massiques ou volumiques.

Le fait que le volume poreux occupé après imbibition des consolidants soit légèrement inférieur au volume occupé après imbibition d'eau ou d'alcool pourrait s'expliquer par le fait que les processus de gélification des consolidants commencent avant la fin de l'imbibition capillaire, obstruant - ou du moins modifiant - partiellement la géométrie du volume poreux accessible au liquide. Nous ne pouvons pas être affirmatifs sur la base actuelle de nos connaissances, cependant, nous avons remarqué que la frange capillaire ne parvenait pas à dépasser 1.5 à 2 cm de profondeur lors de l'application de consolidant au pinceau à la surface de cubes de grès de Wiesental de 15 cm d'arête. Nous supposons que dans ces échantillons, des zones microporeuses très abondantes jouent normalement un rôle important dans le transfert des liquides par capillarité et que la gélification du produit consolidant - qui commence probablement dès qu'il se trouve dans le réseau poreux - obstrue très vite les micropores, entraînant ainsi le blocage de la frange capillaire à une profondeur très faible. Cette hypothèse demande à être vérifiée.

La comparaison des cinétiques capillaires linéaires obtenues pour les cubes de 4 cm d'arête - dans des conditions similaires - avec de l'eau puis de l'alcool et enfin avec les consolidants, montre que les cinétiques linéaires pour l'eau (entre 1.6 et 6 cm/h^{1/2}) sont plus rapides que celles de l'alcool et du consolidant, et que les cinétiques linéaires pour l'alcool (entre 1.1 et 3.8 cm/h^{1/2}) et les consolidants (entre 1.9 et 3.2 cm/h^{1/2}) sont très similaires (cf. figures 19 p.28 à 21 p.29 et tableaux 32 et 33, p.28).

⁸ Un liquide mouillant pour un solide donné est un liquide dont l'angle de contact au niveau de l'interface avec ce solide est inférieur à 90°.

⁹ L'imbibition capillaire au sens stricte s'interrompt lorsque la frange capillaire atteint la face opposée à la face d'imbibition. Si l'alimentation en liquide se poursuit, cette phase première phase est prolongée par une phase de diffusion de l'air piégé à travers le liquide. Les deux phases prises ensemble peuvent être considérées comme l'imbibition capillaire au sens large (cf. annexe 2, p.70)

Pour ce qui concerne les cinétiques capillaires volumiques¹⁰, celles de l'eau (comprises entre 1.05 et 7.92 l/m².h^{1/2}) sont beaucoup plus rapides que celles de l'alcool et des consolidants, tandis que les cinétiques des consolidants¹¹ (comprises entre 0.79 et 4.28 l/m².h^{1/2}) sont toutes supérieures à celles de l'alcool (comprises entre 0.64 et 3.52 l/m².h^{1/2}), excepté pour la molasse de Villarlod, exception ce que nous ne savons pas expliquer (cf. figures 19 p.28 à 21 p.29 et tableau 31).

Les résultats ne permettent pas d'établir des relations claires entre les coefficients linéaires ou volumiques obtenus pour l'eau, avec ceux obtenus pour l'alcool ou pour les consolidants. Ceci montre que pour un matériau donné, il n'est pas trivial de déduire la cinétique d'imbibition capillaire d'un liquide y (qu'elle soit linéaire, massique ou volumique) de celle, déjà connue, d'un liquide x. De plus, si la corrélation entre les cinétiques capillaires de l'eau, de l'alcool et d'un consolidant était connue pour une pierre donnée, il ne serait apparemment pas possible d'en déduire simplement la corrélation entre les mêmes cinétiques capillaires pour une pierre supposée similaire (voir les résultats obtenus pour le grès de Gurten et la molasse de Villarlod, ou pour les faciès grossier et fin de la molasse de la Mercerie, tableaux 30 à 33)

Si l'on compare les cinétiques d'absorption linéaires ou massiques obtenues par imbibition capillaire des consolidants sur les cubes de 4 cm d'arête avec celles obtenues par application au pinceau du même liquide sur les cubes de 15 cm d'arête¹², on constate que les secondes sont presque systématiquement plus lentes que les premières (cf. tableaux 30 à 33), à l'exception de la molasse de Villarlod pour laquelle le coefficient capillaire volumique obtenu par l'application au pinceau est étonnamment 9% plus grand que celui obtenu par imbibition capillaire. Mise à part cette "anomalie", les coefficients capillaires massiques (A) et volumiques (A') obtenus par imbibition capillaire sont entre 30 et 45% plus grands que ceux obtenus par application au pinceau, tandis que les coefficients capillaires linéaires (B) obtenus par imbibition sont entre 15 et 35% plus grands que ceux mesurés lors de l'application au pinceau. La différence ne peut pas être due aux dimensions des échantillons puisque, comme nous l'avons mentionné plus haut, celles-ci n'influencent quasiment pas les cinétiques d'absorption de l'eau lors d'imbibitions réalisées dans des conditions identiques. Pendant l'application au pinceau du consolidant, nous avons toujours pris garde de ne pas passer le pinceau jusqu'au bordures afin que le produit - liquide - ne s'écoule pas le long des faces verticales des cubes. Ainsi, une bande de 0.5 à 1 cm de large sur le pourtour des

¹⁰ En laboratoire, les mesures étant faites sur de petits échantillons, les unités de surfaces et de temps utilisées sont respectivement le cm² et la minute. De plus, les masses étant mesurées avec plus de précision que les volumes, les quantités de liquide absorbé lors des imbibitions capillaires sont exprimées en poids, ici le mg (cf. tableau 5 p.17 à tableau 28 p.24). Dans le tableau 31 et le tableau 33, nous avons transformé ces unités de laboratoire en unités plus pratiques sur un chantier soit en m² pour les surfaces, en heures pour le temps et en litres pour les quantités. Les densités des liquides utilisés ici (eau, éthanol dénaturé à 94%, Sax OH 100, Funcosil 300) étant différentes les unes des autres (respectivement 1, 0.809, 0.997 et 1 g/ml), les quantités de liquide absorbées par unité de temps et de surface exprimées en volumes pour un même matériau ne sont pas directement comparables aux mêmes quantités exprimées en poids.

¹¹ Nous notons ici qu'il n'est pas possible de faire une distinction entre les deux consolidants utilisés. En effet, les résultats obtenus avec l'un ou l'autre ne sont pas suffisamment tranchés pour mettre en évidence une différence de comportement capillaire entre les consolidants OH100 de Sax et Funcosil 300 de Remmers. De plus, il est à craindre que même si les résultats obtenus avec l'un étaient nettement différents de ceux obtenus avec l'autre, les expériences menées avec les deux produits n'ayant pas été faites sur des pierres de même nature il ne serait pas possible d'en tirer des conclusions claires.

¹² Les surfaces d'imbibition prises en compte lors des calculs sont toujours de 16 cm² pour les cubes de 4 cm d'arête et de 225 cm² pour ceux de 15 cm d'arête, quelque soit la méthode d'alimentation en liquide.

cubes n'était jamais alimentée directement. Mais très rapidement - après que cette surface non badigeonnée ait été mouillée par capillarité - le liquide se répandait de lui-même jusqu'aux bords lors de chaque application. De ce fait, il ne semble pas rationnel d'imputer la différence de cinétique d'absorption du consolidant entre les cubes "imbibés" de 4 cm et les cubes "badigeonnés" de 15 cm d'arête à une sur-évaluation de la surface d'absorption capillaire dans les calculs. Il est plus probable que ces résultats prouvent qu'une application au pinceau limite réellement la quantité de liquide qui pénètre dans le réseau poreux par capillarité par rapport à ce qui peut pénétrer pendant une imbibition capillaire. Ceci confirmerait les résultats de Ferreira Pinto et Delgado Rodrigues (2008) qui ont montré que la méthode de traitement de pierres calcaires influence la quantité de consolidant qui pénètre dans la pierre.

Notons ici que, n'ayant pas saturé totalement les cubes de 15 cm d'arête sur lesquels nous avons appliqué les consolidants au pinceau, nous n'avons aucun moyen non destructif pour évaluer le pourcentage du volume poreux occupé par le liquide dans l'épaisseur de matériau atteint par capillarité en fin d'expérience. Nous ne pouvons donc pas certifier que pour ces expériences d'application au pinceau, ce pourcentage était équivalent à celui atteint par imbibition capillaire sur les cubes de 4 cm d'arête.

3.3.4.2 Isothermes d'adsorption

La figure 22 p.30 confirme que l'hygroscopicité - ou l'affinité pour la vapeur d'eau - d'une pierre, ne dépend pas directement de sa porosité totale.

Si l'on considère la prise de poids en eau adsorbée à une humidité relative de 97% rapportée au poids sec de l'échantillon (tableau 34, figure 23), les pierres les plus hygroscopiques (adsorbant le plus de vapeur d'eau) parmi celles que nous avons testées, sont la molasse de Villarlod (0.0099 g d'eau adsorbée par g d'échantillon sec) et le grès de Gurten (0.0097 g/g) tandis que les moins hygroscopiques sont le grès de Maintal (0.0068 g/g) et la molasse de la Mercerie (0.0075 g/g). Pourtant aux humidités relatives plus basses (<86%), les pierres les moins hygroscopiques sont les deux grès du Buntsandstein, respectivement le grès de Maintal et le grès de Wiesental. Si l'on se réfère à la forme des isothermes d'adsorption (figure 23), on constate que l'hygroscopicité des grès de Maintal, de Wiesental, de Gurten et de la molasse de Villarlod croît de manière relativement constante entre 33 et 86% d'humidité relative, puis augmente brusquement entre 86 et 97% d'humidité relative, ce qui traduit certainement une forte condensation capillaire dans les pores les plus étroits pour les humidités relatives supérieures à 86%. L'hygroscopicité de la molasse de la Mercerie, quant à elle, est équivalente à celle du grès de Gurten à 33% d'humidité relative, puis elle croît relativement lentement jusqu'à 86% où elle augmente légèrement plus entre 86 et 97% d'humidité relative. Il est probable que cette isotherme d'adsorption témoigne que la condensation capillaire qui survient dans les pores les plus étroits pour les humidités relatives supérieures à 86% est beaucoup moins importante dans la molasse de la Mercerie que dans les quatre autres pierres testées.

Pour chaque échantillon testé en adsorption de vapeur d'eau, nous avons estimé le pourcentage du volume poreux total d'une part, et le pourcentage du volume poreux capillaire¹³ d'autre part, occupés par de l'eau adsorbée aux différentes humidités relatives utilisées. Les résultats sont représentés sur les figures 24 et 25 et les chiffres correspondants sont reportés dans les tableaux 35 et 36.

Ces résultats montrent que, à humidité relative équivalente, les proportions de porosité totale et de porosité capillaire occupées par l'eau adsorbée dans les grès molassiques d'une part

¹³ Le volume poreux "capillaire" auquel nous faisons référence ici correspond au pourcentage du volume poreux total qui peut être librement occupé par de l'eau lors d'une imbibition capillaire.

(molasse de la Mercerie, molasse de Villarlod et le grès de Gurten), et dans les grès du Buntsandstein (grès de Maintal et de Wiesental) d'autre part, sont très similaires entre elles. De plus les premières sont systématiquement supérieures aux secondes : à 75% d'humidité relative par exemple, les molasses ont entre 7.5 et 8.9% de leur porosité totale occupés par de l'eau adsorbée - soit entre 11.2 et 12.5% de leur porosité capillaire -, alors que pour les grès du Buntsandstein ce taux d'occupation ne représente que 3.1 à 3.2% de la porosité totale et 5 à 5.2% de la porosité capillaire. Ces différences entre molasses et grès sont liées aux différentes compositions minéralogiques et aux différentes structures poreuses.

Si, comme nous l'avons mentionné au chapitre 2.2, la quantité de vapeur d'eau présente dans le réseau poreux au moment de l'application du consolidant est importante, les résultats énoncés précédemment montrent que l'humidité relative ambiante nécessaire lors de cette application pour les grès du Buntsandstein doit être supérieure à celle nécessaire pour les molasses. En effet, si l'on admet que au moins 5% de la porosité totale doivent être occupés par de l'eau adsorbée lors de l'application¹⁴, alors l'humidité relative ambiante doit être de l'ordre de 55% pour les molasses et de 75% pour les grès du Buntsandstein. En nous basant sur les résultats de ces mesures, avant application des consolidants, nous avons conditionné les échantillons dans des enceintes où une humidité relative de 75% était maintenue constante grâce à des saumures de NaCl (cf. annexe 2, tableau A2.1).

4 Consolidants sélectionnés

	"Steinfestiger OH 100" ¹⁵ de Sax (BS, FR et LSN)	"FUNCOSIL Steinfestiger 300" de Remmers (BE)
Sources des informations	Fiche technique et fiche de données de sécurité fournies par l'entreprise Sax ¹⁶	Fiche technique et fiche de données de sécurité fournies par l'entreprise Remmers ¹⁷
Nature du consolidant	■ 75% d'ester de silice sous forme de tetraethylsilicathydrolysat (= tétraéthylsilicate partiellement hydrolysé, c-à-d contenant déjà des oligomères)	60 à <80% d'ester de silice sous forme de tetraethyl orthosilicate (= tétraéthylsilicate uniquement sous forme de monomères)
Densité (g/cm³)	0.997	1
Catalyseur	oui, mais nature non précisée	dibutyltin dilaurate C ₃₂ H ₆₄ O ₄ Sn (≤ 0.1%, neutre)
Produit dérivé	éthanol	éthanol
Quantité de gel déposé	non précisé	300g/l, soit un taux de 30%

¹⁴ La quantité d'eau adsorbée nécessaire au bon déroulement de la gélification des consolidants à base de silicate d'éthyle n'est pas citée dans la littérature. Nous avons arbitrairement décidé qu'elle devait occuper 5% de la porosité totale. La valeur exacte pourrait être évaluée ou du moins approchée par des essais de laboratoire complexes que nous n'avons pas effectués au cours de cette étude.

¹⁵ Dans la dénomination OH100, OH signifie "Ohne Hydrophobierung", c-à-d non hydrophobe et 100 signifie que le produit est sans solvant

¹⁶ http://www.sax.ch/cms/front_content.php?idcat=86&idart=131

¹⁷ <http://www.remmers.de/html/de/produktsuche/produkt/1541-kse-300/12/baum/1116/produktsuche.html#bot>

	"Steinfestiger OH 100"¹⁵ de Sax (BS, FR et LSN)	"FUNCOSIL Steinfestiger 300" de Remmers (BE)
Matériaux consolidables	pierres naturelles siliceuses (grès, molasses) et autres matériaux à base de silicates	matériaux de constructions poreux, absorbants et friables, de préférence des grès. Possibilité de consolider des joints et des crépis historiques
État du support	Les surfaces à traiter doivent être propres, sèches et absorbantes	Les surfaces à traiter doivent être propres, sèches, absorbantes, non chauffées et en équilibre avec l'humidité relative ambiante
Conditions climatiques nécessaires	Température > 10°C et < 20°C. Humidité relative ambiante > 40%. La surface traitée doit être protégée du soleil direct	Température > 8°C et < 25°C. Humidité relative de l'air non précisée. La surface traitée doit être protégée du soleil direct, du vent et de la pluie
Méthode d'application	<ul style="list-style-type: none"> ■ Brosse, pulvérisateur basse pression ■ Application "mouillé sur mouillé" jusqu'à "saturation complète" du matériau (=jusqu'à refus) ■ Si nécessaire, 2^{nde} application après 2 à 3 semaines ■ Pour éviter un changement de coloration suite à une saturation exagérée, il est recommandé de laver la surface après traitement avec de l'acétone 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Écoulement/flux superficiel, injection ou application de compresses en fonction de l'objet et de l'effet recherché ■ Application "mouillé sur mouillé" jusqu'à "saturation complète" du matériau (=jusqu'à refus). ■ Si nécessaire, 2^{nde} application après 2 à 3 semaines. ■ Pour éviter un changement de coloration suite à une saturation exagérée, il est recommandé de laver la surface avec un solvant non aqueux juste après le traitement
Consommation	<ul style="list-style-type: none"> ■ 0,5 à 15 l/m² (normalement 0,5 l/m² environ) en fonction de la nature et de l'état du matériau de construction. ■ Essais recommandés pour déterminer la consommation 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 0,1 à plusieurs l/m² en fonction de la nature et de l'état du matériau à consolider, ainsi que de la méthode d'application ■ Essais recommandés pour déterminer la consommation
Temps de séchage	2 semaines environ (pour une température de 20°C et une humidité relative de l'air de 50%)	3 semaines environ (pour une température de 20°C et une humidité relative de l'air de 50%)
Dangers pour l'homme et l'environnement	Inflammable ; nocif par inhalation ; irritant pour les yeux et les voies respiratoires ; nocif pour les organismes aquatiques, peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique	Inflammable ; nocif par inhalation ; irritant pour les yeux et les voies respiratoires

	"Steinfestiger OH 100" ¹⁵ de Sax (BS, FR et LSN)	"FUNCOSIL Steinfestiger 300" de Remmers (BE)
Recommandations avant application d'un mortier	non précisées	si l'effet hydrophobe persiste au moment de l'application d'un mortier, mouiller la surface avec de l'alcool pour éliminer cet effet

Tableau 37 Informations concernant les produits consolidants sélectionnés par les cathédrales de Bâle, Fribourg, Lausanne (Steinfestiger OH100 de Sax) et la cathédrale de Berne (FUNCOSIL Steinfestiger 300 de Remmers)

5 Appareils utilisés et principes de fonctionnement

Les modes opératoires et les limites des appareils sont reportés en annexe 3 pour la réflexion des microondes et en annexe 4 pour la conductivité électrique

5.1 Bref principe de fonctionnement du MOIST 200B

Le MOIST 200B fabriqué par *hf sensor*¹⁸ est un appareil portatif capable d'émettre et de recevoir en retour des micro-ondes réfléchies par un matériau humide, le signal reçu étant lié à la teneur en eau du matériau via les propriétés diélectriques de l'eau.

Les méthodes de mesure diélectriques sont basées sur les propriétés physiques particulières de l'eau qui est une molécule polaire. Ce qui signifie qu'elle n'est pas neutre lorsqu'elle est soumise à un champ électrique : elle s'oriente - ou se polarise - dans le champ électrique appliqué. Lorsque des molécules d'eau se trouvent dans un champ électromagnétique alternatif, elles pivotent avec la fréquence du champ appliquée. Cet effet est macroscopiquement décrit par la constante diélectrique ou permittivité.

La permittivité de l'eau (80) étant beaucoup plus élevée que celle des matériaux de construction (entre 2 et 10), en mesurant la permittivité d'un matériau de construction il est théoriquement possible de déterminer s'il contient de l'eau et si oui, quelle quantité.

Les micro-ondes sont des ondes électromagnétiques¹⁹ de longueur d'onde intermédiaire entre l'infrarouge et les ondes de radiodiffusion, c-à-d des longueurs d'onde dans la gamme de 30 cm (soit une fréquence de 1 GHz) à 1 mm (300 GHz).

Lorsque des molécules d'eau sont soumises à un champ électromagnétique correspondant aux micro-ondes, leur orientation devient de plus en plus difficile en raison des liaisons qui existent entre elles, ce qui implique des frictions internes autrement appelées "pertes diélectriques"²⁰.

Ainsi dans le domaine électromagnétique des micro-ondes, il est possible de mesurer deux grandeurs sur les matériaux contenant des molécules d'eau : la permittivité de l'eau et les pertes diélectriques.

¹⁸ <http://www.hf-sensor.de/>

¹⁹ Pour rappel, une onde lumineuse est une onde électromagnétique dont la longueur d'onde correspond au spectre visible, soit entre 380 et 780 nm.

²⁰ Si la force des micro-ondes est suffisamment importante, le matériau qui contient les molécules d'eau est chauffé. C'est ce principe qui est utilisé pour chauffer la nourriture dans les fours à micro-ondes.

En utilisant deux types d'émetteurs-récepteurs que l'on applique à la surface de la pierre à étudier, il est possible de mesurer - de manière non destructive - les caractéristiques précitées d'une part en surface et d'autre part, dans un volume plus ou moins profond de la pierre en question. Par comparaison il est théoriquement possible d'obtenir des informations sur la distribution de l'humidité dans la pierre en fonction de la profondeur atteignable par les émetteurs-récepteurs.

Les mesures effectuées à la surface d'un matériau à l'aide de l'appareil MOIST 200B fournissent des informations sur des volumes de matériau dont les formes sont schématisées sur la figure 26.

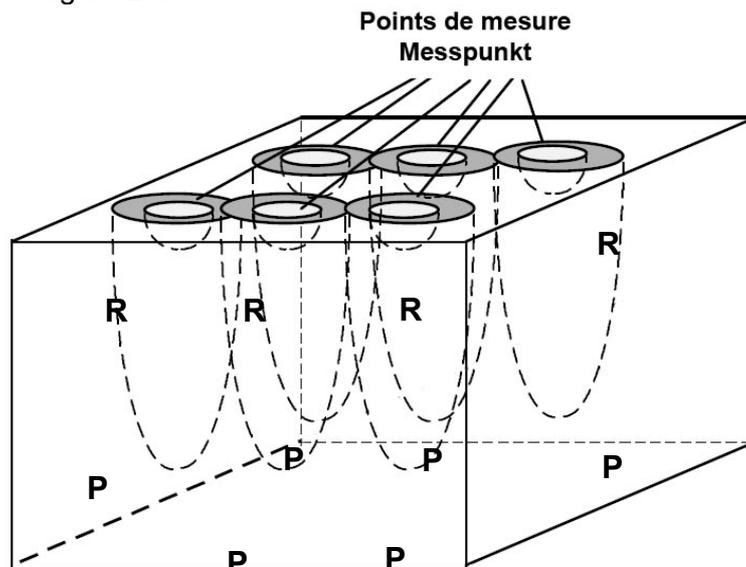


Figure 26 Schéma représentant les formes des volumes de matériau sur lesquels sont acquises les données avec la sonde R (limite de détection située vers 3 cm de profondeur) et avec la sonde P (limite de détection située vers 30 cm de profondeur). D'après Göller, 1999.

5.2 Bref principe de fonctionnement du COMBO 200

Un conductivimètre (ou conductimètre) électrique est un ohmmètre, c-à-d un instrument de mesure qui permet de mesurer la résistance ou la conductivité électrique existant entre deux électrodes.

Le principe de base de l'appareil COMBO 200, fabriqué par BES Bollman®²¹, repose sur la mesure de la résistance électrique, c-à-d la propriété qui caractérise l'aptitude d'un corps à s'opposer au passage du courant électrique. Il s'agit donc plus précisément d'un résistivimètre.

La majorité des roches ne sont pas de bons conducteurs électriques. Elles possèdent une résistance électrique élevée. L'eau, quant à elle, est un mauvais conducteur électrique lorsqu'elle est pure, mais lorsqu'elle est minéralisée (même très peu), elle contient des ions et devient donc conductrice de l'électricité. Ainsi, une roche poreuse imprégnée d'eau laissera passer l'électricité assez facilement puisque le liquide présent dans ses pores possède une faible résistance électrique. De plus, théoriquement, la résistance électrique de cette roche sera d'autant plus faible que la quantité d'eau présente dans la porosité sera grande.

²¹ <http://www.bes-bollmann.de/>

La résistance électrique mesurée avec l'appareil COMBO 200 entre deux points d'une pierre humide donne donc théoriquement la teneur en eau de cette pierre entre ces deux points.

