

# Conservation de bâtiments historiques grâce à la mise en œuvre de techniques de modélisation et d'auscultation non destructives

Michael AURAS<sup>1</sup>, Ercan ERKUL<sup>2</sup>, Thomas MEIER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut für Steinkonservierung e.V., Mainz

<sup>2</sup>Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität, Kiel

## Résumé.

La conservation de bâtiments historiques requiert une analyse préalable, un contrôle de qualité et une surveillance de l'ouvrage approfondis afin de réduire au minimum les interventions au niveau de la substance du monument et d'éviter tout dommage consécutif. Actuellement les méthodes de reconnaissance non destructives et les procédés de modélisation numériques offrent des possibilités ayant fait leur preuve ou bien innovatrices permettant d'obtenir des informations solides sur les bâtiments et les modifications au niveau de leurs matériaux de constructions liées à l'âge. En même temps, cela permet de réduire au minimum les interventions consistant à prélever des matériaux ou à réaliser des ouvertures au niveau du bâtiment. Des résultats de recherche actuels seront présentés à travers des cas concrets. La combinaison de mesures au géoradar et de modélisations théoriques permet d'expliquer des anomalies mesurées en paramètres de matériel. Les exigences modernes telles que l'assainissement énergétique de bâtiments historiques présentent de nouveaux types de problèmes pour lesquels des solutions peuvent être trouvées à l'aide de modélisations du transport de chaleur et d'humidité. Le développement de la technique aux ultrasons et d'exploitation de signaux permet de nouvelles applications pour l'analyse de surfaces de grès érodées à l'aide d'ondes Rayleigh.



Projet cofinancé par le Fonds européen de développement régional dans  
du programme INTERREG IVA Grande Région  
*L'Union européenne investit dans votre avenir.*

Gefördert durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung im  
des Programms INTERREG IVA Großregion  
*Die Europäische Union investiert in Ihre Zukunft.*



## Introduction

De plus en plus souvent les méthodes d'analyse non destructives ou peu destructives sont appliquées également dans le domaine de la conservation et de la restauration des bâtiments historiques. Cela concerne aussi bien les examens préalables avant la mise en œuvre des mesures de restauration que le domaine de la surveillance des ouvrages. Des examens préalables approfondis permettent de planifier en détail les mesures à prendre afin de garantir une préservation maximale de la structure originale du bâtiment. En outre cette démarche garantit au maître d'ouvrage une plus grande sécurité en termes de calcul des coûts, les frais de réfection pouvant être estimés de manière plus exacte. Quant au monitoring, il vise la détection précoce de dommages au niveau du bâtiment afin de prévenir ou de retarder d'éventuels dégâts sérieux grâce à des travaux de maintenance ou de réparation préventifs.

Dans la suite nous allons présenter des exemples de cas illustrant l'application de méthodes d'analyse non destructives et de procédés de modélisation numérique. Nous présenterons des développements innovateurs dans le domaine des mesures ultrasoniques. La combinaison de la mesure et de la modélisation permet la validation réciproque et l'optimisation des différentes approches méthodiques.

### Examen de colonnes de grès au géoradar

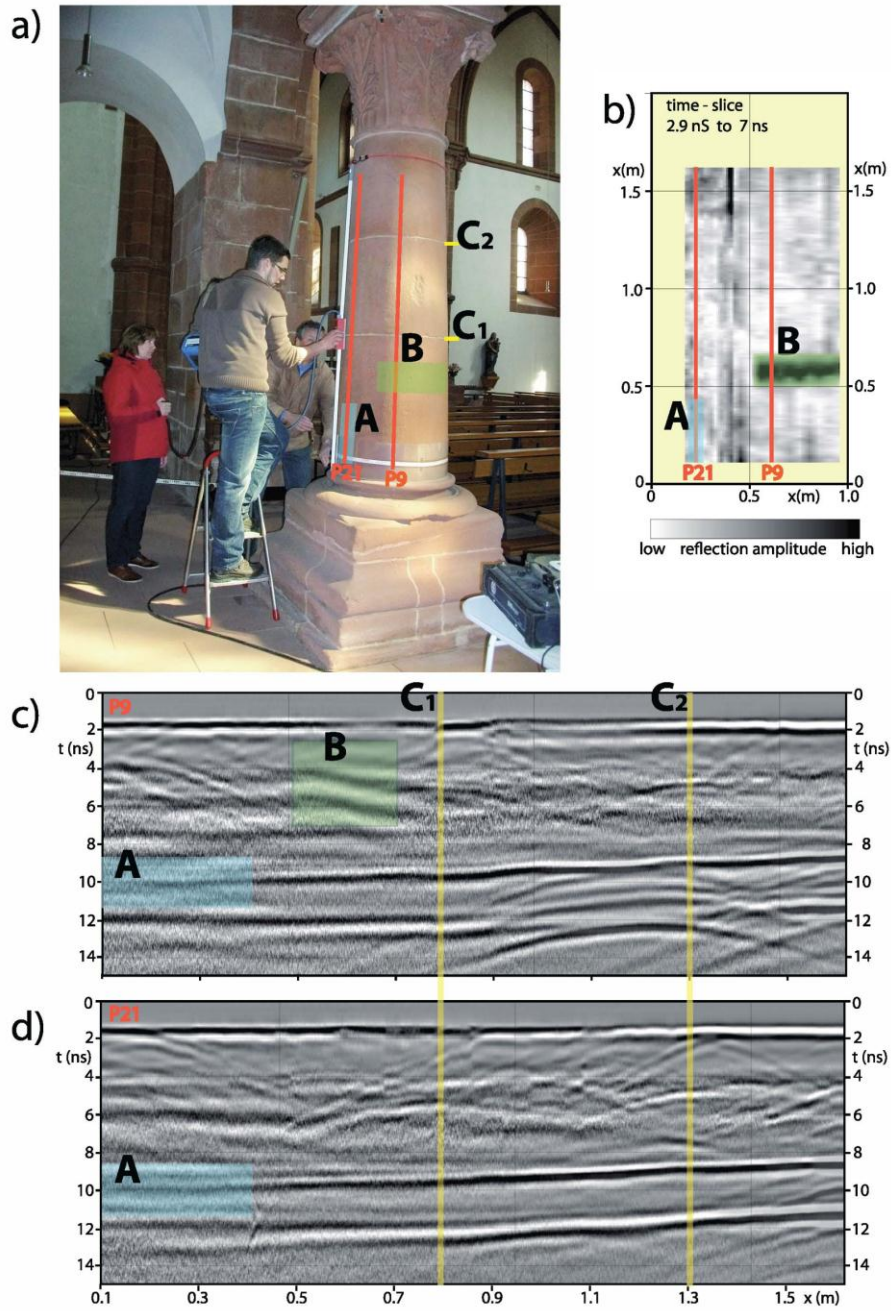
Dans le cadre du projet de recherche TOAST<sup>i</sup>, l'Université de Kiel a ausculté au géoradar les colonnes de grès de la romantique église conventuelle romane d'Enkenbach-Alsenborn près de Kaiserslautern. La construction de l'église a été achevée au XIII<sup>ème</sup> siècle et le bâtiment se distingue par un travail sculptural de grande qualité des chapiteaux et des portails. L'église se trouve dans une plaine alluviale et présente de fortes altérations structurelles dues à l'humidité montante et aux pressions salines qui en découlent. Le matériau de construction utilisé est une variété locale du grès du Trias inférieur de porosité (12 vol. %) et de résistance à la compression (40 – 45 N/mm<sup>2</sup>) moyennes. Des mesures au géoradar, aux infrarouges et aux ultrasons ont été réalisées en vue de l'évaluation de la structure interne ainsi que des détériorations en surface. A ce sujet nous présenterons à titre d'exemple la combinaison de mesures au radar effectuées au niveau d'une colonne de grès et de la modélisation de la propagation d'ondes [1].

Lors de la mesure, les ondes radar traversent la structure de la construction. Elles sont réfléchies aux limites de séparation entre les différents matériaux présentant des propriétés physiques distinctes et sont de nouveau enregistrées à la surface. Une antenne de 1,6 GHz a permis d'enregistrer des signaux au niveau de profils verticaux d'une longueur de 2m à intervalle de 5 cm (ill. 1a). Les résultats des mesures peuvent être représentés sous forme de section temporelle (ill. 1b) ou sous celle d'un radargramme (ill. 1c, 1d), les amplitudes de réflexion mesurées étant représentées sous forme de niveaux de gris. Les radargrammes représentent les mesures réalisées le long des profils P 9 et P 21. A cet endroit, les réflexions sur l'avant (à env. 1 ns) et sur l'arrière de la colonne apparaissent clairement. L'écho de la paroi arrière se situe dans la partie inférieure de la colonne (côté gauche des radargrammes) à env. 10 ns et à env. 8 ns dans la partie supérieure de la colonne, puisque celle-ci s'amincit vers le haut (côté droit des radargrammes). Les marques C 1 et C 2 représentent la situation des joints entre les différents éléments de la colonne. Les lignes rouges indiquent la position des profils de mesure P 9 et P 21. Les mesures mettent en évidence deux anomalies. Le secteur B marqué en vert indique une forte réflexion horizontale reconnaissable dans la section temporelle (ill. 1 b) et dans le radargramme du profil P 9 (ill. 1 c). Cette réflexion est détectable sur plusieurs profils, se situe à une profondeur d'env. 15 cm, elle est longue d'env. 40 cm et haute de 7 cm. Il est probable qu'il s'agisse d'une inclusion solide ou d'une fissuration.