6 Résultats des mesures

6.1 Réflexion des micro-ondes

Dans tout ce qui suit, les grandeurs fournies par le MOIST sont des valeurs absolues caractérisant directement le signal reçu par la machine exprimées en "Moisture Index" (MI), ou index d'humidité. Il s'agit d'un nombre sans dimension compris entre 0 et 4000, qui dépend de la nature et de l'état hydrique du matériau sur lequel sont effectuées les mesures. Dans des conditions d'utilisation normale, cet index d'humidité est sensé être d'autant plus élevé que la teneur en eau est grande²².

Travailler avec ce MI nous permettra de comparer les valeurs obtenues pour différents matériaux d'une part et pour différents états de saturation en eau pour un même matériau d'autre part.

6.1.1 Mesures effectuées sur les échantillons secs

Les index d'humidité moyens, minimums et maximums mesurés avec le MOIST 200B sont reportés dans les tableaux 38 à 42 ainsi que sous forme de graphique comparatif dans la figure 27.

Mesures MOIST / cubes secs				
BS Maintal	R	R2	D	P
moyenne	2413	3490	451	2350
nombre	6	6	6	6
écart type	17	24	21	42
minimum	2382	3460	431	2277
maximum	2431	3517	490	2398

Tableau 38 Valeurs moyennes, minimales et maximales des index d'humidité obtenus pour les cubes secs de 15 cm d'arête du grès de Maintal (T = 24°C, HR = 26%).

Mesures MOIST / cubes secs				
BS Wiesental	R	R2	D	P
moyenne	2432	3446	684	2173
nombre	13	13	13	13
écart type	28	18	145	64
minimum	2398	3421	566	2015
maximum	2480	3480	976	2244

Tableau 39 Valeurs moyennes, minimales et maximales des index d'humidité obtenus pour les cubes secs de 15 cm d'arête du grès de Wiesental (T = 23°C, HR = 29%).

Mesures MOIST / cubes secs				
BE Gurten	R	R2	D	P
moyenne	2563	3460	1256	1414
nombre	9	9	9	9
écart type	31	25	33	74
minimum	2515	3406	1185	1333
maximum	2597	3490	1285	1529

Tableau 40 Valeurs moyennes, minimales et maximales des index d'humidité obtenus pour les cubes secs de 15 cm d'arête du grès de Gurten (T = 23°C, HR = 29%).

Mesures MOIST / cubes secs				
FR Villarlod	R	R2	D	P
moyenne	2534	3457	1197	1468
nombre	10	10	10	10
écart type	20	18	25	37
minimum	2505	3431	1158	1433
maximum	2560	3480	1245	1554

Tableau 41 Valeurs moyennes, minimales et maximales des index d'humidité obtenus pour les cubes secs de 15 cm d'arête de la molasse de Villarlod (T = 24°C, HR = 26%).

²² hf sensor, MOIST 200B, Bedienungsanleitung / Operation manual

Mesures MOIST / cubes secs				
VD Mercerie	R	R2	D	P
moyenne	2502	3462	1214	1507
nombre	9	9	9	9
écart type	97	44	49	71
minimum	2339	3390	1156	1419
maximum	2628	3513	1318	1652

Tableau 42 Valeurs moyennes, minimales et maximales des index d'humidité obtenus pour les cubes secs de 15 cm d'arête de la molasse de la Mercerie (T = 24°C, HR = 28%).

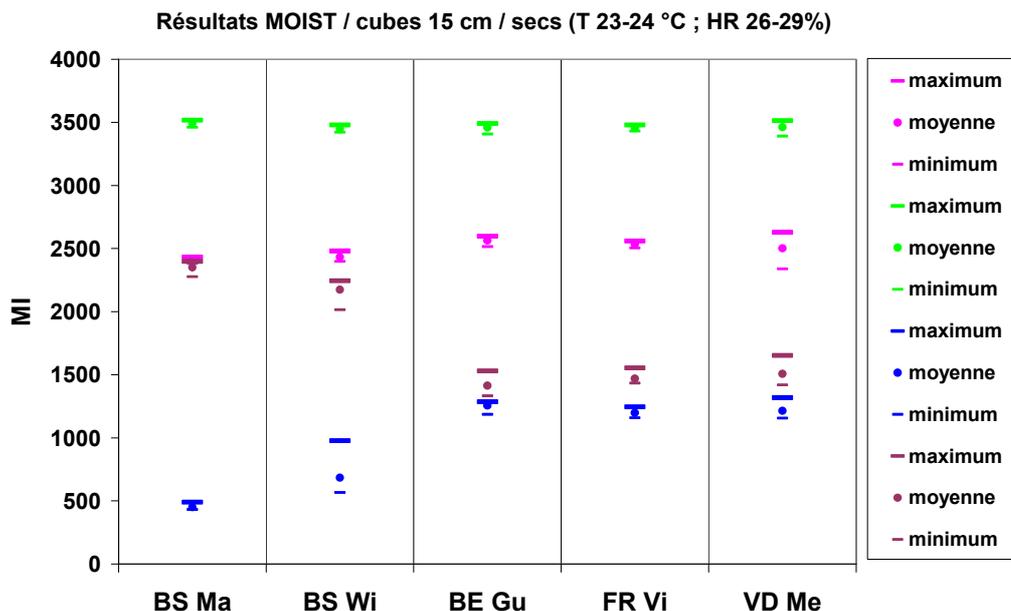


Figure 27 Comparaison des index d'humidité (MI) "secs" maximums (—), moyens (●) et minimums (-) mesurés avec les sondes MOIST R (fuchsia), R2 (vert), D (bleu) et P (violet) sur les cubes secs de 15 cm d'arête des grès de Maintal (BS Ma), de Wiesental (BS Wi) et de Gurten (BE Gu) ainsi que des molasses de Villarlod (FR Vi) et de la Mercerie (VD Me) à une température de 23-24°C et à une humidité relative de 26-29%.

Les index d'humidité "secs" donnés par les sondes R et R2 sont relativement proches pour les 5 pierres puisque les 5 moyennes sont comprises entre 2413 et 2566 pour la sonde R et entre 3446 et 3490 pour la sonde R2 (cf. tableaux 38 à 42). Par contre, les index d'humidité "secs" fournis par les sondes D et P sont nettement différents suivant que l'on considère les grès du Buntsandstein (moyennes entre 451 et 684 pour la sonde D et entre 2173 et 2350 pour la sonde P) ou les molasses (moyennes entre 1197 et 1256 pour la sonde D et entre 1414 et 1507 pour la sonde P). La nette différence entre grès du Buntsandstein et grès molassiques laissent supposer que les résultats des sondes D et P sont plus fortement influencées par le contenu minéralogique que ceux des sondes R et R2 (cf. figure 27). D'autre part, les sondes du MOIST 200B semblent aussi sensibles aux hétérogénéités des pierres : les index d'humidité "secs" mesurés sur le grès de Wiesental et sur la molasse de la Mercerie montrent des écarts types importants, surtout pour les sondes D et P (cf. tableaux 39 et 42). Nous notons encore que les mesures effectuées avec la sonde P donne un écart type important pour le grès de Gurten, ce que nous ne pouvons pas expliquer (cf. tableau 40).

6.1.2 Mesures effectuées en cours d'adsorption de vapeur d'eau

Les index d'humidité mesurés avec le MOIST 200B sur des cubes conditionnés à des humidités relatives croissantes sont représentés sur les figures 28 à 31. Sur les figures 32 à 35, ces index d'humidités sont comparés aux valeurs obtenues sur les cubes secs et sur les cubes en cours d'absorption capillaire.

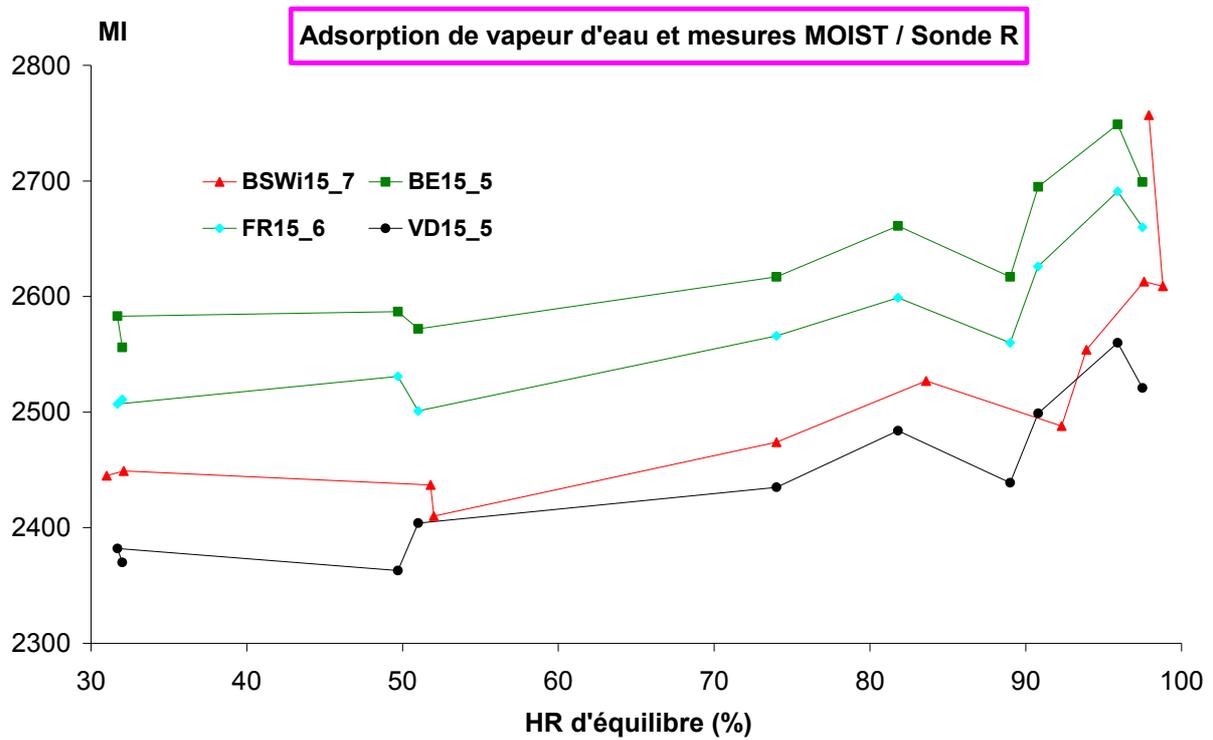


Figure 28 Index d'humidité (MI) mesurés avec la sonde MOIST R sur des cubes de 15 cm d'arête à l'équilibre à différentes humidités relatives. Rouge : Wiesental, vert : Gurten, turquoise : Villarlod et noir : Mercerie.

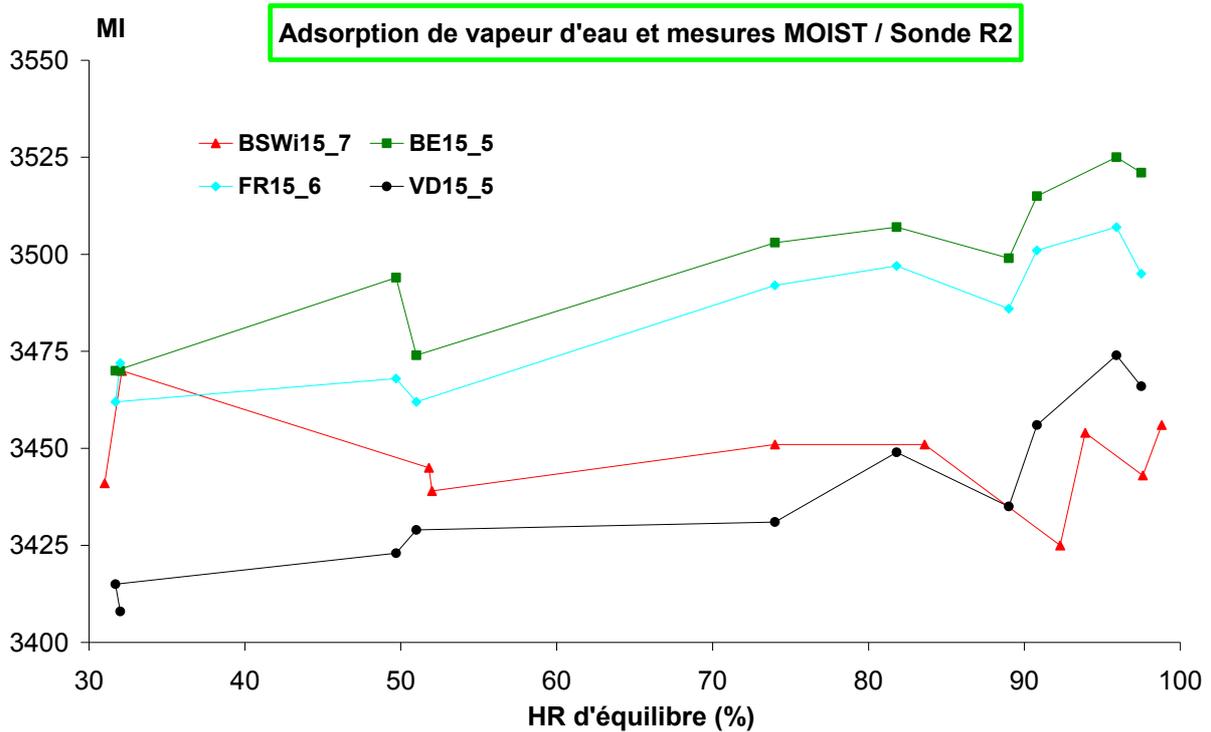


Figure 29 Index d'humidité (MI) mesurés avec la sonde MOIST R2 sur des cubes de 15 cm d'arête à l'équilibre à différentes humidités relatives. Rouge : Wiesental, vert : Gurten, turquoise : Villarlod et noir : Mercerie.

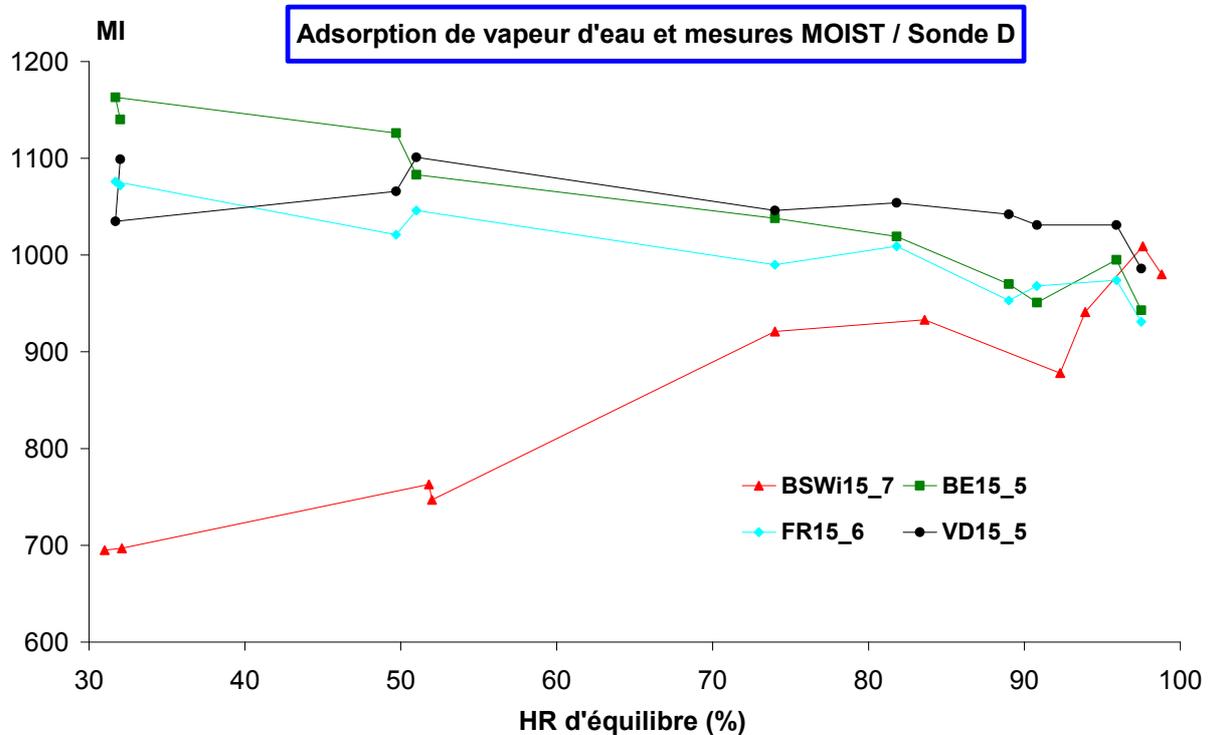


Figure 30 Index d'humidité (MI) mesurés avec la sonde MOIST D sur des cubes de 15 cm d'arête à l'équilibre à différentes humidités relatives. Rouge : Wiesental, vert : Gurten, turquoise : Villarlod et noir : Mercerie.

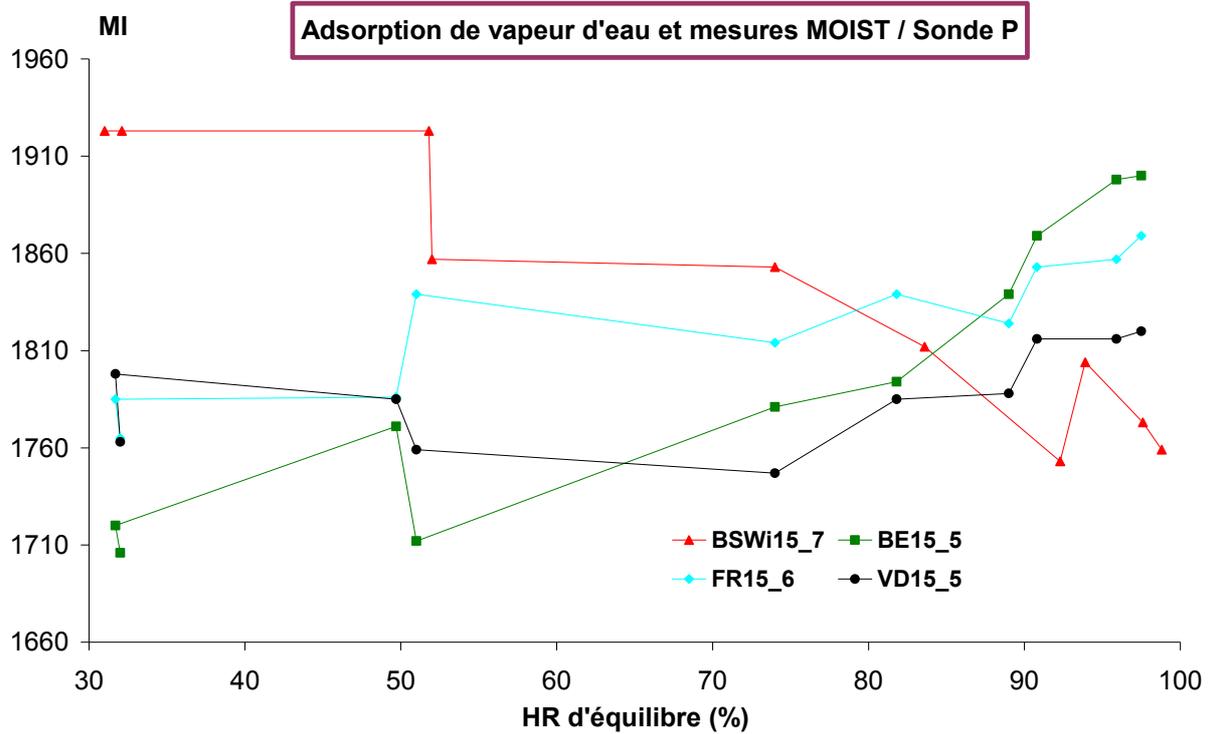


Figure 31 Index d'humidité (MI) mesurés avec la sonde MOIST P sur des cubes de 15 cm d'arête à l'équilibre à différentes humidités relatives. Rouge : Wiesental, vert : Gurten, turquoise : Villarlod et noir : Mercerie.

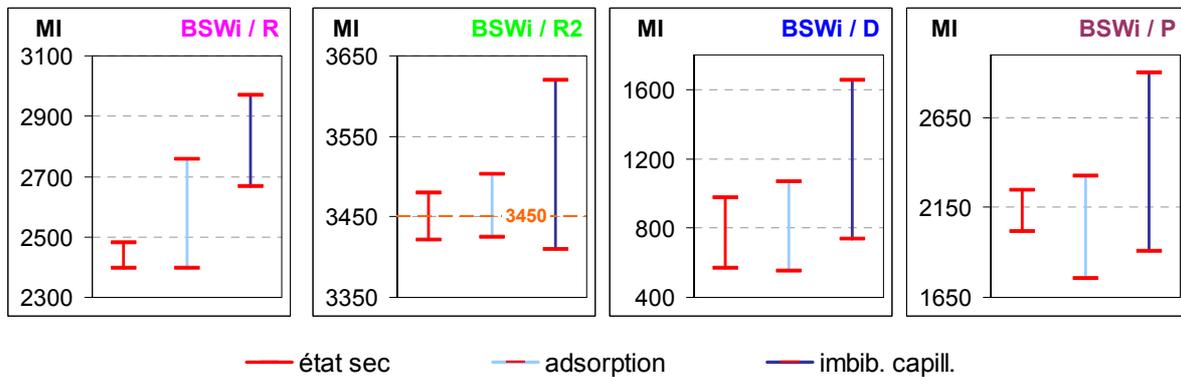


Figure 32 Intervalles des index d'humidité (MI) mesurés avec les sondes MOIST R, R2, D et P sur les cubes de 15 cm d'arête (non consolidés) de grès de Wiesental à l'état sec (13 cubes), en cours d'imbibition capillaire à l'eau (5 cubes) et à l'équilibre à différentes humidités relatives (1 cube).

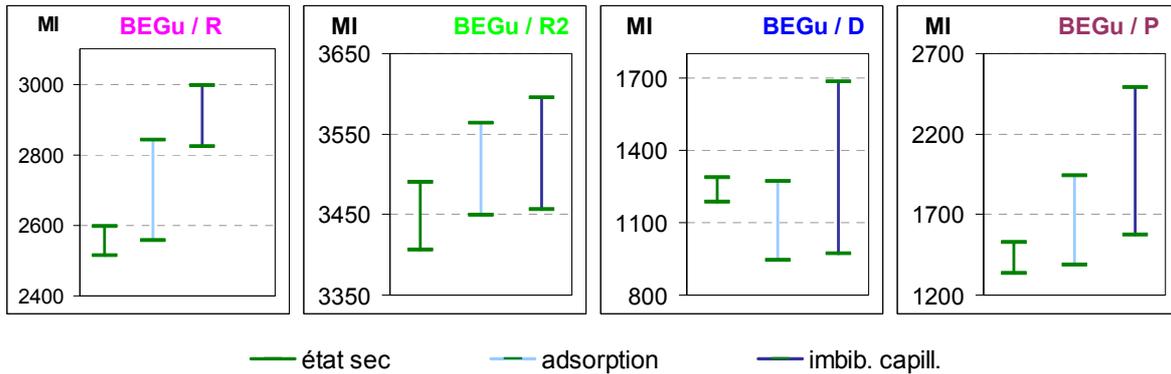


Figure 33 Intervalles des index d'humidité (MI) mesurés avec les sondes MOIST R, R2, D et P sur les cubes de 15 cm d'arête (non consolidés) de grès de Gurten à l'état sec (9 cubes), en cours d'imbibition capillaire à l'eau (4 cubes) et à l'équilibre à différentes humidités relatives (1 cube).

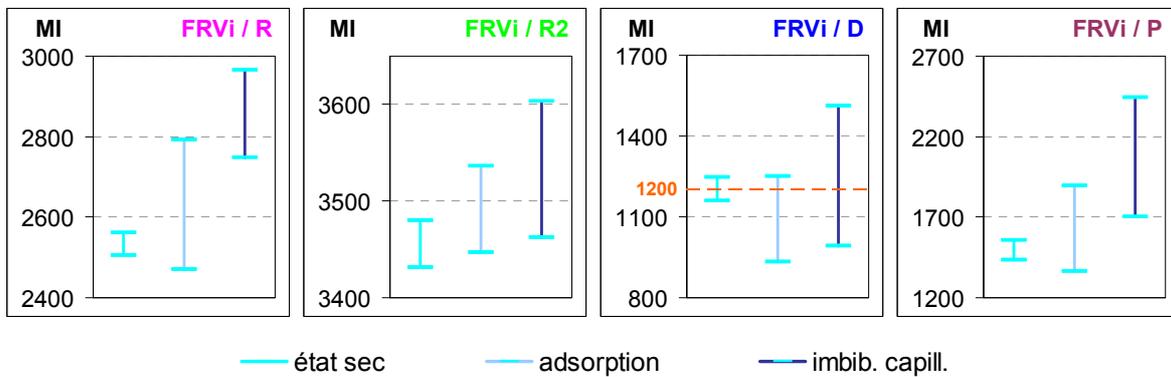


Figure 34 Intervalles des index d'humidité (MI) mesurés avec les sondes MOIST R, R2, D et P sur les cubes de 15 cm d'arête (non consolidés) de molasse de Villarlod à l'état sec (10 cubes), en cours d'imbibition capillaire à l'eau (3 cubes) et à l'équilibre à différentes humidités relatives (1 cube).

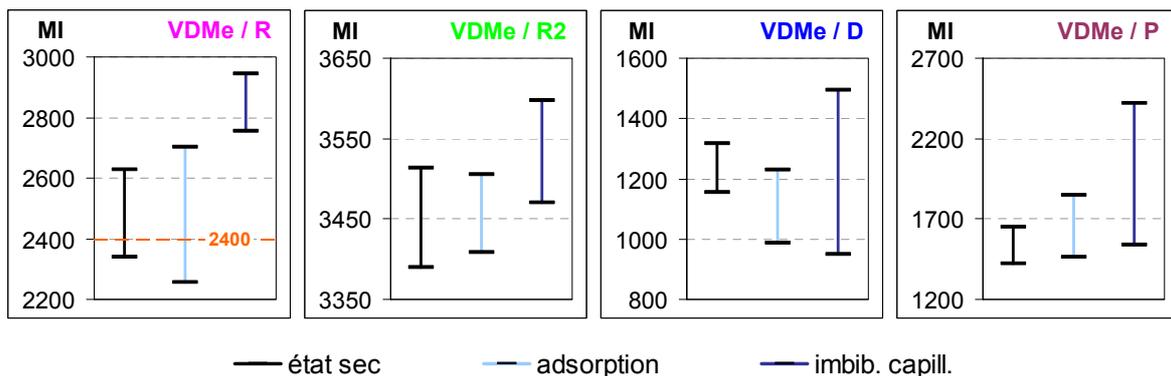


Figure 35 Intervalles des index d'humidité (MI) mesurés avec les sondes MOIST R, R2, D et P sur les cubes de 15 cm d'arête (non consolidés) de molasse de la Mercerie à l'état sec (9 cubes), en cours d'imbibition capillaire à l'eau (3 cubes) et à l'équilibre à différentes humidités relatives (1 cube).

Malgré les conditions expérimentales non idéales (mesures effectuées sans supports adéquats, sur des cubes pas parfaitement en équilibre avec les conditions d'humidité relative imposées dans les enceintes, cf. notes de bas de page 26 et 27, p. 80), les résultats montrent des tendances relativement nettes : les index d'humidité mesurés avec les 4 sondes du MOIST 200B sur les grès de Wiesental et de Gurten et sur les molasses de Villarlod et de la Mercerie varient lorsque l'humidité relative augmente. Le sens de cette variation dépend de la sonde et de la nature de la pierre :

- avec la sonde R, pour les 4 pierres testées, les MI tendent nettement à augmenter lorsque l'humidité relative augmente. Ces variations suivent des pentes presque identiques pour les 3 molasses (grès de Gurten, molasses de Villarlod et de la Mercerie) alors que la variation du MI pour le grès de Wiesental suit une pente très légèrement plus forte (figure 28) ;
- avec la sonde R2, les MI mesurés sur les 3 molasses présentent une nette tendance à augmenter avec l'humidité relative, selon des pentes très similaires, tandis que les MI mesurés sur le grès de Wiesental tendent à diminuer légèrement lorsque l'humidité relative augmente (figure 29) ;
- avec la sonde D, les MI fournis pour les 3 molasses tendent à diminuer alors que ceux fournis pour le grès de Wiesental augmentent lorsque l'humidité relative croît. L'amplitude des variations est faible pour la molasse de la Mercerie, intermédiaire pour la molasse de Villarlod et plus forte pour le grès de Gurten (figure 30)
- les résultats obtenus avec la sonde P, sont inverses à ceux obtenus avec la sonde D : les MI fournis pour les 3 molasses tendent à augmenter alors que ceux fournis pour le grès de Wiesental diminuent lorsque l'humidité relative croît. L'amplitude des variations est faible pour la molasse de la Mercerie, intermédiaire pour la molasse de Villarlod et plus forte pour le grès de Gurten (figure 31).

Quelles que soient la sonde ou la nature de la pierre, les variations du MI en fonction de l'humidité relative ne sont pas linéaires. En raison des conditions expérimentales non optimales, il est toutefois délicat de préciser la relation exacte qui existe entre le MI et l'humidité relative dans laquelle les pierres sont conditionnées.

Il est tentant d'imaginer qu'en répétant les expériences dans des conditions idéales, l'appareil MOIST 200B pourrait être étalonné pour déterminer *in situ* la quantité d'eau adsorbée dans la porosité d'un matériau donné. Or, si les MI donnés par l'appareil pendant les mesures d'adsorption de vapeur d'eau sont comparés aux MI mesurés sur les échantillons secs ou sur les échantillons contenant de l'eau liquide, on constate que dans la grande majorité des cas - du moins pour les matériaux testés - les valeurs se chevauchent (cf. figures 32 à 35). Pratiquement, ceci signifie que pour une sonde et un matériau donné, il est très difficile, voire impossible, de déterminer si le MI mesuré avec le MOIST 200B indique que le matériau est sec ou plutôt s'il contient une certaine quantité de vapeur d'eau adsorbée ou bien encore s'il contient de l'eau liquide. Par exemple, si la sonde D donne la valeur 1200 sur l'un des cubes de 15 cm d'arête de molasse de Villarlod dont nous disposons au laboratoire, il est impossible de préciser si l'échantillon est sec, s'il contient de l'eau adsorbée ou de l'eau liquide (cf figure 34).

6.1.3 Mesures effectuées en cours d'imbibition capillaire à l'eau

Les résultats des mesures d'index d'humidité effectuées pendant les imbibitions capillaires sont reportés sur les figures 36 à 40.

Comme on peut le constater dans les figures ci-dessous, les variations de l'index d'humidité fourni par les quatre sondes du MOIST 200B sont très similaires pour les trois molasses : les formes des courbes sont très semblables pour Mercerie, Villarlod et Gurten. Par contre, ces

variations sont nettement différentes pour les grès de Maintal et de Wiesental, surtout pour les 2 sondes D et P qui donnent des courbes très différentes de celles des molasses. Ces différences ne sont pas explicables sur la base de nos connaissances concernant les interactions existant entre les micro-ondes et l'eau plus ou moins liée présente dans un réseau poreux insaturé.

hf sensor mentionne dans le mode d'emploi de l'appareil MOIST 200B que, pour un échantillon donné et des conditions expérimentales idéales (conditions respectées pour toutes les mesures effectuées avec les sondes R, R2 et D), plus le MI est élevé, plus le contenu en eau de cet échantillon est grand. Si ce postulat se vérifie effectivement pour tous les matériaux testés et pour toutes les sondes jusqu'à une profondeur de pénétration d'eau de l'ordre de 1 cm, au-delà de ce premier centimètre, les informations fournies par l'appareil ne sont plus du tout représentatives de la quantité d'eau. En effet, à partir de 1cm de pénétration capillaire, le MI fourni par toutes les sondes tend à diminuer avant d'augmenter à nouveau pour une profondeur légèrement plus grande. Puis à nouveau, la profondeur de pénétration capillaire augmentant le MI diminue encore une fois pour à nouveau augmenter. Chaque inflexion a lieu pour des profondeurs de pénétration capillaire qui sont fonction de la nature du matériau testé et du type de sonde avec laquelle la mesure est effectuée. Cela signifie pratiquement, que si la sonde D fournit un MI de 1225 sur une surface de grès de Maintal par exemple, il n'est pas possible de savoir si la frange capillaire se trouve à 1.5, 2.5, 5.75 ou 14.5 cm de profondeur (cf. figure 36) ; de même, si la sonde R2 fournit un MI de 3530 sur une surface de grès de Gurten, il n'est pas possible de savoir si la frange capillaire se trouve à 0.4, 1.5, ou 3.5 cm de profondeur (cf. figure 38).

Nous observons encore que pour certaines combinaisons matériau/sonde de mesure, les index d'humidité mesurés sur des échantillons contenant déjà de l'eau capillaire sont inférieurs aux index d'humidité mesurés sur les mêmes échantillons à sec. Ainsi, pour les 5 pierres testées, la sonde R2 donne des MI inférieurs à la valeur sèche dès que la frange capillaire atteint 5 cm de profondeur pour les molasses (Gurten figure 38, Villarlod figure 39 et la Mercerie figure 40) ou 2-2.5 cm de profondeur pour les grès (Maintal figure 36 et Wiesental figure 37). Ou bien encore, pour les grès du Buntsandstein, la sonde P donne systématiquement des MI inférieurs à la valeur sèche lorsque la frange capillaire se trouve entre 2-3 et 4 cm de profondeur pour le grès de Wiesental (figure 37) et lorsque la frange capillaire dépasse 2 cm de profondeur pour le grès de Maintal (figure 36).

Nous constatons donc que - pour les matériaux testés du moins - les index d'humidité fournis par l'appareil MOIST 200B ne peuvent être utilisés ni pour estimer la teneur en eau liquide du matériau ni pour évaluer la profondeur de pénétration de l'eau capillaire que ce soit avec l'une ou l'autre des quatre sondes testées, ou par comparaison, addition ou soustraction des valeurs fournies par les différentes sondes.

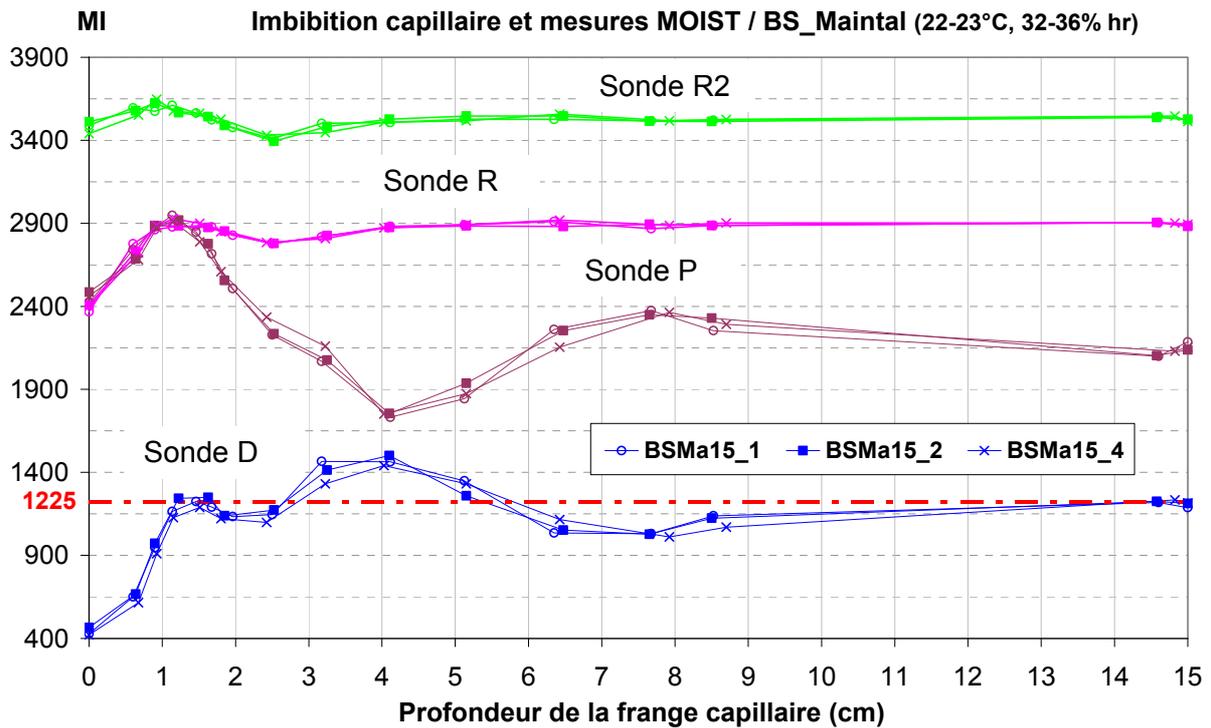


Figure 36 Index d'humidité (MI) mesurés avec les sondes MOIST R (fuchsia), R2 (vert), D (bleu) et P (violet) pendant les imbibitions capillaires effectuées sur 3 cubes de grès de Maintal de 15 cm d'arête. T 22-23°C, HR 32-36%.

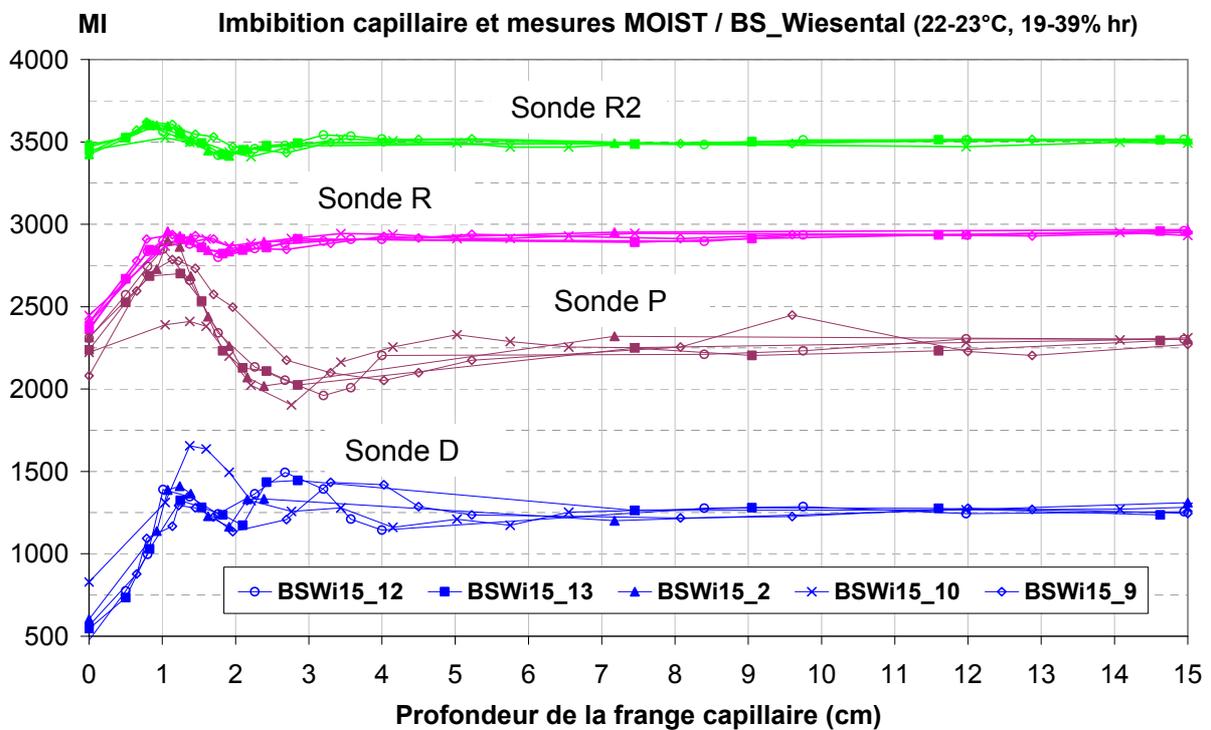


Figure 37 Index d'humidité (MI) mesurés avec les sondes MOIST R (fuchsia), R2 (vert), D (bleu) et P (violet) pendant les imbibitions capillaires effectuées sur 5 cubes de grès de Wiesental de 15 cm d'arête. T 22-23°C, HR 19-39%.

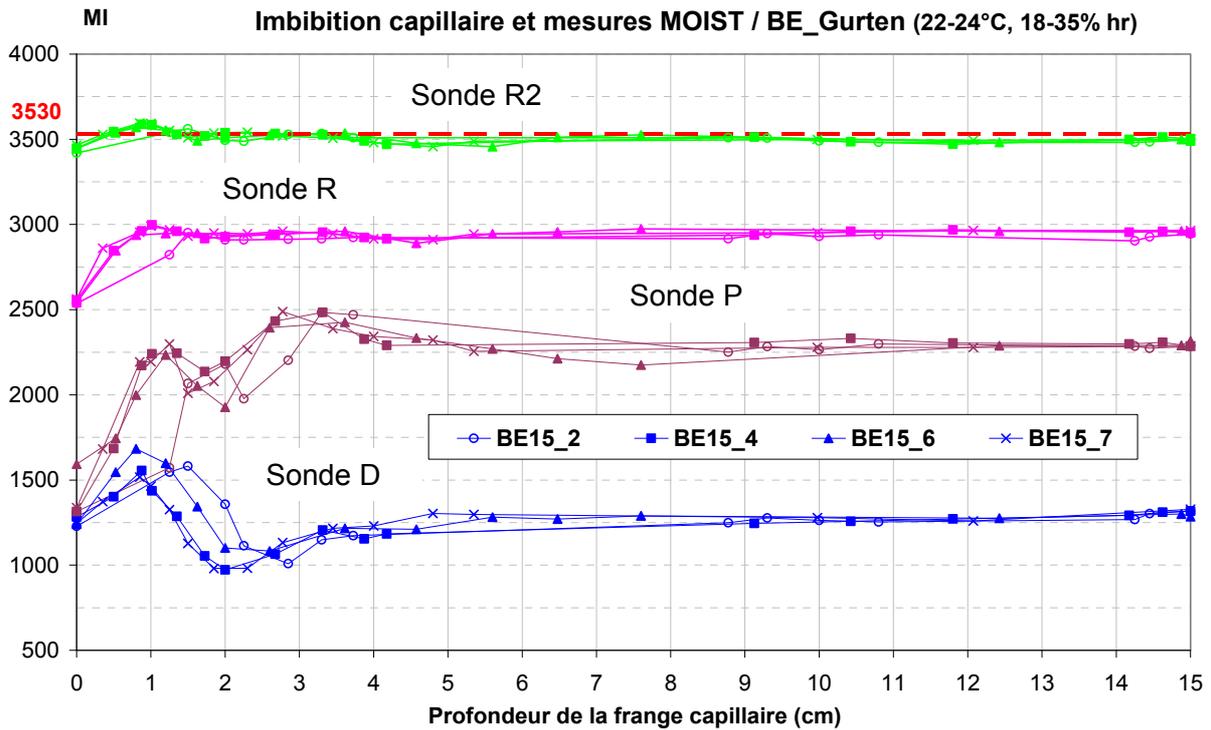


Figure 38 Index d'humidité (MI) mesurés avec les sondes MOIST R (fuchsia), R2 (vert), D (bleu) et P (violet) pendant les imbibitions capillaires effectuées sur 4 cubes de grès de Gurten de 15 cm d'arête. T 22-24°C, HR 18-35%.

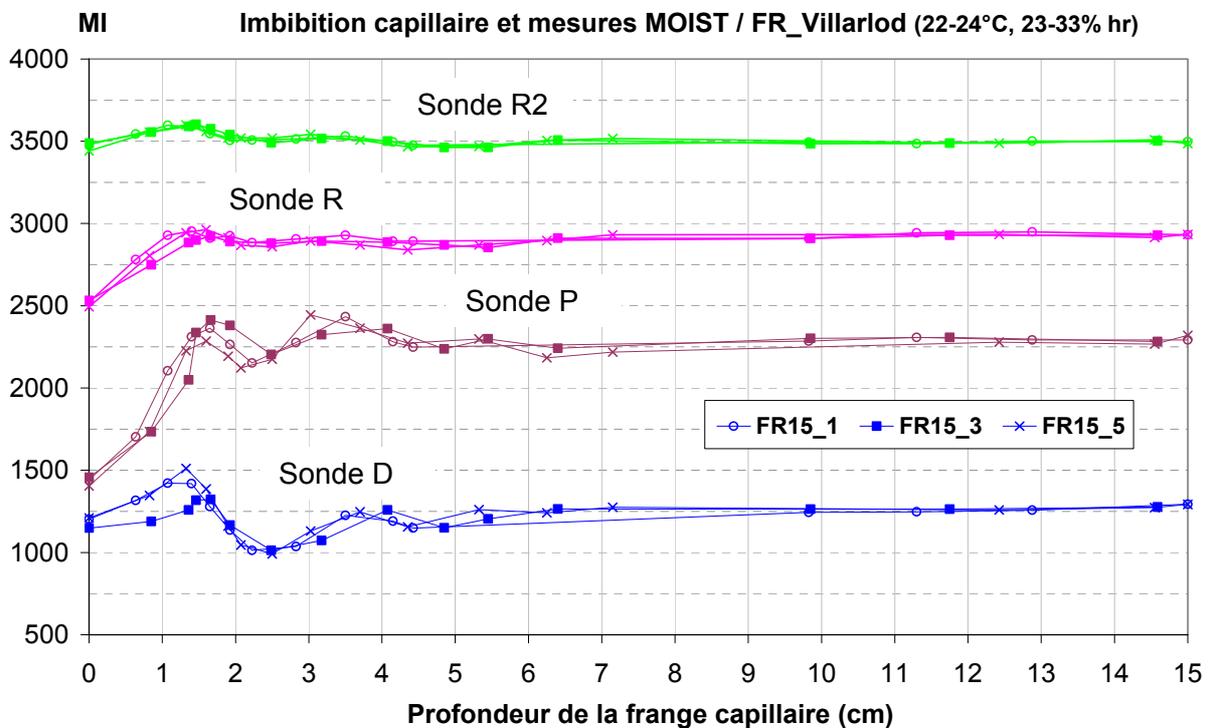


Figure 39 Index d'humidité (MI) mesurés les sondes MOIST R (fuchsia), R2 (vert), D (bleu) et P (violet) pendant les imbibitions capillaires effectuées sur 3 cubes de molasse de Villarlod de 15 cm d'arête avec. T 22-24°C, HR 23-33%.

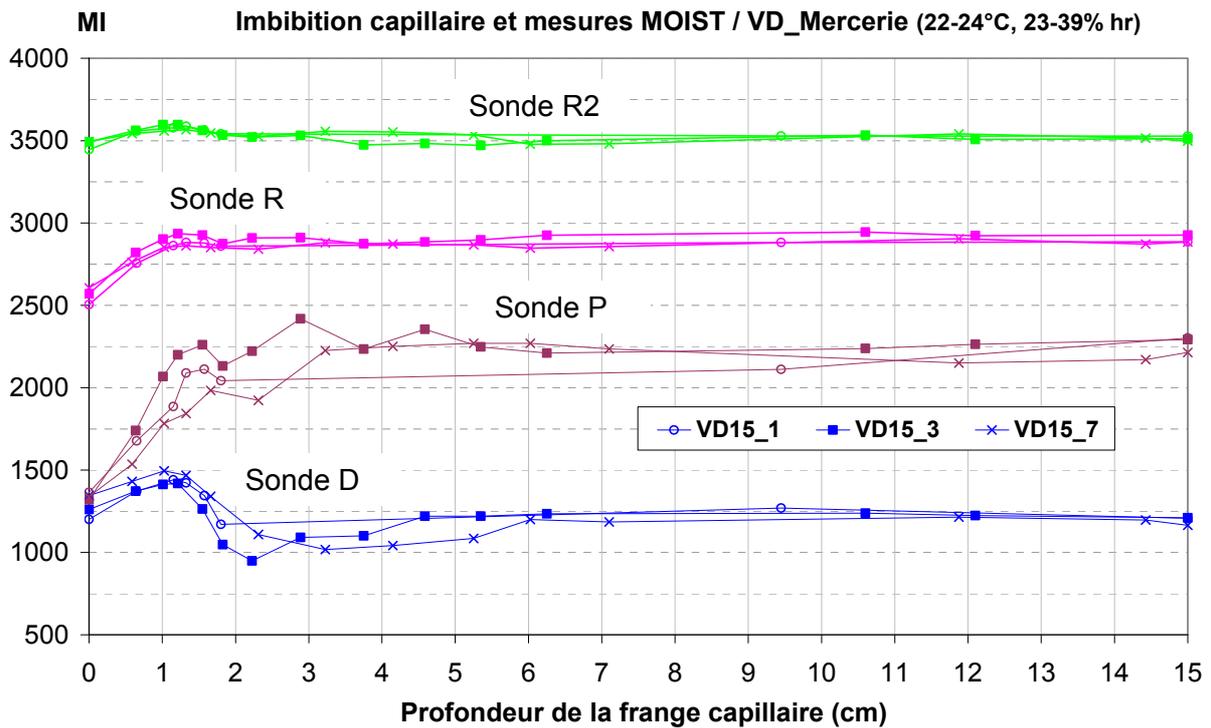


Figure 40 Index d'humidité (MI) mesurés avec les sondes MOIST R (fuchsia), R2 (vert), D (bleu) et P (violet) pendant les imbibitions capillaires effectuées sur 3 cubes de molasse de la Mercerie de 15 cm d'arête. T 22-24°C, HR 23-39%.

6.1.4 Mesures effectuées pendant et après application des consolidants

Les résultats obtenus 1, 2, 4 et 6 semaines après consolidation n'étant pas significatifs, seuls les résultats obtenus pendant l'application des consolidants sont reportés sur les figures 41 à 45 sous forme de graphiques représentant l'index d'humidité (MI) en fonction de la prise de poids en consolidant rapportée à l'unité de surface d'application du produit. Ces données sont comparées à celle obtenues sur les mêmes cubes lors des imbibitions capillaires. Les consolidants ont été appliqués jusqu'à ce qu'ils atteignent une profondeur comprise entre 0.9 et 3.5 cm. Les résultats d'un seul échantillon par type de pierre sont reportés sur les graphiques : il s'agit toujours de l'échantillon pour lequel la profondeur de pénétration était la plus grande.

Lors de l'application du consolidant sur les cubes, il a été impossible d'empêcher tout écoulement de liquide le long des faces verticales. En conséquence, la profondeur de la frange capillaire n'était pas aussi nettement lisible que dans le cas des imbibitions capillaires à l'eau. C'est pourquoi les graphiques des figures 41 à 45 représentent les MI en fonction de la prise de poids en eau ou en consolidant par unité de surface d'imbibition ou d'application et non plus en fonction de la profondeur de pénétration du liquide comme sur les figures 36 à 40.

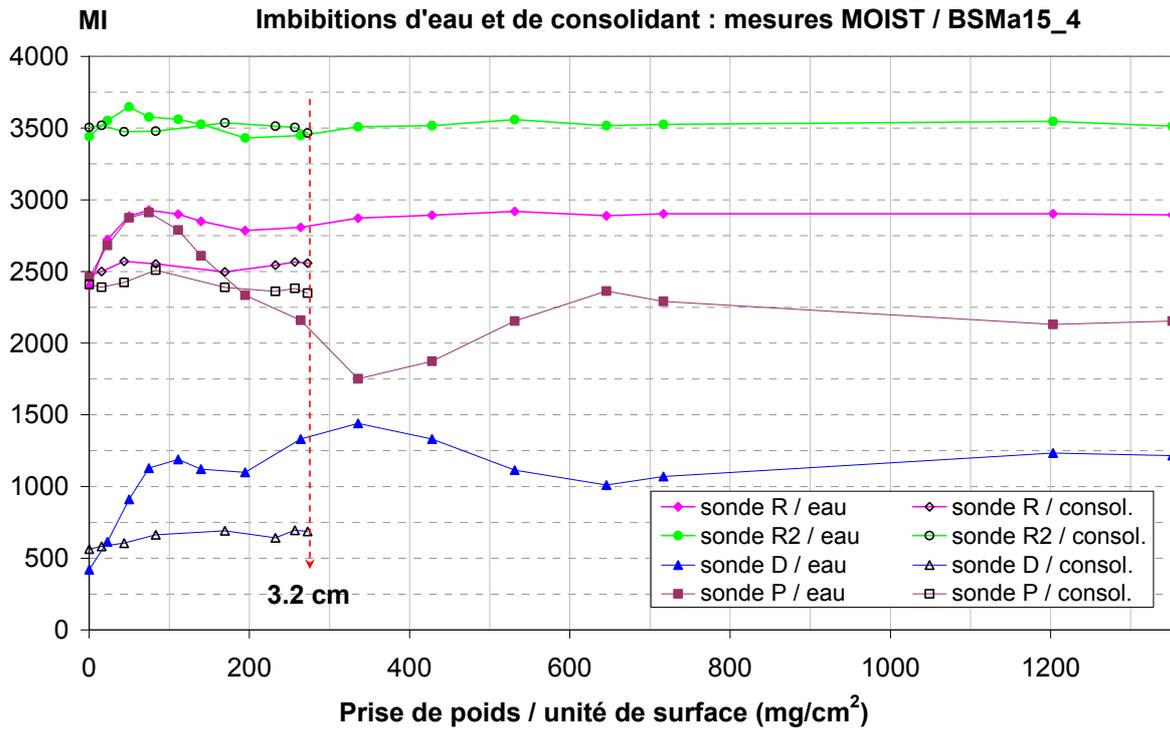


Figure 41 Index d'humidité (MI) mesurés pendant l'imbibition capillaire à l'eau (symboles pleins) puis pendant l'application de consolidant (symboles vides) effectuées sur un cube de grès de Maintal.

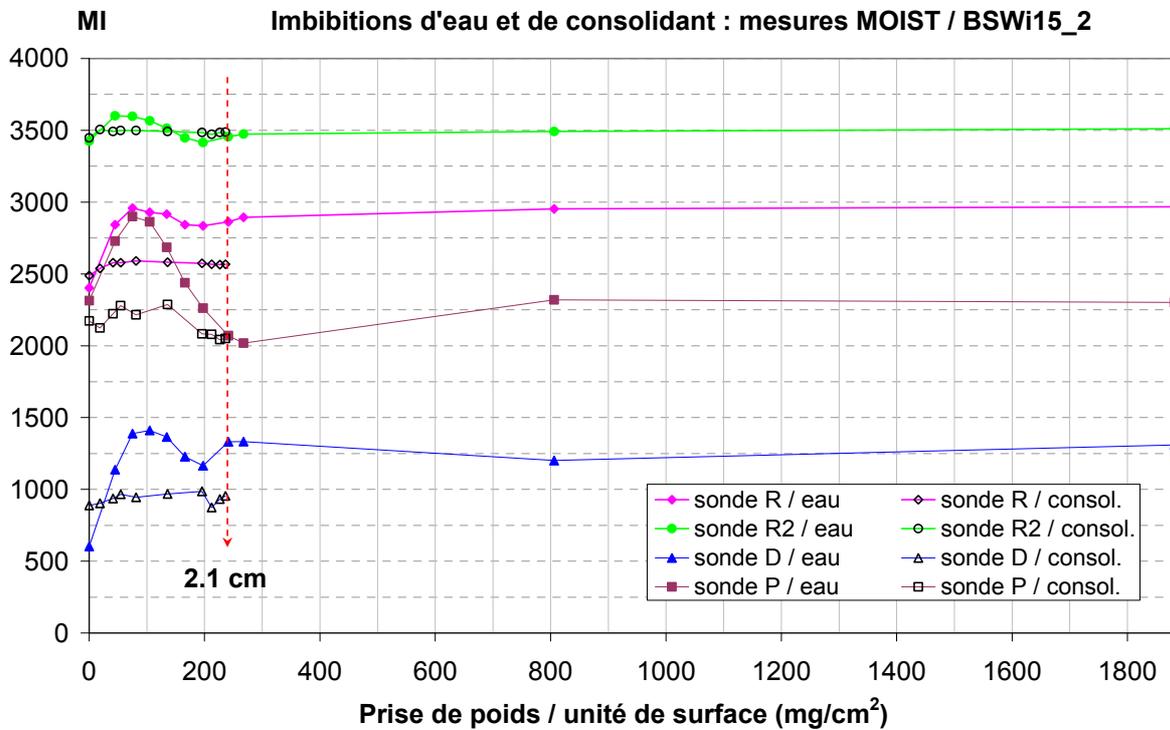


Figure 42 Index d'humidité (MI) mesurés pendant l'imbibition capillaire à l'eau (symboles pleins) puis pendant l'application de consolidant (symboles vides) effectuées sur un cube de grès de Wiesental.

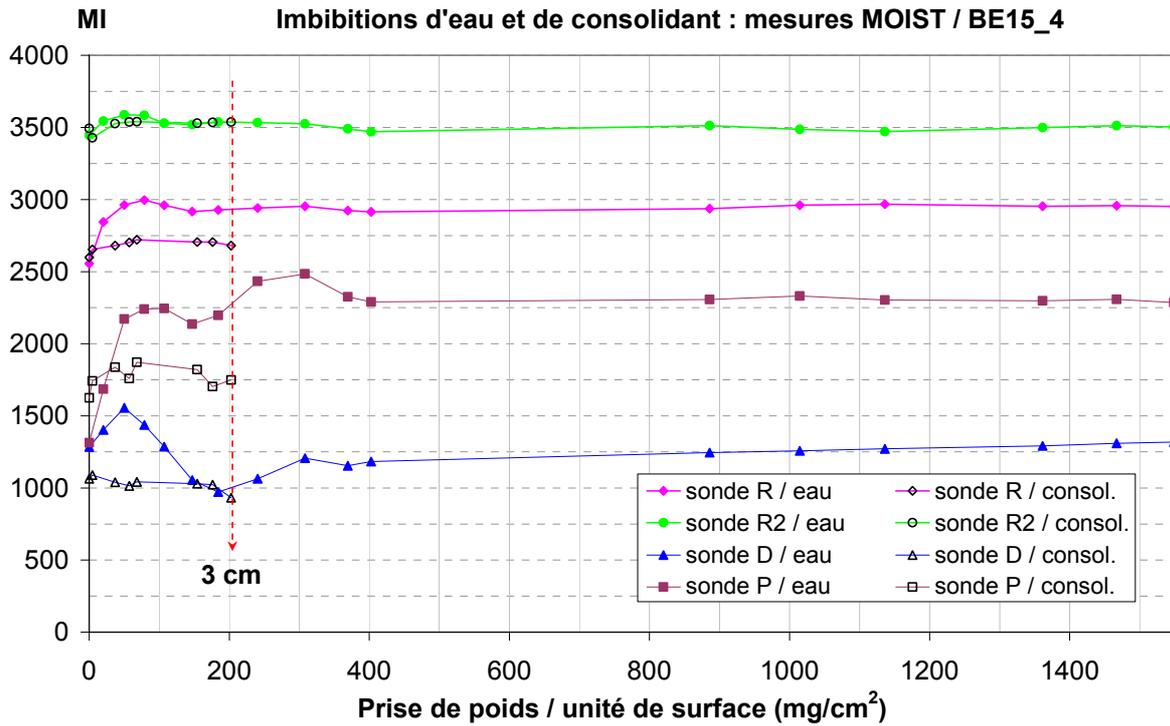


Figure 43 Index d'humidité (MI) mesurés pendant l'imbibition capillaire à l'eau (symboles pleins) puis pendant l'application de consolidant (symboles vides) effectuées sur un cube de grès de Gurten.

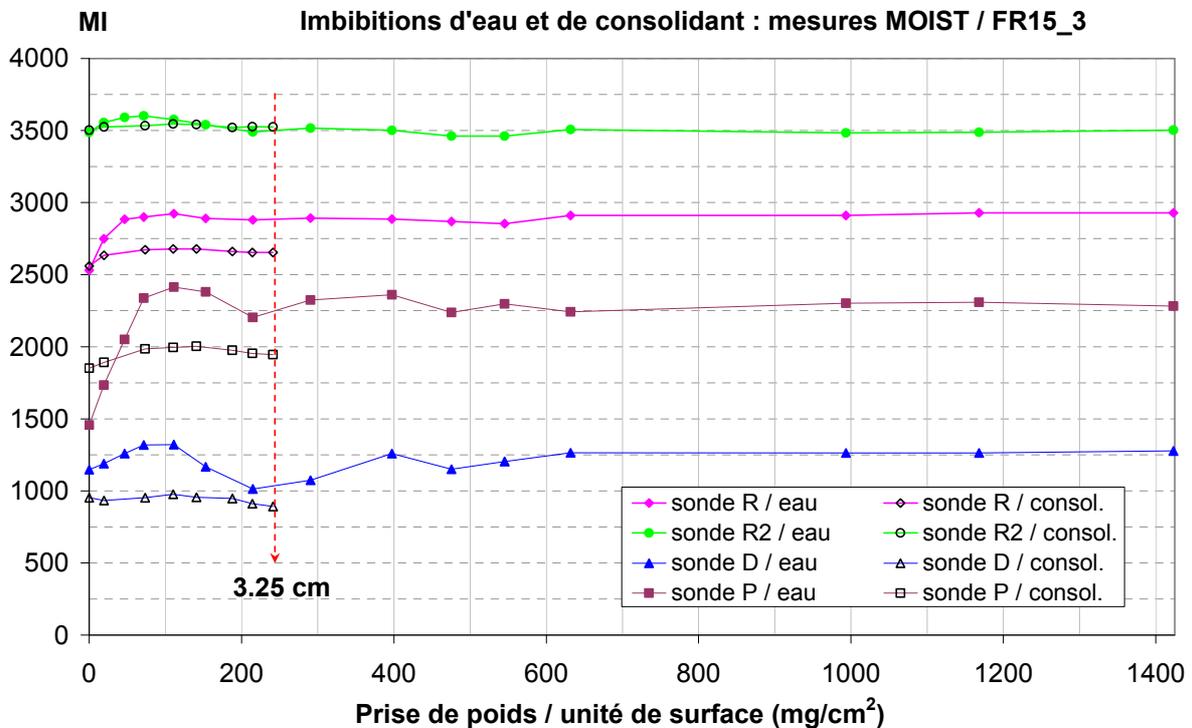


Figure 44 Index d'humidité (MI) mesurés pendant l'imbibition capillaire à l'eau (symboles pleins) puis pendant l'application de consolidant (symboles vides) effectuées sur un cube de molasse de Villarlod.

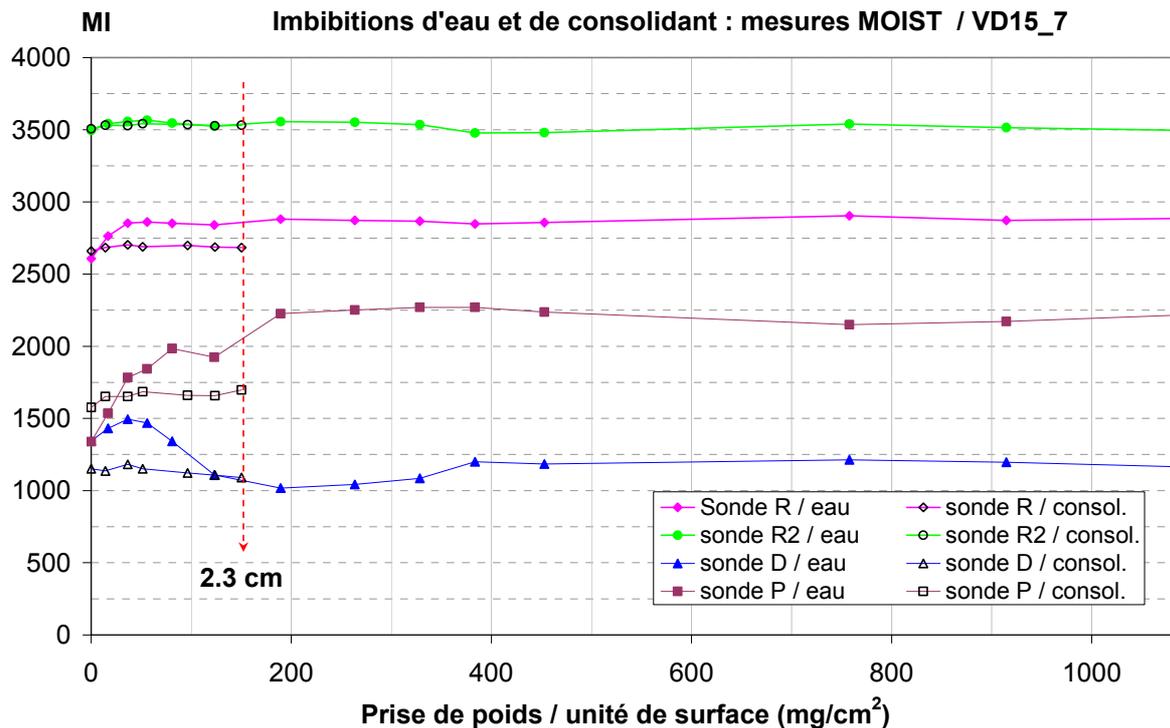


Figure 45 Index d'humidité (MI) mesurés pendant l'imbibition capillaire à l'eau (symboles pleins) puis pendant l'application de consolidant (symboles vides) effectuées sur un cube de molasse de la Mercerie.

Ces résultats montrent que les MI fournis par l'appareil MOIST 200B ne permettent, ni d'évaluer la quantité de consolidant ayant pénétré dans un échantillon, ni la profondeur que le produit a atteint. Comme dans le cas d'une imbibition capillaire à l'eau, les MI fournis par les quatre sondes ont d'abord tendance à croître avec la profondeur de pénétration atteinte par le consolidant. Toutefois ces augmentations sont beaucoup plus faibles que dans le cas de l'eau et après que la frange capillaire de consolidant ait atteint environ 1 cm de profondeur, les index d'humidité tendent parfois à diminuer puis à osciller comme dans le cas de l'eau, rendant impossible l'interprétation des résultats en terme de profondeur de pénétration ou de quantité de produit absorbé (cf. § précédent).

Comme on peut le constater sur les figures 41 à 45, pour les mêmes échantillons et les mêmes sondes, le MOIST 200B fournit des index d'humidité différents à l'état "sec" (prise de poids = 0) avant imbibition capillaire et à l'état "sec" avant consolidation. Cette différence est certainement liée à la quantité d'eau adsorbée différente dans l'un et l'autre cas : avant imbibition capillaire à l'eau, les échantillons étaient en équilibre avec l'humidité relative du laboratoire, soit une humidité relative faible comprise entre 19 et 39%, alors qu'avant l'application de consolidant, les échantillons ont été conditionnés dans des enceintes à 75% d'humidité relative. Par conséquent la quantité d'eau adsorbée sur les parois des pores avant application des consolidants était supérieure à celle présente avant imbibition capillaire à l'eau et l'appareil MOIST 200B semble avoir fait la différence.

6.2 Conductivimétrie électrique

Les pourcentages d'humidité reportés dans ce qui suit a été lu directement sur l'affichage digital de l'appareil. Il représente le poids d'eau contenu dans le matériau rapporté au poids sec de ce dernier.

6.2.1 Mesures effectuées en cours d'adsorption de vapeur d'eau

L'ensemble des teneurs en eau mesurées par le conductivimètre COMBO 200 pendant l'adsorption de vapeur est reporté sur la figure 46 en fonction de l'humidité relative de conditionnement des échantillons.

Ces résultats montrent que les teneurs en eau fournies par le COMBO 200 ont tendance à augmenter avec l'humidité relative dans laquelle est conditionnée l'échantillon. En raison des conditions expérimentales non optimales (les échantillons n'avaient pas vraiment atteint l'équilibre parfait lorsque les mesures ont été effectuées, cf. note de bas de page 26, p. 80), il n'est pas possible de définir exactement la relation qui existe entre la teneur en eau donnée par le COMBO 200 et l'humidité relative dans laquelle les pierres sont conditionnées. Comme dans le cas de la réflexion des micro-ondes, il est possible qu'en répétant les expériences dans des conditions idéales, le conductivimètre COMBO 200 puisse être étalonné pour déterminer *in situ* la quantité d'eau adsorbée dans la porosité d'un matériau donné, à condition que les pierres exposées ne contiennent pas de sels solubles. Notons que les résultats présentés ici concernent des mesures de surface. En creusant des trous de 8 mm de diamètre dans les matériaux, l'appareil pourrait peut-être aussi être étalonné pour estimer la quantité d'eau adsorbée en profondeur.

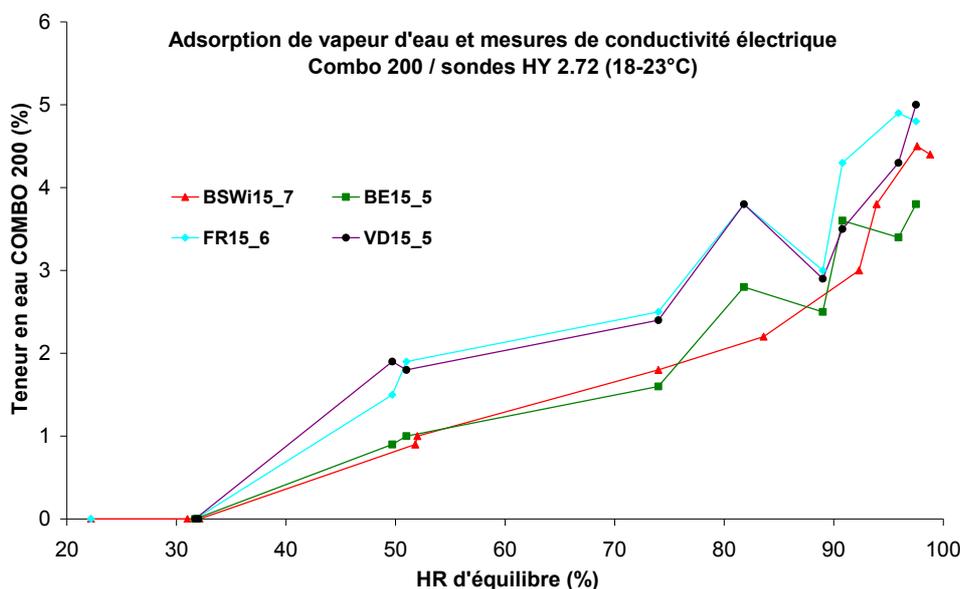


Figure 46 Teneur en eau mesurées sur des cubes de 15 cm d'arête à l'équilibre à différentes humidités relatives avec les sondes HY2.72 du conductivimètre COMBO 200. Rouge : grès de Wiesental, vert : grès de Gurten, turquoise : molasse de Villarlod et noir : molasse de la Mercerie. La température de surface des matériaux lors des mesures était comprise entre 18 et 23°C.

6.2.2 Mesures effectuées en cours d'imbibition capillaire à l'eau

L'ensemble des teneurs en eau données par le COMBO 200 pendant les imbibitions capillaires est reporté sur la figure 47 en fonction de la prise de poids en eau rapportée à l'unité de surface d'imbibition.

Pendant les mesures, il est vite apparu que l'appareil COMBO 200 n'était pas adapté à l'évaluation de la quantité d'eau capillaire dans le réseau poreux, du moins pas par une mesure de surface. En effet, comme le montre la figure 47, pour toutes les pierres, les teneurs en eau fournies par l'appareil oscillent entre 5 et 8%, quelle que soit la véritable quantité d'eau contenue dans l'échantillon. Ceci s'explique par le fait que la quantité d'eau présente dans les premiers millimètres de roche en contact avec l'eau lors de l'imbibition capillaire reste plus ou moins la même indépendamment de la progression de la frange capillaire vers la profondeur. L'appareil mesurant la conductivité électrique le long du chemin le plus court séparant les deux sondes et ces deux sondes étant en contact avec seulement quelques microns de matière superficielle, il est insensible à la profondeur de pénétration de l'eau capillaire.

Ceci nous a été clairement démontré par les mesures effectuées sur les échantillons BE15_2, BSWi15_12 et BSWi15_13 pour lesquels les mesures ont été poursuivies jusqu'à ce que la frange capillaire atteigne respectivement 14, 12 et 11.5 cm. Les mesures effectuées sur les quatre autres échantillons jusqu'à ce que les franges capillaires atteignent une profondeur de l'ordre de 1 cm n'ont été faites que pour confirmer les premières observations (cf. figure 47).

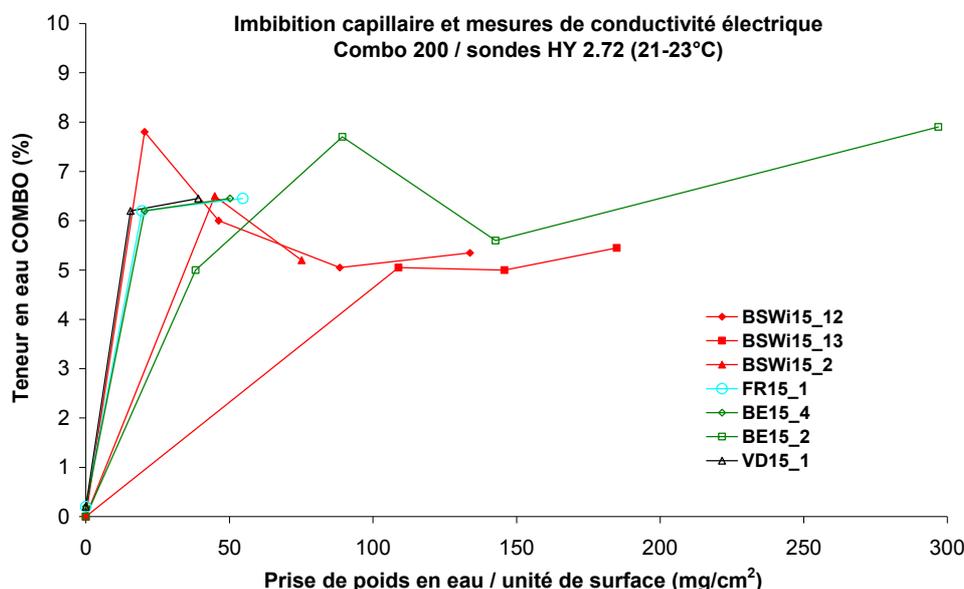


Figure 47 Teneur en eau mesurées avec les sondes HY2.72 du conductivimètre COMBO 200 pendant les imbibitions capillaires effectuées sur des cubes de 15 cm d'arête. Rouge : grès de Wiesental, vert : grès de Gurten, turquoise : molasse de Villarod et noir : molasse de la Mercerie. La température de surface des matériaux lors des mesures était comprise entre 21 et 23°C.

Notons encore que les oscillations observées pour les échantillons BE15_2, BSWi15_12 et BSWi15_13 correspondent à la différence de pression appliquée sur les sondes : nous avons constaté que plus la pression exercée sur la sonde était importante, plus la teneur en eau fournie par l'appareil était grande et une très faible variation de pression entraînait une variation du résultat non négligeable.

Ces résultats montrent donc que l'appareil COMBO 200 ne permet pas, par une mesure de surface non destructive, d'évaluer la quantité d'eau capillaire présente dans l'échantillon sur lequel est effectué la mesure. Par conséquent, aucune mesure n'a été faite avec cet appareil lors de l'application de consolidant.

7 Synthèse et questions ouvertes

Au commencement de cette étude nous espérions que, par une mesure de surface non destructive, l'appareil MOIST 200B - émetteur et récepteur de micro-ondes - pourrait nous indiquer la profondeur de pénétration et la quantité de liquide (eau ou consolidant) ayant pénétré dans une pierre à la surface de laquelle ce liquide serait appliqué. Malheureusement, les résultats montrent que - pour les matériaux testés du moins - les valeurs fournies par l'appareil MOIST 200B ne peuvent être utilisées ni pour estimer la teneur en liquide du matériau, qu'il s'agisse d'eau ou de consolidant, ni pour évaluer la profondeur de pénétration de ce liquide.

Quant au conductivimètre COMBO 200, que nous souhaitons utiliser pour confirmer ou préciser les informations fournies par le MOIST, les essais effectués au cours de cette étude ont montré qu'il n'était pas du tout adapté à des mesures de surface non destructives sur les pierres. Il est possible qu'il puisse être utile lors de mesures de profondeur dans des trous percés à cet effet et impliquant donc une destruction du matériau. Toutefois, le fait que les résultats fournis par ce genre d'appareil soient fortement perturbés par la présence de sels solubles, laisse augurer de nombreuses difficultés d'interprétation dans le cas de mesures *in situ*, sur des pierres altérées toujours plus ou moins chargées en sels.

Cette étude, nous a néanmoins permis de mieux connaître les porosités et cinétiques capillaires des matériaux mis à disposition par les 4 cathédrales, c-à-d les grès du Buntsandstein de Maintal et de Wiesental pour la cathédrale de Bâle, la molasse bernoise ou grès de Gurten pour la cathédrale de Berne, la molasse fribourgeoise de Villarod pour la cathédrale de Fribourg et enfin la molasse aquitanaise ou molasse grise de Lausanne de la Mercerie pour la cathédrale de Lausanne.

De plus, les résultats permettent de mieux comprendre les phénomènes qui régissent la pénétration des liquides dans une pierre par imbibition capillaire. Nous démontrons d'une part, que les cinétiques d'imbibition capillaire effectuées sur des échantillons identiques d'une même pierre mais avec des fluides mouillants différents ne sont pas identiques, la nature du fluide jouant un rôle non négligeable dans ces cinétiques et d'autre part, que les cinétiques d'imbibition capillaires effectuées avec un même liquide mouillant sur des échantillons de formes identiques mais de pierres légèrement différentes ne sont pas non plus identiques, les structures poreuses influençant aussi de manière très importante ces cinétiques.

Ainsi, nous savons à présent qu'aucun test de laboratoire ne permettra de déterminer la quantité de consolidant à appliquer pour assurer la consolidation optimale. Pratiquement, ceci implique que la meilleure façon d'appliquer un consolidant est une application "à refus". Toutefois cette notion de "refus" est à définir précisément au cas par cas²³ : comme le montrent nos résultats, la quantité maximale de liquide absorbable par unité de temps et de surface d'application ainsi que la profondeur de pénétration correspondante, dépendent de la

²³ « Jusqu'à refus » ne signifie pas que l'on doit appliquer autant de produit que nécessaire pour qu'il coule sur la surface, mais jusqu'à ce que la pierre n'absorbe plus. En cas de doute, il est préférable de s'arrêter avant le « refus », car il nous semble beaucoup plus problématique de mettre trop de produit consolidant que pas assez.

nature et de l'état de la pierre, de la méthode d'application et de la nature du produit (il est aussi probable que la présence de sels solubles ou d'anciens produits de traitement sur la surface et/ou dans la porosité influencent beaucoup cette quantité absorbable). Ainsi, pour atteindre une profondeur de pénétration de 1 cm par exemple, la quantité et la cinétique d'application de cette quantité ne sera pas identique sur une pierre x et sur une pierre y. L'application doit donc toujours être ajustée au cas par cas, édifice par édifice, pierre par pierre et même portion de pierre par portion de pierre pour les pierres affectées par des altérations inhomogènes ou graduelles, c-à-d dans la majorité des cas.

Par conséquent, l'application des consolidants ne peut pas être "mécanisée", l'œil et l'expérience de l'applicateur étant absolument nécessaire pour faire ces ajustements. D'après cette étude, tout test de laboratoire donne un résultat trop éloigné de la réalité et aucune technique non destructive peu coûteuse²⁴ ne semble actuellement permettre un contrôle (puis un suivi) des traitements de consolidation *in situ*. Ainsi, la seule façon de savoir exactement comment un consolidant pénètre et se répartit dans une pierre donnée, avec un état d'altération donné, est de procéder à des tests destructifs *in situ*. En assistant aux traitements et en effectuant quelques tests destructifs de contrôle, nous espérons pouvoir guider les applicateurs pour effectuer au mieux ces ajustements.

De plus, pour assurer un suivi intelligent et utile des essais de consolidation dans le temps, les cas d'étude montrent qu'il est absolument primordial de documenter les interventions et de les documenter de façon pertinente et utilisable lorsque des personnes étrangères aux traitements voudront les comprendre dans quelques années, voire quelques dizaines d'années (Bläuer et al., 1988). Nous pensons pouvoir aider à constituer une telle documentation.

Cette étude nous a aussi permis d'en apprendre plus sur les consolidants à base de silicates d'éthyle et de nous poser des questions sur leur efficacité et leur durabilité. En effet, nous sommes en droit de nous demander quel rôle joue exactement le gel de silice qui se forme lors de leur séchage. Comment peut-il redonner une cohérence à des grains de sable très désolidarisés ? Est-il raisonnable de consolider toutes les formes d'altérations que l'on rencontre sur les grès ? Sinon, quelles sont les formes d'altération "consolidables" et quelles sont celles qui ne peuvent pas être consolidées ? Quelles sont donc les limites d'utilisation de ces produits ?

D'autre part, par nos lectures et nos discussions avec des spécialistes nous avons pris conscience que les conditions d'humidité et de température régnant lors de l'application de ces produits ne peuvent pas être quelconques et que les conditions optimales - comme par exemple la quantité d'eau adsorbée présente dans le réseau poreux au moment de l'application - varient en fonction de la nature minéralogique et/ou de la structure poreuse de la pierre à traiter. Et il nous est à présent évident que les relations exactes entre conditions environnementales et consolidation ne sont pas clairement définies. Il nous semblerait donc important de mieux comprendre ces relations et de déterminer plus précisément quelles sont les conditions limites pour chaque type de pierre.

Ensuite, nous sommes en droit de nous poser des questions sur l'influence des molécules qui restent hydrophobes après la formation du gel ainsi que sur l'influence du gel de silice lui-

²⁴ Nous rappelons que d'après notre étude bibliographique (CSC, 2007), à part la réflexion des micro-ondes - que nous avons testée ici et qui s'est avérée inutile - les mesures de NMR (résonance magnétique nucléaire) semblaient pouvoir être utilisées *in situ* de manière non destructive pour renseigner sur la quantité et la profondeur atteinte par un liquide appliqué en surface par capillarité. Toutefois, nous n'avons trouvé aucune étude relatant l'utilisation de cette méthode *in situ* (NMR) et il serait nécessaire de procéder à des essais d'étalonnage avant une application pratique. Or cette méthode étant beaucoup plus coûteuse et plus délicate à mettre en œuvre que la réflexion des micro-ondes, il serait encore plus frustrant d'aboutir à des essais d'étalonnage négatifs.

même : ce gel de silice implique forcément la modification des propriétés de la pierre, tant physiques, que mécaniques ou chimiques. Ainsi, Félix (1994) a montré que la dilatation hydrique (en présence d'eau capillaire) - responsable de l'apparition de faiblesses structurelles et donc d'altérations à moyen ou long terme - est augmentée dans certains faciès de molasse aquitaniennes, résultat corroboré par les observations de Mertz (2006) qui montre qu'un grès Khmer - similaire aux grès rouges du Buntsandstein - présente une dilatation hydrique (en présence d'eau adsorbée) augmentée après traitement avec un silicate d'éthyle. Ces observations prouvent donc que le gel de silice formé, non inerte, peut dans certains cas, accélérer à moyen ou long terme, l'apparition de dégradations de la pierre consolidée et nous donnent envie d'en savoir plus sur l'évolution temporelle inévitable de ce gel de silice, ses interactions avec la pierre et donc la durabilité de la consolidation, que celle-ci soit réelle ou apparente.

Certaines études tendent à prouver qu'il est préférable de ne pas consolider des pierres calcaires avec les silicates d'éthyles, voire impossible (Wheeler, 2005). Pourquoi ? Si tel est vraiment le cas, qu'en est-il de la consolidation des molasses suisses - burdigaliennes ou aquitaniennes - qui sont des grès à ciment calcaire ? D'autres études semblent conclure que la présence de certains sels gêne la gélification des silicates d'éthyle (Wheeler, 2005). Si tel est le cas, que se passe-t-il lors de l'application de ces produits sur des pierres altérées toujours plus ou moins riches en sels solubles ? Enfin, il existe même des études qui concluent qu'il est préférable de ne pas consolider certains types de grès avec les silicates d'éthyle (Hollemann, 1994). Si ces conclusions sont justes, ne doit-on pas repenser toute la consolidation ?

Pour conclure, il ressort de cette étude qu'il n'est pas possible de pronostiquer les conséquences exactes d'une consolidation aux silicates d'éthyle sur la durabilité de la pierre traitée et que par conséquent, une telle consolidation ne doit jamais être utilisée comme méthode de conservation préventive mais seulement et exclusivement comme remède.

8 Glossaire

A	Coefficient de capillarité massique = cinétique capillaire massique	$[M/L^2 \cdot T^{1/2}]$
A'	Coefficient de capillarité volumique = cinétique capillaire volumique	$[L^3/L^2 \cdot T^{1/2}]$
A ^d	Coefficient de diffusion massique intervenant lorsque l'imbibition s.s. est terminée et que l'alimentation en liquide est maintenue	$[M/L^2 \cdot T^{1/2}]$
B	Coefficient de capillarité linéaire = cinétique capillaire linéaire	$[L/T^{1/2}]$
HR	Humidité relative	[%]
MI	Moisture index = index d'humidité donné par le MOIST 200B, nombre sans dimension compris entre 0 et 4000 qui dépend de la nature et de l'état hydrique du matériau sur lequel est effectuée la mesure	[-]
P _d	Poids	[M]
P _{dc}	poids de l'échantillon en fin d'imbibition capillaire au moment de la rupture de pente de la prise de poids	[M]
P _{d1}	Poids de l'échantillon totalement imbibé d'eau sous vide, obtenu par pesée hydrostatique	[M]
P _{d2}	Poids de l'échantillon totalement imbibé d'eau sous vide, obtenu par pesée hydrostatique	[M]
P _{ds}	Poids sec	[M]
P _{ot}	Porosité totale = volume des vides total / volume des vides total +	[%]

	volume de solide	
P_{oc}	Porosité capillaire = volume des vides librement occupé par l'eau pendant une imbibition capillaire / volume des vides total + volume de solide	[%]
P_{op}	Porosité piégée = $P_{ot} - P_{oc}$ = volume d'air piégé par l'eau pendant une imbibition capillaire / volume des vides total + volume de solide	[%]
S	Coefficient d'Hirschwald = coefficient de saturation capillaire = P_{oc}/P_{ot} = volume des vides librement occupé par l'eau pendant une imbibition capillaire / volume des vides total	[%]
V	Volume	[L ³]
V _{ads}	Volume de vapeur d'eau adsorbée aux parois des pores pour une humidité relative donnée	[L ³]
V _{capil}	Volume des vides librement occupé par l'eau à la fin d'une imbibition capillaire s.s.	[L ³]
V _p	Volume poreux = volume des vides	[L ³]
V _t	Volume total = V _p + V _s	[L ³]
V _s	Volume de la phase solide uniquement	[L ³]
ΔP_d	Variation du poids	[M]

9 Bibliographie

Amoroso G.G. & Fassina V., 1983. Stone decay and conservation. Atmospheric pollution, cleaning, consolidation and protection. Elsevier, Amsterdam, Lausanne, Oxford, New York.

Bläuer C., Martin, B., Morariu D., Schwizer B., and Widmer, P., 1988. Nachkontrolle und Begleitung von Restaurationen an Sandsteinfassaden - Tafeln und Beilagen. Ein Projekt des NFP 16: Methoden zur Erhaltung von Kulturgütern. (unpublizierter Bericht:) Geologisches Institut der Universität Bern.

CSC, 2007 - Projet "4 cathédrales" : étude de littérature préliminaire. Réunion du 5 juin 2007

Feirrer Pinto, A.P. and Delgado Rodrigues, J., 2008. Stone consolidation: The role of treatment procedures. Journal of Cultural heritage 9 (2008) 38-53.

Félix C., 1994. Déformations de grès consécutives à leur consolidation avec un silicate d'éthyle. Proceedings of the 17th Congress on the Int. Association of Engineering Geology, vol. V, Lisboa (Portugal), September 5-9, 1994. R. Oliviera, L.F. Rodrigues, A.G. Coelho & A.P. Cunha Ed., A.A. Balkema, 1994, 3543-3550

Fischer C., 1993. Importance des propriétés pétrophysiques et des interactions physico-chimiques dans l'hydrofugation des roches par des silicones. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg. 237p.

Göller A., 1999. Moisture mapping - Flächen- und tiefenaufgelöste Feuchtemessung mit dem MOIST-Verfahren, Feuchtetag '99 Umwelt · Meßverfahren · Anwendungen 7./8. Oktober 1999, BAM, Berlin

- Göller A., 2000. Schadensdiagnose, Aufnehmen + Deuten, Feuchtemessung im Raster – das Moisture Mapping / 2. Teil. Bautenschutz + Bausanierung, Heft 08, 33-36.
- Göller A., 2007. Mikrowellenbasierte Rasterfeuchtemessung - Moderne Konzepte der Feuchtemessung in Bauwerken. Bautechnik, 6/2007, 417-422
- Holleman M., 1994. "Überprüfung von ausgewählten Kieselsäurehaltigen Festigern an verwittertem Sandstein." unpubl. Diplomarbeit, Fachhochschule Köln, Fachbereich Restaurierung.
- Horie C.V., 1987. Materials for conservation. Organic consolidants, adhesives and coatings. Architectural Press.
- Mertz J.D., 2006. Salt damage, dilation and actual practices in sandstone conservation. Actes du colloque des architectes de cathédrales à Strasbourg, 2006, Dombaumeister E.V., 153-156.
- Price C., 2006. Consolidation. In Henry Alison Ed., Stone Conservation. Principles and Practice. Donhead.
- Wendler E., 2008. Communication personnelle.
- Wheeler G., 2005. Alkoxysilanes and the Consolidation of Stone. The Getty Conservation Institute, Serie: Research in Conservation.

Fribourg, le 23 février 2009

Bénédicte Rousset
Dr en pétrophysique

Christine Bläuer
Dr en minéralogie

Distribution :

Cathédrale de Bâle : 3 exemplaires imprimés + un fichier .pdf
Cathédrale de Berne : 3 exemplaires imprimés + un fichier .pdf
Cathédrale de Fribourg : 3 exemplaires imprimés + un fichier .pdf
Cathédrale de Lausanne : 3 exemplaires imprimés + un fichier .pdf

ANNEXE 1 - QUELQUES INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES SUR LES GRÈS ÉTUDIÉS

A1.1 GRÈS DE MAINTAL (MÜNSTER DE BÂLE, BS)

A1.1.1 Géologie, minéralogie, pétrographie

Gäbert & Steuer, 1915, p.459 : «Mainsandstein = a) Sandstein des Buntsandsteins, meist rötlich bis rot gefärbt, Bettingen, Wertheim, Boxthal, Reistenhausen usw. (mittlerer Buntsandstein), ...»

Grimm, 1990, p.134 : «Umgebung von Wertheim [...] Gestein 087 [...] Wüstenzeller Sandstein; roter feinsandiger Buntsandstein, Plattensandstein („Roter Mainsandstein“); Oberer Buntsandstein [...] feinsandiger, homogener, roter, teils rotbrauner bis rotvioletter Sandstein mit Tongallen und einem deutlichen Hellglimmergehalt auf den Schicht- bzw. Spaltflächen; Sandstein meist plattig aber auch massig ausgebildet.»

A1.1.2 Porosité, propriétés physiques et mécaniques

Grimm, 1990 : Wüstenzeller Sandstein, Gestein 087 ; densité réelle = 2.68 ; densité apparente = 2.38 ; Porosité 11.05% (vol.) ; Porosité capillaire = 3.08 % (en poids) ; Prise d'eau sous vide = 4.64 % (en poids) ; Coefficient d'Hirschwald S = 0.66.

Félix (1996a) compare certaines propriétés de ce grès à celles de diverses molasses suisses.

A1.1.3 Formes de dégradation

On trouve des généralités concernant les formes de dégradations dans de Quervain (1983 ; 1945, p.41).

Les formes d'altération qui affectent ces pierres sont similaires à celles qui affectent les grès vosgiens pour lesquels des informations sont données par Jeannette (1997).

A1.2 GRÈS DE WIESENTAL (MÜNSTER DE BÂLE, BS)

A1.2.1 Géologie, minéralogie, pétrographie

Selon de Quervain (1969) (p.202) : « Der obere Buntsandstein (sog. Plattensandstein) enthält gleichmässiger und tiefer rote, feiner körnige Sandsteine, die sich auch für Steinmetz- und Bildhauerarbeiten eignen. Hier war das Wiesental Hauptlieferant für Basel. Eine gewisse Bedeutung hatten zeitweise Vorkommen bei *Riehen*, wo gut gebankte Sandsteine etwas unterschiedlicher Festigkeit und Färbung abgebaut wurden. Auch bei Maisprach und Buus bestanden kleine Brüche. »

D'après de Quervain (1983) p.1 : « Rote Sandsteine des Oberen Buntsandsteins, z.T. auch als Plattensandstein bezeichnet. Merkmale: Wesentlich feiner- und vor allem homogener körnig als Mittlerer Buntsandstein. Lagig-plattige Ausbildungen ebenfalls vorkommend. Farbe meist tief rot, oft etwas fleckig oder streifig. Neben Quarzkörnern viel Feldspat (von Auge selten deutlich), einzelne Glimmerblättchen, meist kalkfrei. Festigkeit sehr unterschiedlich (im gleichen Bruch lagenweise wechselnd) und damit auch die bevorzugte Anwendung. Für Bildhauerzwecke dienen nur die ganz homogenen, meist weicheren Arten.

Wetterbeständigkeit ziemlich unterschiedlich. Herkunft: Hauptbrüche im Wiesental (Hauingen, Steinen, Maienbühl bei Riehen) und um Inzlingen »

A1.2.2 Porosité, propriétés physiques et mécaniques

Aucune donnée se rapportant à ces propriétés n'ont été trouvées, du moins dans la littérature citée ici. On peut supposer que ces propriétés pétrophysiques du grès de Wiesental sont très proches de celles des grès vosgiens. Pour celles-ci, voir Jeannette, 1997.

A1.2.3 Formes de dégradation

On trouve des généralités concernant les formes de dégradations dans de Quervain (1945 et 1983).

Les formes d'altération qui affectent ces pierres doivent être similaires à celles qui affectent les grès vosgiens pour lesquels des informations sont données par Jeannette (1997).

A1.3 GRÈS (MOLASSE) DE GURTEN (MÜNSTER DE BERNE, BE)

A1.3.1 Géologie, minéralogie, pétrographie

Le contexte géologique dans lequel s'est formée cette pierre est décrit par Gerber (1982).

Il s'agit d'une arkose (grès contenant beaucoup de feldspaths) riche en glauconite à ciment calcaire ; la granulométrie de ses constituants est généralement comprise entre 0.2 et 0.4 mm. Pour plus d'informations, voir Bläuer, 1987.

Des informations concernant les carrières et l'utilisation de cette pierre sont fournies par Niggli et al., 1915 (p.116-120).

A1.3.2 Porosité, propriétés physiques et mécaniques

Bläuer (1987) donne des valeurs de porosité totale, porosité et cinétiques d'imbibition capillaire ainsi que le contenu en sels solubles de pierres de carrière.

Félix (1996a) compare certaines propriétés de cette pierre à celles de diverses molasses suisses et du grès de Maintal, tandis que Niggli et al. (1915) donnent quelques informations sur la porosité capillaire et la résistance à la compression (p.116-120).

A1.3.3 Formes de dégradation

Bläuer (1987) met en évidence les relations qui existent entre les formes de dégradations qui affectent cette pierre et leurs conditions d'exposition.

Les types de dégradation sont aussi données par de Quervain (1945, p. 39).

De Quervain et Jenny (1951) se réfèrent à une étude de laboratoire visant à déterminer la résistance aux dégradations.

A1.4 MOLASSE DE VILLARLOD (CATHÉDRALE DE FRIBOURG, FR)

A1.4.1 Géologie, minéralogie, pétrographie

Il s'agit d'une arkose (grès contenant beaucoup de feldspaths) riche en glauconite à ciment calcaire ; la granulométrie de ses constituants est généralement comprise entre 0.1 et 0.5 mm. Cette pierre est très similaire à la molasse bernoise. Une description détaillée de la pierre de carrière a été établie par Félix (1977).

Des informations concernant les carrières et l'utilisation de cette pierre sont fournies par Niggli et al., 1915 (p.123-130) ; voir plus particulièrement, Beauregard p. 127 (Gestein-Nr. 1218) et Villarod p. 128, (Gestein Nr. 1219).

De Quervain (1983), relate l'histoire de l'utilisation de cette pierre.

A1.4.2 Porosité, propriétés physiques et mécaniques

Félix (1977) donne diverses valeurs : porosité totale, porosité capillaire, comportement au séchage, contenu en sels solubles de pierres de carrière, dureté.

Félix (1996a) compare certaines propriétés de cette pierre à celles de diverses molasses suisses et du grès de Maintal.

Niggli et al. (1915) donnent quelques informations sur la porosité capillaire et la résistance à la compression (p.123-130)

A1.4.3 Formes de dégradation

Les formes de dégradations de la molasse fribourgeoise sont très similaires à celles du grès bernois et pourraient être discutées ensemble.

A1.5 MOLASSE DE LA MERCERIE (CATHÉDRALE DE LAUSANNE, VD)

A1.5.1 Géologie, minéralogie, pétrographie

Kündig, 1997, p.183 : « Oligozäne Sandsteine der flachen Molasse: Im Genferseegebiet sind dieses Sandsteine, hier „Molasse grise“ genannt, vom 12. bis etwa ins 18. Jahrhundert von grosser Wichtigkeit gewesen; später wurden sie durch beständigere Sandsteinsorten völlig verdrängt. Bedeutende Brüche befanden sich im Gebiet von Lausanne; die belieferten neben der Stadt auch eine weitere Umgebung, [...] Bei Morges und am Westende des Léman wurden einige Vorkommen hart am Seeufer abgebaut, so dass die Brüche nur zur Winterzeit bei Niedrigwasser betrieben werden konnten... »

de Quervain, 1969, p.213 : « ...oligozänene Molasseschichten (Aquitaniens und Chattien) enthalten innerhalb der vorwiegenden Mergel zahlreiche Sandsteinbänke von sehr unterschiedlicher Beschaffenheit. Teils sind sie weich und porös, analog den meisten Sandsteinen der marinen Molasse, teils aber auch recht fest und dann oft plattig abgesondert. Meist sind sie von grauer Farbe (deshalb oft „Molasse grise“ benannt); es gibt aber auch bräunliche, gelbliche oder sogar rötliche Lagen. Grosse teils sind sie nur mässig beständig. Doch besitzt man auch Angaben über besseres Verhalten. »

« Das Zentrum der früheren Gewinnung befand sich im Stadtgebiet von *Lausanne* oder in dessen Umgebung. Bekannt waren die Steinbrüche Pissioux und an den Côtes de Montbenon. Lokale Ausbeutungen gab es aber in der ganzen Region, wo bessere Bänke zutage traten...»

de Quervain et Gschwind, 1934, p.260 : « ... In der Umgebung von Lausanne bis gegen den Neuenburger See sind graue, gutbankige Sandsteine verbreitet, die in verschiedener Beziehung an die Plattensandsteine der östlichen und zentralen Schweiz erinnern. Sie ... sind allem Anschein nach nur teilweise marin. Sie liegen unter den Schichten der eigentlichen marinen Molasse an der Grenze von Oligozän (Aquitain) und Miozän (Burdigalien). Petrographisch erinnern die se Sandsteine stark an die Berner Molasse. Sie sind ebenfalls weich und grossenteils auch nicht besonders wetterbeständig, immerhin besitzt man auch Angaben über besseres Verhalten von einigen Varietäten. Wie der Name besagt, sind sie von grauer Farbe. »

de Quervain (1983) cite en p. 132 "Akten aus der Bauzeit" : "En 1228 est signalée la "vienne carrière" dans la région de la Barre ou du Calvaire, au nord de la Cité" et "vers la Tyollère que le Chapitre se réserve en 1265 des droits d'extraction."

Des informations concernant les carrières et l'utilisation de cette pierre sont fournies par Niggli et al., 1915 (p. 152-156) ; voir plus particulièrement, "Pierre de Belmont" p.152 (Gestein-Nr. 312) : «... Oberes Aquitanien; Bänke von je 3m Dicke Cathédrale und Eglise St. François in Lausanne; Historisches: 1907 von A. Blardone übernommen. Vorkommen in der Umgebung des Bruchs: In der Umgebung überall, ziemlich parallel zur Oberfläche. »

A1.5.2 Porosité, propriétés physiques et mécaniques

Niggli et al. (1915) donnent quelques informations concernant la porosité capillaire et la résistance à la compression (p.152-156).

Félix (1996a) compare certaines propriétés de cette pierre à celles de diverses molasses suisses et du grès de Maintal (p.3, tableau 1 la Molasse de Lausanne est listée comme une pierre à part, mais dans le texte il ne fournit pas d'informations complémentaires).

Dans Gentile et al. (2005), quelques données de porosité et de résistance à la compression, ainsi que quelques autres renseignements tirés de divers rapports non publiés sont donnés (p.15-17).

A1.5.3 Formes de dégradation

de Quervain (1945) donne seulement quelques informations sur les formes de dégradation de cette pierre (par ex., p. 22, fig.37). Dans le rapport Gentile et al. (2005) l'annexe p.58-65 est spécialement consacrée à la "Morphologie des altérations de la molasse" ainsi qu'une annexe du rapport de Mühlhaus Ebersole (2002).

A1.6 BIBLIOGRAPHIE DE L'ANNEXE 1

Amsler, C. (1995). "Une cathédrale de molasse - Lausanne, expériences et perspectives." Proc. 1995 LCP Congress, Conservation et restauration des biens culturels, Montreux, 24.-29. Sept., 29-44.

Bläuer, C. (1987). "Verwitterung der Berner Sandsteine." Unpubl. Dissertation, Universität Bern.

Félix, C. (1977). "Molasses et grès de Villarod (Fribourg)." LPM Fiche technique, 1. Laboratoire des Matériaux Pierreux, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

- Félix, C. (1985). "Altérations desquamantes et composés soufrés d'atmosphérique: cas des grès tendres molassiques de quelques monuments Lausannois." 5th Int. Congr. Deterior. Conserv. of Stone, Laus., 25.-27.09., 391-409.
- Félix, C. (1987). "Essais et critères de choix pour des grès (molasses) de substitution lors de travaux de restauration." Chantiers/Suisse, 18, 419-423.
- Félix, C. (1994). "Déformation de grès consécutives à leur consolidation avec un silicate d'éthyle." 7th International IAEG Congress Balkena, Rotterdam,.
- Félix, C. (1996) a. "Choix de grès tendres du plateau suisse pour les travaux de construction." Conservation et restauration des biens culturels, Actes du Congrès LCP 95. Montreux (Suisse), Septembre 1995, 45-71.
- Félix, C. (1996) b. "Peut-on consolider les grès tendres du plateau suisse avec le silicate d'éthyle?" Conservation et restauration des biens culturels, Actes du Congrès LCP 95. Montreux (Suisse), Septembre 1995, 267-274.
- Gäbert, C., A. Steuer, et al. (1915). "Die nutzbaren Gesteinsvorkommen Deutschlands. Verwitterung und Erhaltung der Gesteine." Erster Band des Handbuch der Steinindustrie. Union Deutsche Verlagsgesellschaft, Berlin.
- Gentile, S, James, J., Rousset, B. & Mühlhaus Ebersole, S. (2005): Cathédrale de Lausanne - UEF, La conservation de la molasse in situ recherches et évaluations (nettoyage / consolidation / colmatage), rapport de synthèse. Novembre 2005.
- Gerber, M. (1982). "Geologie der Berner Sandsteine. (Das Burdigalien zwischen Sense und Langete, Kanton Bern)." unpubl. Diss. Univ. Bern.
- Grimm, W. E. A. (1990). "Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland." Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, 50.
- Holzwarth, D. (1990). "Untersuchungen zur Bausteinverwitterung an der Wernerkapelle in Bacharach im Vergleich zu historischem Bruchmaterial." Unpubl. Diplomarbeit Univ. Mainz.
- Jeannette, D. (1997). "Structures de porosité, mécanismes de transfert des solutions et principales altérations des roches des monuments." La pietra dei monumenti in ambiente fisico e culturale. Atti del 2° Corso Intensivo Europeo tenuto a Ravello e a Firenze dal 10 al 24 aprile 1994, 49-77.
- Kündig, R. (1997). "Die mineralischen Rohstoffe der Schweiz." Kündig R. [Red.] Schweizerische Geotechnische Kommission, Zürich, ETH-Zentrum.
- Mühlhaus Ebersole S. (2002). "Cathédrale de Lausanne - Arcs boutants". Rapport Expert-Center 01407.
- Niggli, P., U. Grubenmann, et al. (1915). "Die natürlichen Bausteine und Dachschiefer der Schweiz." Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, 5. Lieferung.
- Quervain de, F. (1945). "Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz, Teil I." Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, 23. Lieferung.

- Quervain de, F. (1969). "Die nutzbaren Gesteine der Schweiz." Kümmerly & Frey, Bern.
- Quervain de, F. (1983). Gesteinsarten an historischen Bau- und Bildwerken der Schweiz, Aufzeichnungen 1954-1982. Band 2: Basel-Stadt, Basel-Landschaft, Schaffhausen; Band 9: Bern-Jura; Band 10: Freiburg-Genf-Neuenburg-Waadt.
- Quervain de, F. and M. Gschwind (1934). "Die nutzbaren Gesteine der Schweiz." Hans Huber, Bern.
- Quervain de, F. and V. Jenny (1951). "Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz, Teil II. Versuche über das Verhalten der Bausteine gegen die Einwirkung leicht löslicher Salze zur Aufstellung einer allgemeinen Prüfmethode über die Wetterbeständigkeit." Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, 30. Lieferung.

ANNEXE 2 - LES MESURES PÉTROPHYSIQUES EFFECTUÉES

A2.1 MESURE DE LA POROSITÉ "TOTALE"

A2.1.1 Généralités

La porosité d'un matériau poreux est la fraction de volume total occupée par les vides. Si V_t est le volume total de l'échantillon, V_p le volume poreux ou le volume des vides et V_s le volume réel de la phase solide, le pourcentage de porosité (P_{ot}) est donné par la formule suivante :

$$P_{ot} = \frac{V_p}{V_t} \times 100 = \frac{V_t - V_s}{V_t} \times 100 \quad [\%] \quad \text{Équation 1}$$

La porosité d'une roche est un paramètre qui n'est accessible que par une mesure indirecte. Parmi les méthodes de mesure, la saturation par un fluide mouillant donne une bonne estimation de la porosité réelle (Dullien, 1979).

Nous avons choisi ici de mesurer la porosité par la méthode dite "de la triple pesée" ou par imbibition d'eau sous vide. Cette technique est définie par la norme RILEM (essai n°1.1, 1978), qui prévoit que les éprouvettes de roches soient imbibées en l'absence d'air.

A2.1.2 Principe

Le principe de cette mesure est simple : l'échantillon dont on veut connaître le volume poreux est pesé une première fois alors qu'il est sec puis il est pesé à nouveau lorsque tous les vides sont remplis d'eau. La densité de l'eau étant connue, la différence de masse donne le volume d'eau, égal au volume poreux si la totalité de la porosité est envahie par l'eau. Afin d'assurer le remplissage total, l'imbibition des échantillons a lieu sous vide, puis de l'eau dégazée est introduite progressivement dans la porosité.

A2.1.3 Mode opératoire

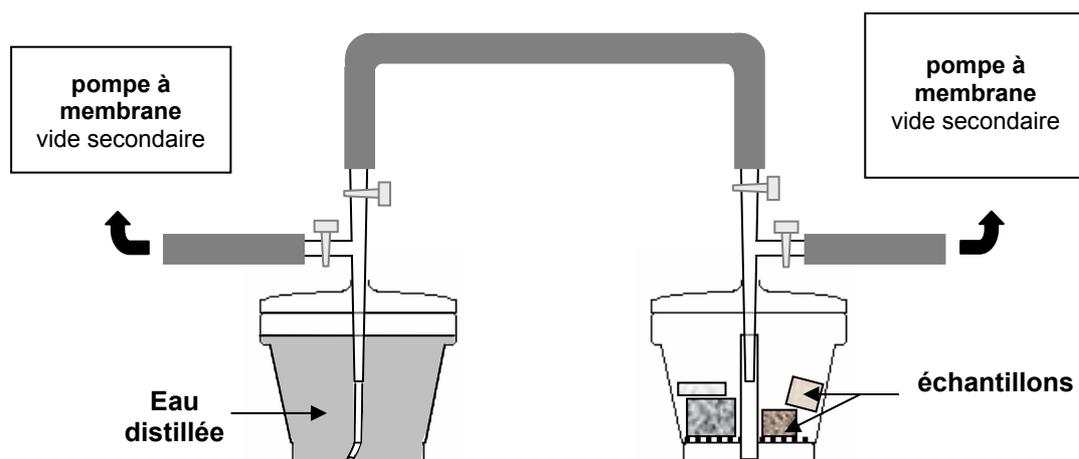


Figure A2.1 Dispositif expérimental de la mesure de porosité totale par imbibition d'eau sous vide

Les échantillons préalablement séchés dans une étuve à 60°C jusqu'à poids constant, sont placés dans un dessiccateur (cf. figure A1.1) où elles sont soumises pendant 24 h à un vide

secondaire, entretenu par une pompe à membrane. Dans un second dessiccateur, de l'eau distillée est dégazée à l'aide d'une pompe assurant elle aussi un vide secondaire. Après 24h de dégazage, les deux dessiccateurs sont reliés, puis le vide est partiellement cassé dans le dessiccateur contenant l'eau afin que les éprouvettes puissent être progressivement imbibées par l'eau depuis leur base ; le niveau d'eau est réajusté au fur et à mesure de la migration de la frange capillaire.

La valeur de la porosité, P_{ot} , est ensuite obtenue par la méthode de la triple pesée : connaissant le poids sec de l'échantillon P_{ds} et son poids imbibé P_{d1} , on obtient le volume poreux occupé en totalité par l'eau ($P_{d1} - P_{ds}$), puis à partir d'une pesée hydrostatique P_{d2} , on peut calculer le volume total de l'éprouvette ($V_t = P_{d1} - P_{d2}$). La porosité P_{ot} de l'échantillon s'exprime par :

$$P_{ot} = \frac{P_{d2} - P_{ds}}{P_{d2} - P_{d1}} \times 100 \quad [\%] \quad \text{Équation 2}$$

- P_{ot} = pourcentage de volume poreux [%]
- P_{d1} = poids imbibé (obtenu par pesée hydrostatique) [kg]
- P_{d2} = poids de l'éprouvette saturée en eau [kg]
- P_{ds} = poids sec [kg]

A2.2 IMBIBITION CAPILLAIRE

A2.2.1 Généralités

Tout milieu poreux insaturé où coexistent au moins deux fluides, est le siège de tensions capillaires. Ces tensions peuvent induire un écoulement de fluide d'un point à un autre du milieu poreux. Dans des conditions d'humectation atmosphériques (précipitation de pluie, alimentation à partir d'une nappe,...) la cinétique d'imbibition capillaire détermine la quantité d'eau absorbée par une roche, et l'étendue de la zone imbibée, où position de la frange d'imbibition comme nous l'avons déjà expliqué en détails au § 2.1.

A2.2.2 Principe

Lorsque la base d'une éprouvette de roche poreuse est plongée dans un bain d'eau, des ménisques se forment immédiatement et la tension capillaire développée permet l'ascension du fluide à l'intérieur du milieu poreux. Pour caractériser ce type d'expérience, deux paramètres sont pris en compte (cf. figure A2.2) :

- sur la surface externe des échantillons, une frange capillaire est facilement observable. La progression de son déplacement x en fonction du temps t est de la forme :

$$x = B \sqrt{t} \quad \text{Équation 3}$$

- le volume cumulé absorbé peut être connu par l'intermédiaire de la variation de poids. Tant que la frange capillaire n'a pas atteint le sommet, cette variation, ΔP_d , rapportée à la valeur de la surface par laquelle se fait l'absorption, S , évolue en fonction du temps suivant la relation suivante:

$$\frac{\Delta P_d}{S} = A \sqrt{t}$$

Équation 4

Ainsi, lorsque l'échantillon de roche placé en condition d'imbibition capillaire est homogène, c-à-d sans importante variation de texture due par exemple à un litage d'origine sédimentaire, la cinétique observée correspond à la figure A2.2.

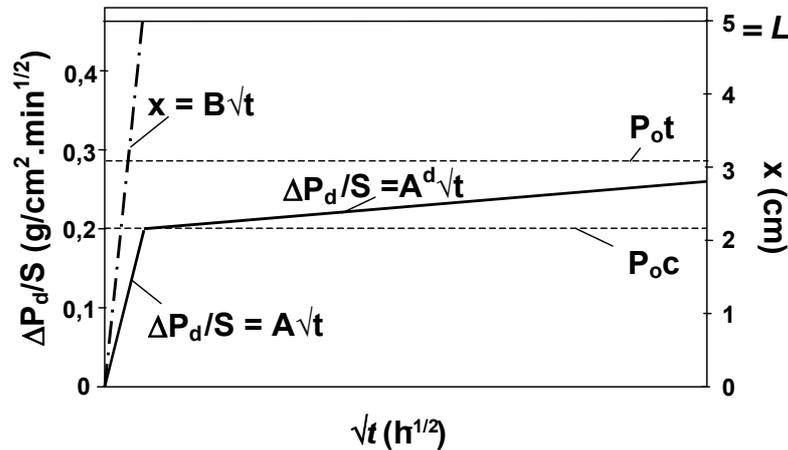


Figure A2.2 Exemple de cinétique d'imbibition capillaire. Cas d'un échantillon homogène. $\Delta P_d/S$ = variation de poids rapporté à l'unité de surface ; x = hauteur de la frange capillaire atteinte au temps t ; L = hauteur de l'échantillon = x max ; P_{ot} = porosité totale ; P_{oc} = porosité capillaire ou porosité libre = porosité occupée par de l'eau au moment où la frange capillaire atteint le sommet de l'échantillon ; A = coefficient de capillarité massique (exprimé ici en $\text{g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$) ; B = coefficient de capillarité linéaire ($\text{cm}/\text{min}^{1/2}$) ; A^d = coefficient de diffusion de l'air à travers l'eau mesurable en fin d'imbibition capillaire lorsque l'alimentation en eau est maintenue.

La cinétique de migration de la frange capillaire en fonction de la racine carrée du temps définit un segment de droite de pente B , tandis que la cinétique de prise de poids définit un segment de droite de pente A . Lorsque la frange capillaire atteint le sommet de l'échantillon ($x = L$), l'imbibition capillaire *sensu stricto* est terminée, la prise de poids en eau correspond à porosité libre, ou porosité capillaire (P_{oc}), et dès lors elle change de cinétique. En effet, dès que $x = L$, l'évolution de la prise de poids devient beaucoup plus lente, mais reste fonction de la racine carrée du temps (cf. figure A2.2) :

$$\frac{dP_d}{S} = A^d \sqrt{t}$$

Équation 5

Cette phase de l'imbibition est attribuée à la diffusion dans l'eau, des bulles d'air restées piégées dans le réseau poreux. Elle correspond donc à la résorption de l'air piégé ou porosité piégée (Bousquié, 1979, Mertz, 1991). Si on laisse évoluer le système très longtemps, la prise de poids tend progressivement vers la valeur de la porosité totale P_{ot} . Les deux phases, imbibition capillaire *s.s.* et diffusion de l'air à travers l'eau correspondent à l'imbibition capillaire au sens large.

Dans le cas d'échantillons lités, si les plans de stratification sont orientés perpendiculairement à la direction de l'imbibition, les courbes de capillarité sont perturbées : l'influence des différents niveaux se traduit par une courbe en escalier marquant des variations locales de la cinétique d'imbibition. La migration de la frange capillaire et la prise

de poids par unité de surface, évoluent toutes deux parallèlement suivant des segments de droites de pentes variables.

A2.2.3 Mode opératoire

Le mode opératoire est inspiré du protocole de l'essai n° II.6 de la norme RILEM (1978).

Comme pour les mesures de porosité, les éprouvettes sont d'abord séchées dans une étuve à 60°C jusqu'à stabilisation du poids. Les variations de température étant capables de perturber la cinétique d'imbibition en modifiant la tension de surface air-eau et la viscosité de l'eau, avant l'imbibition les éprouvettes sorties de l'étuve sont couvertes de papier absorbant et laissées à l'air ambiant le temps qu'elles atteignent l'équilibre thermique.

Les imbibitions se pratiquent sur les échantillons nus, posés verticalement, dans un bac au fond duquel le niveau d'eau déminéralisée est maintenu constant pendant toute la durée de l'expérience (cf. figure A2.3). Le bon contact entre l'eau et la base de l'échantillon est maintenu par un tissu capillaire imbibé d'eau ; l'alimentation capillaire est alors assurée par une pellicule d'eau d'environ 1 mm.

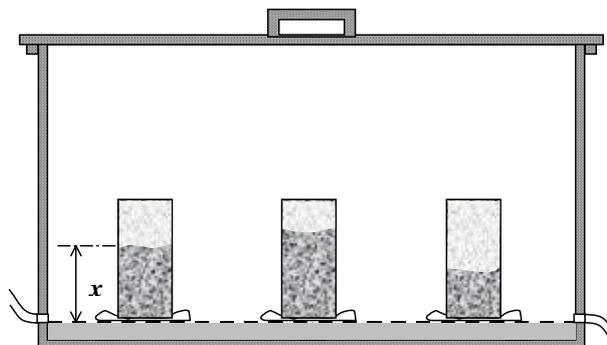


Figure A2.3 Dispositif expérimentale de l'imbibition capillaire

Le bac ferme hermétiquement ce qui permet de maintenir une hygrométrie proche de la saturation. Ainsi la superposition des phénomènes d'évaporation est évitée.

Pendant l'expérience, la hauteur de la frange humide (x) observable sur la surface externe des échantillons et la prise de poids en eau ($\Delta P_d/S$), sont mesurées à intervalles de temps croissants et sont reportées graphiquement, en fonction de la racine carrée du temps (cf. figure A2.2).

La valeur de la porosité envahie par l'eau lors au moment de la rupture de pente de la prise de poids, appelée Porosité capillaire, ou porosité libre (P_{oc}) peut-être calculée grâce à la formule suivante :

$$P_{oc} = \frac{P_{dc} - P_{ds}}{P_{d2} - P_{d1}} \times 100 \quad [\%] \quad \text{Équation 6}$$

- P_{oc} = porosité occupé par de l'eau en fin d'imbibition capillaire = porosité capillaire ou porosité libre [%]
- P_{d1} = poids imbibé (obtenu par pesée hydrostatique) [kg] (cf. mesure de la porosité totale)
- P_{d2} = poids de l'éprouvette saturée en eau [kg] (cf. mesure de la porosité totale)
- P_{ds} = poids sec [kg]

P_{dc} = poids de l'échantillon au moment de la rupture de pente de la prise de poids [g]

A2.3 ADSORPTION DE VAPEUR D'EAU

A2.3.1 Généralités

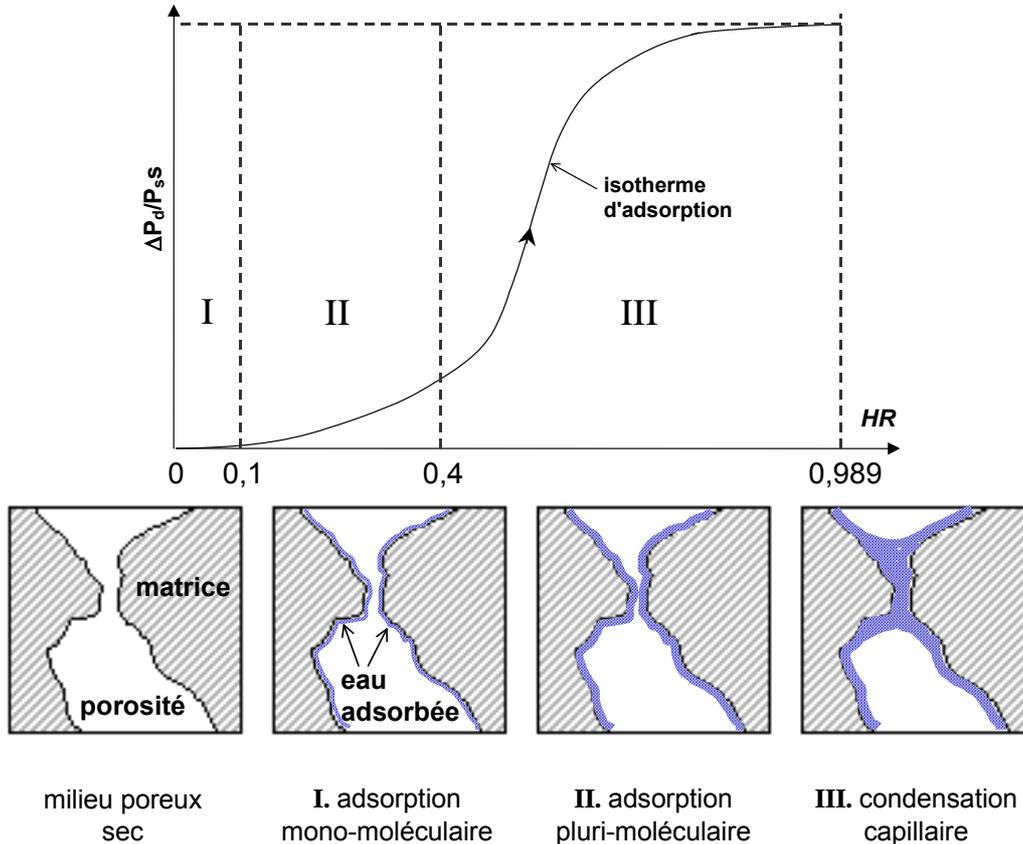


Figure A2.4 Isotherme d'adsorption, et représentation schématique des processus correspondants

D'une manière générale, à partir du moment où l'humidité relative n'est pas nulle, il y a adsorption de molécules de vapeur d'eau sur les surfaces solides en contact avec l'air jusqu'à établissement d'un équilibre entre la quantité d'eau adsorbée et la vapeur d'eau en contact avec le solide considéré. Cette adsorption est le résultat des interactions entre la vapeur d'eau et le solide : les charges insaturées à la surface du solide tendent à fixer les molécules de vapeur d'eau. Le processus d'adsorption se poursuit jusqu'à ce que la couche adsorbée soit en équilibre thermodynamique avec la phase vapeur. La cinétique de cette adsorption et la quantité adsorbée dépendent de l'état physico-chimique du solide et de l'aire de la surface (Fripiat et al., 1971). En d'autres termes, l'hygroscopicité d'une pierre, ou son affinité pour la vapeur d'eau, dépend bien sûr de l'humidité relative ambiante, mais aussi de la surface spécifique de la pierre et de l'hygroscopicité propre à chacun de ses constituants, mais pas vraiment de sa porosité totale. Ainsi, les pierres microporeuses (ayant une surface spécifique très élevée) et/ou contenant des argiles (minéraux les plus hygroscopiques) présentent une hygroscopicité supérieure aux pierres macroporeuses et/ou dépourvues d'argiles.

L'adsorption physique due à une augmentation de la quantité de vapeur d'eau dans le mélange air/vapeur d'eau en contact avec une surface plane et parfaitement lisse, peut théoriquement donner naissance à un film adsorbé d'épaisseur infinie. Mais dans le milieu poreux des roches, l'adsorption à la surface des parois internes est limitée par la taille des pores (Rouger, 1988 ; Quénard et Sallée, 1992 ; Jeannette 1994).

Si on place un échantillon de roche sec dans une enceinte thermostatée dans laquelle on fait varier l'humidité relative (HR), on constate une prise de poids de l'échantillon - correspondant à une fixation de molécules d'eau sur la matrice poreuse - dont l'amplitude dépend de la nature de l'échantillon et de la variation d'HR. Ce type d'expérience permet de tracer une courbe appelée "isotherme d'adsorption" qui permet de caractériser l'aptitude d'un matériau à fixer de l'eau par adsorption, c-à-d l'hygroscopicité du matériau (cf. figure A2.4).

Sur cette courbe, trois étapes peuvent être distinguées :

- pour les très faibles HR, l'adsorption monomoléculaire (domaine I) correspond comme son nom l'indique à la fixation d'une seule couche moléculaire d'eau ;
- pour des valeurs d'HR intermédiaires, l'adsorption plurimoléculaire (domaine II) apparaît ;
- enfin pour les fortes valeurs d'humidités relatives, on passe dans le domaine III qui correspond à la condensation capillaire qui survient lorsque les couches plurimoléculaires adsorbées se rejoignent pour former des ménisques dans les pores les plus petits du réseau poreux.

A2.3.2 Principe

Le principe des mesures consiste à amener des échantillons de roche poreuse initialement secs à un état d'équilibre avec des atmosphères régulées en température et en humidité relative. Les échantillons sont pesés régulièrement de façon à établir la cinétique du processus d'adsorption.

A2.3.3 Mode opératoire

L'appareillage expérimental se compose d'une chambre climatique permettant de réguler la température (fixée ici à 20°C), et d'enceintes hermétiques renfermant différentes solutions salines saturées, qui assurent la régulation de l'humidité relative (cf. figure A2.5).

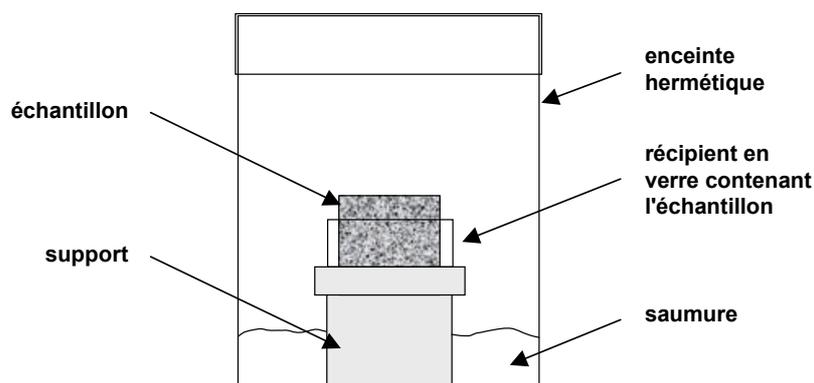


Figure A2.5 Représentation schématique d'une vue de profil d'une enceinte à essai d'adsorption.

Pour cette étude, nous avons choisi 5 humidités relatives différentes : 33, 55, 76, 86 et 97% (cf. norme NF X 15-014, tableau A2.1).

Solutions salines saturées		Humidité relative en pourcentage pour température en degrés Celcius									
		5	10	15	20	25	30	35	40	50	60
Hydroxyde de potassium	K OH (Note 3)	14	13	10	9	8	7	6	6	6	---
Chlorure de lithium	LiCl, X H ₂ O (*)	14	14	13	12	12	12	12	11	11	11
Acétate de potassium	K CH ₃ CO ₂	---	21	21	22	22	22	21	20	---	---
Chlorure de magnésium	Mg Cl ₂ , 6 H ₂ O (*)	35	34	34	33	33	33	32	32	31	30
Carbonate de potassium	K ₂ CO ₃ , 2 H ₂ O (*)	---	47	44	44	43	43	43	42	---	36
Nitrate de magnésium	Mg (NO ₃) ₂ , 6 H ₂ O (*)	58	57	56	55	53	52	50	49	46	43
Bichromate de sodium	Na ₂ Cr ₂ O ₇ , 2 H ₂ O	59	58	56	55	54	52	51	50	47	---
Nitrate d'ammonium	NH ₄ NO ₃ (Note 1)	---	73	69	65	62	59	55	53	47	42
Nitrite de sodium	Na NO ₂ (Note 2) (*)	---	---	---	66	65	63	62	62	59	59
Chlorure de sodium	Na Cl (*)	76	76	76	76	75	75	75	75	76	76
Sulfate d'ammonium	(NH ₄) ₂ SO ₄ (*)	82	82	81	81	80	80	80	79	79	---
Chlorure de potassium	K Cl	88	88	87	86	85	85	84	82	81	80
Nitrate de potassium	K NO ₃ (*)	96	95	94	93	92	91	89	88	85	82
Sulfate de potassium	K ₂ SO ₄	98	98	97	97	97	96	96	96	96	96

(*) Sels recommandés pour des niveaux d'une humidité relative particulière et tels que les variations en fonction de la température soient très faibles entre 20°C et 30°C.

NOTE 1. les sels d'ammonium peuvent provoquer la corrosion des pièces en cuivre
 2. l'addition de 1 à 2 % de tétraborate de sodium permet de retarder le changement de coloration des solutions de nitrite de sodium. Par cette addition, l'humidité relative est réduite de 1% à 20 °C.
 3. la solution d'hydroxyde de potassium est corrosive et l'on doit éviter le contact avec la peau.

Tableau A2.1 Norme NF X 15-014 – Humidités relatives de l'air au dessus de solutions salines saturées. Les sels utilisés sont grisés.

Pour établir les isothermes d'adsorption, en théorie, il faudrait travailler sur un seul échantillon. Sur cet échantillon, devraient être établies les cinétiques d'adsorption pour toute la gamme d'humidités relatives choisies. Or l'établissement de l'équilibre peut être un processus très long (de plusieurs dizaines de jours). Par gain de temps, pour chaque pierre les essais d'adsorption de vapeur d'eau ont été réalisés sur des lots de cinq cubes de 4 cm d'arête les plus homogènes possible, excepté pour le grès de Wiesental pour lequel nous n'avons travaillé qu'avec trois cubes par manque d'échantillons. Deux de ces cubes ont donc subi deux adsorptions successives : une première à 33 et 55% d'humidité relative et une seconde à 86 et 97%.

Après séchage dans une étuve à 60°C jusqu'à poids constant, les cubes sélectionnés ont été pesés (soit P_s le poids sec de l'échantillon) puis placés nus dans les enceintes hermétiques contenant une saumure donnée. L'évolution de la teneur en eau des échantillons est obtenue par pesée sur une balance de précision 0,0001g. Le rythme des pesées est ajusté à la cinétique d'adsorption elle même : les mesures sont effectuées trois fois le premier jour, deux fois le deuxième jour, une fois par jour pendant trois à cinq jours, et enfin, une fois tous les deux ou trois jours.

L'équilibre est supposé atteint quand la masse de l'échantillon reste stable pendant une période de 5 à 7 jours.

A2.4 BIBLIOGRAPHIE DE L'ANNEXE 2

Bousquié P., 1979. Texture et porosité des roches calcaires - Thèse de docteur ingénieur, Université Paris VI, 191p.

Dullien F.A.L., 1979. Porous Media - Fluid transport and pore structure - Academic press, New York, 396 p.

Fripiat J., Chaussidon J. et Jelli A., 1971. Chimie physique des phénomènes de surfaces. Masson & Cie éd., Paris 387 p.

Mertz J.-D., 1991. Structures de porosité et propriétés de transport dans les grès - Sci. Géol., Mém., 90, 149p.

R.I.L.E.M., 1978. Altération et protection des monuments en pierre, méthodes expérimentales conseillées. Colloque international, Paris, 5-9 juin 1978.

ANNEXE 3 - MODE OPÉRATOIRE ET LIMITES D'UTILISATION DU MOIST 200B

A3.1 LIMITES D'UTILISATION

D'après la littérature et les fabricants de l'appareil, un certain nombre de limites d'utilisation de l'appareil MOIST 200B sont connues :

- si des éléments métalliques, tels que des fers, se trouve dans le champ de mesure de l'appareil, les résultats fournis par l'appareil ne sont plus interprétables (Göller, 2007);
- si le matériau étudié est macro-poreux (comme un tuf calcaire par exemple), les ondes se "perdent" dans les cavités et les résultats obtenus ne sont plus interprétables (Göller, 2000);
- la surface sur laquelle la mesure est effectuée ne doit pas être rugueuse, de sorte que l'antenne puisse être appliquée correctement contre cette surface. L'influence de la rugosité est d'autant plus importante que la sonde utilisée mesure à des profondeurs faibles²⁵ ;
- pour obtenir des résultats interprétables, les matériaux sur lesquels les mesures sont faites doivent avoir au minimum 3 cm d'épaisseur lors de l'utilisation de la sonde R, et au minimum 20 cm lors de l'utilisation de la sonde P. D'autre part, pour éviter les effets de bords indésirables, la mesure doit être faite à une distance du bord latéral au moins égale à la moitié du diamètre de la sonde, soit 2.2 cm pour les sondes R, R2 et D, et 10 cm pour la sonde P²⁵.

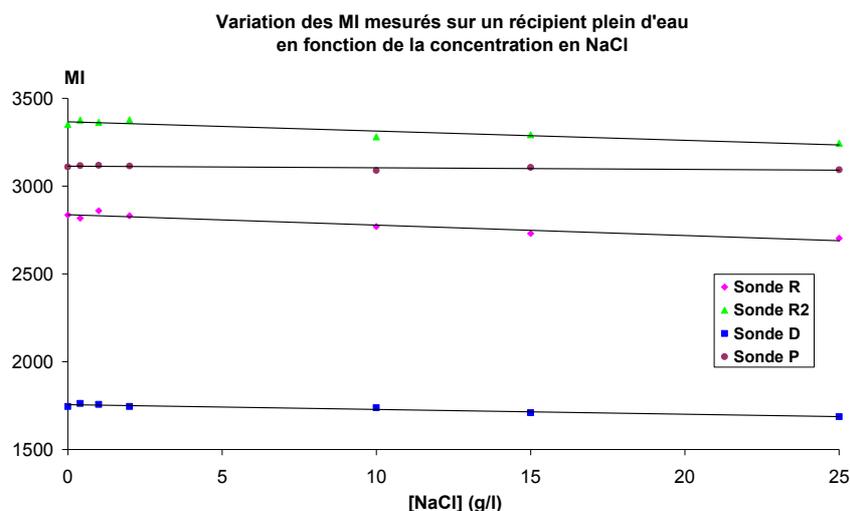


Figure A3.1 Variation des index d'humidités (MI) mesurés avec le MOIST 200B sur un récipient en verre contenant 10 litres d'eau de concentration croissante en chlorure de sodium (NaCl)

Les concepteurs de l'appareil prétendent que les valeurs qu'il fournit ne sont pas perturbées par la présence de sels solubles dans le matériau caractérisé. Pour en être convaincus, nous avons effectué le test suivant : ne souhaitant pas contaminer un échantillon de pierre, nous avons rempli un récipient en verre avec environ 10 litres d'eau du robinet. Après avoir très précautionneusement emballé les sondes du MOIST 200B dans un sac plastique étroitement ajusté - et vérifié que ce dispositif ne perturbait pas les résultats sur un échantillon de pierre connu -, nous avons plongé successivement les 4 sondes sur 1 à 2 mm de profondeur à la surface de l'eau, au centre du récipient, où nous avons mesuré l'index d'humidité. Puis nous

²⁵ hf sensor, MOIST 200B, Bedienungsanleitung / Operation manual

avons répété ces mesures après avoir dissous successivement 4, 10, 20, 100, 150 et 250g de chlorure de sodium. Les résultats (cf. figure A3.1) montrent que les index d'humidité tendent à décroître lorsque la concentration en NaCl augmente, mais ces variations sont relativement faibles. Il est donc probable que la présence de sels solubles dans un échantillon de pierre ne perturbe pas outre mesure les valeurs données par le MOIST 200B, toutefois il serait prudent de le vérifier sur des échantillons de pierre avant d'effectuer des mesures *in situ*.

Pour évaluer l'effet de la température sur les mesures faites avec l'appareil MOIST, nous avons placé un échantillon de grès de Gurten et un échantillon de grès de Wiesental dans une enceinte à 55% d'humidité relative, placée elle-même dans une armoire isotherme dont nous avons fait varier la température entre 15 et 30°C par pas de 5°C tous les 24h. Avant de changer la température, la température de surface des échantillons a été mesurée à l'aide d'un thermomètre infrarouge puis les cubes ont été sortis des enceintes et placés sur un support en plastique (cf. figure A3.3) pour y subir des mesures avec les 4 sondes du MOIST 200B. Les valeurs obtenues ont montré que les index d'humidité fournis par les sondes R et R2 tendent à diminuer lorsque la température augmente, mais ces variations peuvent être considérées comme négligeables. Quant aux valeurs fournies par les sondes P et D, elles montrent des variations "chaotiques" non négligeables que nous ne pouvons pas expliquer (cf. figure A3.2). Il faudra donc prendre garde à faire les mesures dans des conditions de température similaires.

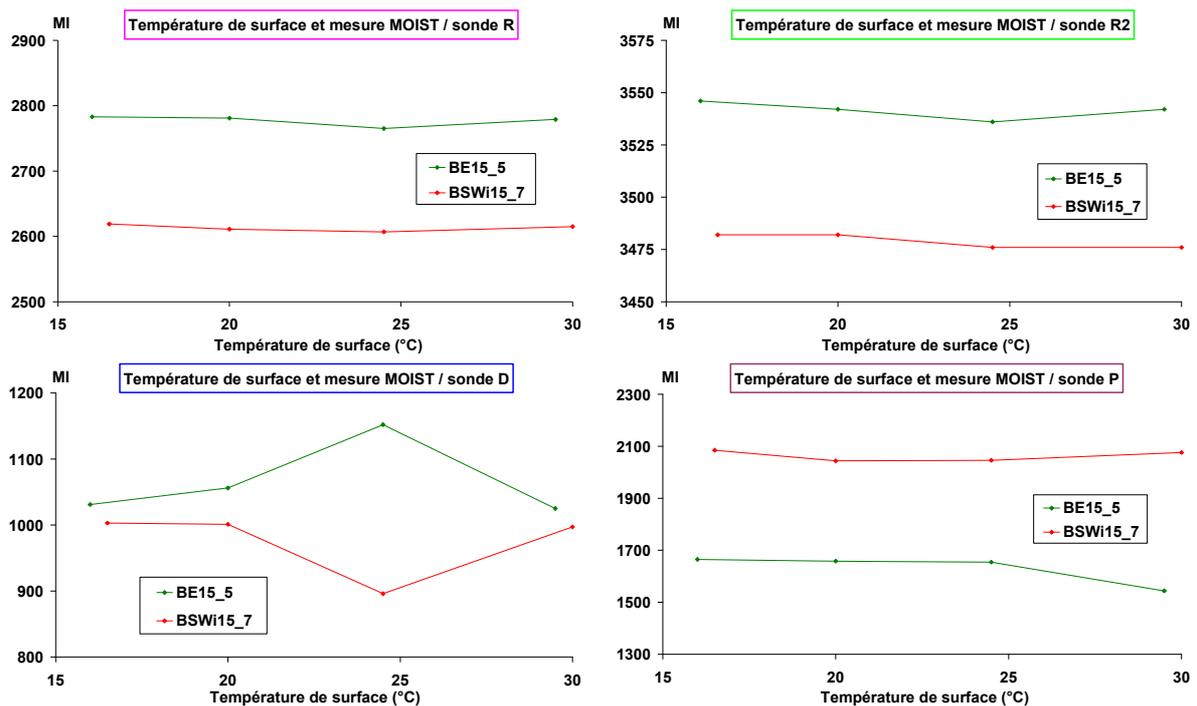


Figure A3.2 Variation des index d'humidité (MI) mesurés par les sondes R, R2, D et P du MOIST 200B en fonction de la température de surface d'un échantillon de grès de Gurten (BE15_5) et d'un échantillon de grès de Wiesental (BSWi15_7) maintenus chacun à 55% d'humidité relative.

Quant à l'influence de l'humidité relative ambiante, sa détermination fera l'objet d'un chapitre à part entière (cf. § 6.1.2).

A3.2 GÉNÉRALITÉS CONCERNANT LES MESURES ET LES PRÉCAUTIONS PRISES

Pour la plupart des points de mesure, les acquisitions ont été faites successivement avec quatre types de sondes : les sondes MOIST R et MOIST R2 qui sont des sondes de surfaces ayant des limites de détection déclarées respectivement à 3 et à 7 cm de profondeur puis les sondes de profondeur MOIST D et MOIST P dont les limites de détection sont annoncées à 11 et 30 cm de profondeur.

Avant d'effectuer nos mesures, nous avons pris soin de vérifier que les résultats ne seraient pas biaisés par des artefacts imputables aux conditions expérimentales de la manière suivante :

- Nous avons testé plusieurs supports pour poser nos échantillons pendant les mesures et nous avons constaté que la plupart des tables fixes ou mobiles dont nous disposions influençaient les résultats : la présence d'éléments métalliques se trouvant sous l'échantillon fausse les mesures. Finalement, après plusieurs essais infructueux, un tabouret en plastique du type de celui représenté sur la figure A3.3 s'est avéré un support idéal : la matière plastique qui le constitue ne semble pas perturber les mesures ou si elle les perturbe, l'effet est négligeable ou équivalent pour toutes les sondes testées (R, R2, D et P).

D'après nos essais, l'espace vide que ce support offre entre l'échantillon et la table sous-jacente (de l'ordre de 23 cm) permet de s'affranchir totalement de la nature de cette table. De plus la mobilité de ce support permet de faire les mesures n'importe où, en laboratoire ou sur un échafaudage si des mesures de références sur des échantillons témoins sont nécessaires sur un chantier.



Figure A3.3. Support sur lequel les échantillons ont été posés pendant les mesures effectuées avec l'appareil MOIST 200B.

- Les 5 grès testés ne présentent pas de macropores dans lesquels les micro-ondes pourraient se "perdre".
- Les cubes testés ayant été préparés par sciage, les surfaces sur lesquelles les mesures ont été réalisées étaient suffisamment lisses pour que l'effet de rugosité soit négligeable tant pour les sondes de profondeur (D et P) que pour les sondes de surfaces (R et R2).
- Les dimensions choisies pour les cubes (15x15x15cm) sont inférieures aux dimensions acceptables pour obtenir des mesures fiables avec la sonde de profondeur P, mais d'après le mode d'emploi de l'appareil, les trois autres sondes (D, R2 et R) restent utilisables et leurs résultats interprétables sur de tels volumes. Néanmoins, en prenant garde de positionner la sonde toujours au même endroit, au centre de l'une des faces, et par comparaison avec les résultats des 3 autres sondes, nous espérons que les résultats obtenus avec la sonde P puissent être exploités.
- Afin de vérifier que l'appareil ne présentait pas une déviation trop importante ou que les variations de l'humidité et de la température ambiantes n'impliquent pas des

variations notables, les mesures faites sur les cubes testés ont été faites en parallèle sur des cubes "témoins" : un cube de chaque sorte de pierre, en équilibre avec les conditions ambiantes du laboratoire (lorsque nous avons fait nos mesures avec l'appareil MOIST, la température était comprise entre 22 et 24°C tandis que l'humidité relative variait entre 17 et 39%). Les variations observées sur ces témoins n'ayant jamais été significatives, nous ne mentionnerons plus ces mesures témoins dans la suite du rapport.

A3.3 MESURES EFFECTUÉES SUR LES ÉCHANTILLONS SECS

Pour répéter les mesures toujours sur la même face, nous avons attribué des lettres à chaque face des cubes de 15 cm d'arête comme indiqué sur la figure A3.4.

Pour réaliser les mesures à sec, les cubes de 15 cm d'arête en équilibre avec les conditions ambiantes du laboratoire (température de l'ordre de 23-24°C, humidité relative comprise entre 26 et 29%) ont été posés au centre du support en plastique (cf. figure A3.3) sur la face C, la face A se trouvant ainsi à l'horizontale et vers le haut. Les index d'humidité ont été mesurés au centre de cette face A, comme schématisé sur la figure A3.4, à l'aide des 4 sondes du MOIST 200B. Ayant constaté que l'appareil présente une certaine déviation, la mesure a été répétée 4 à 5 fois pour chaque sonde et la valeur retenue comme index d'humidité est toujours la moyenne de ces mesures.

Les index d'humidité "à sec" ont été mesurés sur 6 cubes de grès de Maintal, 13 cubes de grès de Wiesental, 9 cubes de grès de Gurten, 10 cubes de molasse de Villarlod et 9 cubes de molasse de la Mercerie.

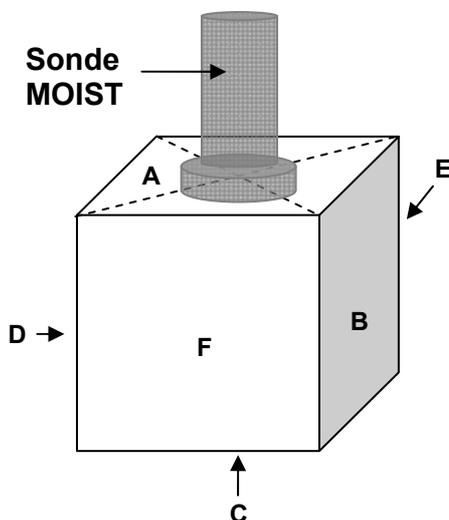


Figure A3.4 Schéma figurant la position des cubes de 15 cm d'arête et l'emplacement des sondes MOIST lors des mesures.

A3.4 MESURES EFFECTUÉES EN COURS D'ADSORPTION DE VAPEUR D'EAU

Pour déterminer les index d'humidité correspondant à différentes quantités d'eau adsorbée aux parois des pores, nous avons procédé comme suit :

1• les cubes de 15 cm d'arête sélectionnés - en équilibre avec les conditions ambiantes du laboratoire (température de l'ordre de 22-24°C et humidité relative comprise entre 19 et 39%) - ont été posés, face A vers le haut, dans une enceinte à humidité relative contrôlée à 33%, à côté d'un hygro-thermomètre enregistrant les variations de température et d'humidité pouvant affecter l'intérieur de l'enceinte toutes les demi-heures. 2• Après 7 jours de mise à

l'équilibre²⁶, les enceintes ont été ouvertes et aussi rapidement que possible, les index d'humidité ont été mesurés au centre de la face A à l'aide des 4 sondes du MOIST 200B directement dans l'enceinte²⁷. Les dernières valeurs de température et d'humidité relative enregistrées par l'hygro-thermomètre avant l'ouverture de l'enceinte pour effectuer la mesure sont relevées et considérées égales aux conditions ambiantes avec lesquelles l'échantillon était à l'équilibre au moment de la mesure. **3•** Dès la mesure terminée, l'humidité relative de l'enceinte était augmentée à la valeur supérieure, soit 55%, puis les enceintes étaient à nouveau fermées pour une semaine de sorte que l'échantillon puisse se mettre en équilibre avec les nouvelles conditions imposées. **4•** Les opérations 2 à 3 ont été répétées encore 4 fois, de sorte que les index d'humidité correspondants à l'eau adsorbée à 75, 86, 93 et 97% d'humidité relative puissent être mesurés.

Aucune mesure n'a été faite sur un échantillon témoin en parallèle avec ces essais.

Les index d'humidité correspondants à différentes quantités d'eau adsorbée aux parois des pores ont été mesurés sur 1 cube de chaque molasse (grès de Gurten, molasse de Villarlod et molasse de la Mercerie) et sur 1 cube de grès de Wiesental. Ces expériences n'ont été faites sur aucun échantillon de grès de Maintal, tous les cubes de 15 cm d'arête de cette pierre étant utilisés pour d'autres mesures lorsque ces tests ont eu lieu.

A3.5 MESURES EFFECTUÉES EN COURS D'IMBIBITION CAPILLAIRE À L'EAU

Pour déterminer les index d'humidité correspondant à différentes quantités et différentes profondeurs de pénétration de l'eau capillaire, nous avons procédé comme suit :

1• les cubes de 15 cm d'arête sélectionnés - en équilibre avec les conditions ambiantes du laboratoire (température de l'ordre de 22-24°C et humidité relative comprise entre 19 et 39%) - ont été pesés secs puis **2•** ils ont été posés sur leur face A dans un récipient contenant une mince couche d'eau régulièrement alimentée de sorte que l'eau pénètre progressivement par imbibition capillaire depuis la face A vers la face C. **3•** A intervalles de temps croissants, les échantillons ont été sortis du récipient, grossièrement essuyés à l'aide d'une peau de chamois humide et pesés afin de connaître la quantité d'eau capillaire qu'ils contenaient au temps t. Après la pesée, les échantillons étaient rapidement posés sur le support en plastique (cf. figure A3.3), face C vers le bas et la hauteur de la frange capillaire était mesurée sur les 4 faces B, D, E et F. La moyenne de ces quatre mesures donne la profondeur de pénétration de l'eau capillaire au temps t. **4•** Puis aussi rapidement que possible, les index d'humidité ont été mesurés au centre de la face A à l'aide des 4 sondes du MOIST 200B suivant la configuration schématisée sur la figure A3.4. En raison de la déviation de l'appareil, nous avons répété la mesure 4 à 5 fois pour retenir la moyenne comme valeur d'index d'humidité au temps t. **5•** Dès la fin des mesures, les cubes ont été reposés, face A dans l'eau, de sorte que l'absorption capillaire puisse se poursuivre. **6•** Les

²⁶ Lorsqu'un cube de 15 cm d'arête est placé dans une enceinte à humidité relative constante, son volume est tel que l'air qui circule dans sa porosité n'atteint l'équilibre parfait qu'après plusieurs semaines. Toutefois, le processus d'adsorption d'eau en fonction du temps décrivant une courbe logarithmique, la majorité de l'adsorption a lieu au cours des premiers jours. Ainsi, après 7 jours à humidité relative constante, on peut admettre qu'un cube de 15 cm d'arête est proche de l'équilibre.

²⁷ Afin de perturber un minimum l'humidité relative des enceintes contenant les échantillons, ces derniers n'ont pas été sortis des enceintes pour être posés sur le support en plastique habituel pour subir les mesures avec l'appareil MOIST. Les mesures ont été faites directement dans l'enceinte, elle-même posée sur une table risquant d'influencer les valeurs fournies par l'appareil de mesure. Toutefois, les enceintes et les échantillons étant restés dans la même position pendant toute la période des essais, nous ne prendrons pas en compte les valeurs absolues mais les variations des résultats en fonction de l'humidité relative imposée.

étapes 2 à 5 ont ensuite été répétées jusqu'à ce que la frange capillaire ait traversé tout l'échantillon.

Des mesures sur un échantillon témoin posé sur un deuxième support en plastique ont été systématiquement faites en parallèle à chaque mesure effectuée sur les échantillons.

Les index d'humidité correspondant à différentes profondeurs de pénétration de l'eau capillaire ont été mesurés sur 3 cubes de grès de Maintal, 3 cubes de molasse de Villarod, 3 cubes de molasse de la Mercerie, 4 cubes de grès de Berne et 5 cubes de le grès de Wiesental.

A3.6 MESURES EFFECTUÉES PENDANT ET APRÈS APPLICATION DES CONSOLIDANTS

Les cubes de 15 cm d'arête sur lesquels les index d'humidité ont été déterminés pendant l'application de consolidant ont été traités comme suit :

1• afin qu'une quantité suffisante d'eau adsorbée tapisse les parois de leurs pores au moment de l'application du consolidant (cf. § 2.2 et 4), les échantillons à "consolider" ont d'abord été conditionnés dans des enceintes à humidité relative constante et égale à 75% pendant 2 à 3 semaines avant les mesures. Puis **2•** les échantillons ont été sortis de ces enceintes pour être pesés avant **3•** d'être posés sur le support en plastique (cf. figure A3.3) face C vers le bas, face A vers le haut. Dans cette position leur face A a été régulièrement badigeonnée de produit consolidant à l'aide d'un pinceau. Le badigeonnage a été fait de sorte que le pinceau n'approche jamais plus de 5 mm les bords de la face A, ceci afin d'éviter autant que possible des coulures le long des faces verticales, coulures qui auraient masqué la frange capillaire et entraîné une pénétration du produit sur une profondeur trop hétérogène. Le produit a été appliqué à refus : il était appliqué en léger excès par rapport à la quantité de liquide pouvant être absorbé par capillarité et dès que l'excès était absorbé, un nouvel excès de liquide était ajouté. **4•** A intervalles croissants et après avoir attendu l'absorption de tout le liquide en excès, les échantillons étaient pesés, la hauteur de leur frange capillaire mesurée sur les 4 faces B, D, E et F avant **5•** d'être redéposés sur le support en plastique (cf. figure A3.3) où les index d'humidité ont été mesurés aussi rapidement que possible successivement avec les 4 sondes du MOIST 200B, au centre de la face A suivant la configuration schématisée sur la figure A3.4. Comme pour les mesures à sec, la mesure a été répétée 4 à 5 fois puis moyennée. **6•** Dès la fin des mesures, le produit consolidant était à nouveau badigeonné à la surface du cube de sorte que son absorption capillaire se poursuive. **7•** Les étapes 3 à 6 ont été répétées jusqu'à ce que la frange capillaire atteigne une profondeur de pénétration prédéfinie à l'avance, comprise entre 1 et 3.5 cm, ces profondeurs étant représentatives des profondeurs de pénétration des produits consolidants *in situ*. Les mesures pendant application du consolidant ont été faites à une température oscillant entre 21 et 24°C et à une humidité relative comprise entre 34 et 44%. **8•** Lorsque la profondeur de pénétration désirée a été atteinte, les échantillons ont été replacés dans les enceintes à humidité relative à 75%, face A vers le haut de sorte que le gel de silice puisse se former dans de bonnes conditions (cf. § 2.2 et 4). **9•** Après 1, 2, 4 et 6 semaines, les échantillons ont été ponctuellement ressortis des enceintes à humidité relative contrôlée et posés sur le support en plastique face A vers le haut pour subir de nouvelles mesures d'index d'humidité à différents stades de gélification des consolidants. Les températures et humidités relatives régnant lors de ces mesures, étaient comprises respectivement entre 21 et 26°C et entre 51 et 61%.

Des mesures sur un échantillon témoin posé sur un deuxième support en plastique ont été faites en parallèle lors des mesures sur les échantillons pas encore consolidés puis lors des mesures faites après 1, 2, 4 et 6 semaines de consolidation.

Ces mesures ont été faites sur 3 cubes de 15 cm d'arête de chaque type de pierre, ces cubes ayant été sélectionnés parmi les échantillons sur lesquels les index d'humidité ont préalablement été mesurés pendant l'imbibition capillaire à l'eau.

ANNEXE 4 - MODE OPÉRATOIRE ET LIMITES D'UTILISATION DU COMBO 200

A4.1 LIMITES D'UTILISATION

La conductivité de l'eau est d'autant plus grande que sa teneur en sels solubles est élevée. Par conséquent, la détermination de la teneur en eau d'un matériau par une mesure de conductivité électrique est fortement influencée - sinon totalement faussée - par la présence des sels solubles dans le matériau. Il serait donc difficile d'utiliser cet appareil *in situ*, sur des matériaux de construction exposés aux polluants atmosphérique, aux eaux météoriques et aux eaux de ruissellement, agents toujours plus ou moins sources de sels solubles.

La mesure est dépendante de la «valeur de conduction thermique, de la capacité thermique et de la résistance de diffusion de l'eau»²⁸ : la température du matériau sur lequel la mesure est faite est donc un facteur important. Il est recommandé de faire des mesures sur des matériaux à une température proche - sinon égale - à 20°C²⁹, bien que l'appareil puisse être utilisé entre 0 et 45°C de température ambiante.

Il est aussi recommandé de ne faire bouger ni le/les câbles(s), ni les électrodes ni même l'appareil de mesure pendant la lecture des résultats.

A4.2 GÉNÉRALITÉS CONCERNANT LES MESURES ET LES PRÉCAUTIONS PRISES

Le COMBO 200 est un conductivimètre électrique pré-étalonné pour 4 grands types de bois ainsi que pour 9 grandes familles de matériaux de construction. Toutes les résultats reportés ci-après ont été acquis en mode "matériau de construction / béton gaz (Levier)", ce matériau étant celui qui possède une structure et une composition les plus proches de celles des pierres naturelles parmi les 9 familles de matériaux "d'étalonnage".

Les mesures faites avec l'appareil COMBO 200 étant basées sur la mesure de la conductivité électrique ou de la résistance électrique entre deux sondes, la qualité du contact établi entre ces sondes et le matériau à caractériser influence fortement les résultats. Par conséquent, l'appareil est plus performant pour des mesures en profondeur et plus particulièrement lorsque les deux sondes utilisées sont en forme de clous durs pouvant être "plantés" dans le matériau à caractériser. Ce matériau doit donc être relativement mou. De ce fait l'appareil est tout spécialement indiqué pour déterminer la teneur en eau d'éléments en bois.

Dans le cas de pierres naturelles, l'appareil, pour être performant, doit être utilisé avec deux sondes en forme de tiges plus ou moins longues, terminées par des brosses rondes de 8 mm de diamètre. Ces sondes doivent être introduites dans des orifices de 8 mm de diamètre chacun préalablement creusés dans la pierre. Cette opération nécessitant une destruction du matériau, nous avons choisi de tester les sondes HY2.72 en forme de clous de 3.5 cm de long et séparées par une distance fixe de 3 cm, sondes normalement prévues pour les matériaux mous en application superficielle uniquement.

Comme le mentionne le manuel utilisateur du conductivimètre COMBO 200, «le mesurage [...] de l'humidité des matériaux de construction [à l'aide de cet appareil] offre généralement

²⁸ BES BOLLMANN, BES COMBO 200, Instructions de service, appareil de mesure servant à déterminer le degré d'humidité du bois et des matériaux de construction.

²⁹ Cette valeur de 20°C correspond probablement à la température d'étalonnage de l'appareil et donc à la température à laquelle les valeurs de teneur en eau fournies seront les plus "justes".

pour de nombreux matériaux connus une précision suffisante lorsqu'il s'agit d'investigations simples. Étant donné toutefois les différences de compositions [minéralogiques et de structures poreuses] des matériaux de construction, ce procédé ne saurait être considéré comme une mesure de précision. [...] Pour les raisons précédemment mentionnées, il est impossible de garantir l'exactitude des mesures affichées non plus que les résultats et les conclusions en découlant.» Pour les interprétations, il est donc important de considérer les résultats en relatif et non pas en absolu.

A4.3 MESURES EFFECTUÉES EN COURS D'ADSORPTION DE VAPEUR D'EAU

Afin de déterminer si par une mesure de surface le conductivimètre permet de détecter l'eau adsorbée dans le réseau poreux, nous avons procédé comme suit :

1• les cubes de 15 cm d'arête sélectionnés - en équilibre avec les conditions ambiantes du laboratoire (température de l'ordre de 22-24°C et humidité relative comprise entre 19 et 39%) - ont été posés, face A vers le haut, dans une enceinte à humidité relative contrôlée à 33%, à côté d'un hygro-thermomètre enregistrant les variations de température et d'humidité pouvant affecter l'intérieur de l'enceinte toutes les demi-heures. **2•** Après 7 jours de mise à l'équilibre²⁶, les enceintes ont été ouvertes et aussi rapidement que possible, la température de surface des échantillons a été mesurée avec un thermomètre infrarouge puis les sondes HY2.72 du COMBO 200 ont été appuyées fortement³⁰ en plusieurs endroits de la face A. Parmi les valeurs mesurées, nous n'avons retenue que la plus élevée. Ces mesures ont eu lieu directement dans l'enceinte²⁷. Les dernières valeurs de température et d'humidité relative enregistrées par l'hygro-thermomètre avant l'ouverture de l'enceinte pour effectuer la mesure, sont relevées et considérées égales aux conditions ambiantes avec lesquelles l'échantillon était à l'équilibre au moment de la mesure. **3•** Dès la mesure terminée, l'humidité relative de l'enceinte était augmentée à la valeur supérieure, soit 55%, puis les enceintes étaient à nouveau fermées pour une semaine de sorte que l'échantillon puisse se mettre en équilibre avec les nouvelles conditions imposées. **4•** Les opérations 2 à 3 ont été répétées encore 4 fois, de sorte que les pourcentages d'humidité correspondants à l'eau adsorbée à 75, 86, 93 et 97% d'humidité relative puissent être mesurés avec le COMBO 200.

Aucune mesure témoin n'a été faite en parallèle à ces mesures.

Les pourcentages d'humidité correspondants à différentes quantités d'eau adsorbée aux parois des pores ont été mesurés sur 1 cube de chaque molasse (grès de Gurten, molasse de Villarod et molasse de la Mercerie) et sur 1 cube de grès de Wiesental. Ces expériences n'ont été faites sur aucun échantillon de grès de Maintal, tous les cubes de 15 cm d'arête de cette pierre étant utilisés pour d'autres mesures lorsque ces tests ont eu lieu.

La température de surface de l'ensemble des échantillons a varié entre 18 et 23°C pendant tout le temps des essais.

³⁰ Des essais préalables ont montré que pour assurer un contact plus ou moins équivalent à chaque mesure, la force à exercée sur les sondes appliquées sur les surfaces devait entraîner les premières traces d'écrasement - ou plus précisément de disjonction - des grains superficiels. Elle a donc été adaptée au matériau, la disjonction des grains de la molasse de Villarod nécessitant par exemple une force plus faible que la disjonction des grains du grès de Wiesental. Par conséquent les résultats obtenus pour un même type de pierre peuvent être comparés entre eux, mais les résultats obtenus sur des pierres différentes ne sont probablement pas comparables.

A4.4 MESURES EFFECTUÉES EN COURS D'IMBIBITION CAPILLAIRE À L'EAU

Afin d'évaluer l'intérêt d'une mesure de la conductivité électrique de surface dans le cadre de l'estimation de la quantité d'eau capillaire présente dans le réseau poreux des grès testés, nous avons procédé comme suit :

1• les cubes de 15 cm d'arête sélectionnés ont été laissés plusieurs semaines dans les conditions ambiantes du laboratoire (température de l'ordre de 22-24°C et humidité relative comprise entre 19 et 39%). **2•** Sur la face A de ces cubes "secs", la température de surface a été mesurée à l'aide d'un thermomètre infrarouge puis les sondes HY2.72 du COMBO 200 ont été appuyées fortement³⁰ en plusieurs endroits. **3•** Les cubes ont ensuite été posés sur leur face A dans un récipient contenant une mince couche d'eau régulièrement alimentée, de sorte que l'eau pénètre progressivement par imbibition capillaire depuis la face A vers la face C. **4•** A intervalles de temps croissants, les échantillons ont été sortis du récipient, grossièrement essuyés à l'aide d'une peau de chamois humide et pesés afin de connaître la quantité d'eau capillaire qu'ils contenaient au temps t. Après la pesée, la hauteur de la frange capillaire était mesurée sur les 4 faces B, D, E et F. La moyenne de ces quatre mesures donne la profondeur de pénétration de l'eau capillaire au temps t. **5•** Puis la température de surface de la face A a été mesurée à l'aide d'un thermomètre infrarouge avant d'y appuyer fortement les sondes HY2.72 du COMBO 200 en plusieurs endroits. Parmi les valeurs de teneur en eau mesurées, nous n'avons retenue que la plus élevée comme valeur de pourcentage d'humidité au temps t. **6•** Dès la fin des mesures, les cubes ont été reposés face A dans l'eau, de sorte que l'absorption capillaire puisse se poursuivre. **7•** Les étapes 3 à 6 ont ensuite été répétées jusqu'à ce que la frange capillaire ait traversé tout l'échantillon.

Aucune mesure témoin n'a été faite parallèlement à ces mesures.

Les pourcentages d'humidité correspondants à différentes quantités et profondeurs de pénétration de l'eau capillaire ont été mesurés :

- de 0 à 11.6 cm de profondeur de pénétration au moins, sur 2 cubes de grès de Wiesental et un cube de grès de Gurten ;
- de 0 à 1 cm de profondeur de pénétration sur 1 cube de grès de Wiesental, 1 cube de grès de Gurten, un cube de molasse de Villarlod et 1 cube de molasse de la Mercerie.

La température de surface de l'ensemble des échantillons a varié entre 21 et 23°C pendant tout le temps des essais.