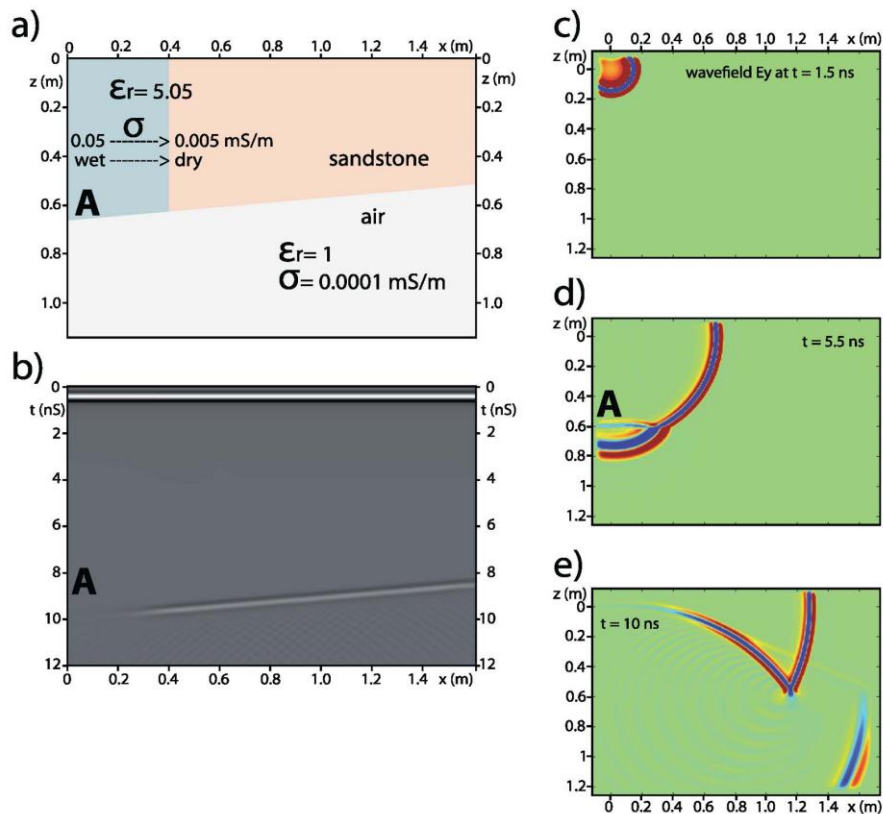
Dans le secteur A marqué en bleu l'écho de la paroi arrière montre une amplitude plus faible que dans les parties plus élevées de la colonne. Cela indique une conductivité électrique plus élevée dans ce secteur qui est probablement due aux teneurs localement plus importantes en sel et en humidité. Des taux d'humidité plus importants augmenteraient également la conductivité électrique tout en conduisant à une augmentation des constantes diélectriques. Les dossiers de

construction indiquent qu'en dessous du niveau du sol actuel un barrage horizontal a été intégré au niveau de la base des colonnes. Ce barrage permet de combattre de façon efficace la remontée d'humidité dans les colonnes. Les mesures de la pression saline au niveau de la colonne analysée montrent que les teneurs en sel sont supérieures dans la partie inférieure [2], ce qui correspond aux résultats des mesures radar. Il est donc probable qu'autrefois l'humidité remontante transportait des sels dans la partie inférieure de la colonne. L'intégration du barrage horizontal au niveau de la base de la colonne a provoqué l'assèchement du grès, conduisant à des résidus de sels dans le grès.

La modélisation 2-D a permis de calculer la propagation des ondes dans la colonne (ill. 2). La colonne a été modélisée sous forme de couche de grès horizontale d'épaisseur diminuante supportée par l'air. Le radargramme synthétique qui en résulte (ill. 2b) montre l'écho de la paroi arrière en même temps que les données mesurées. La seconde réflexion au niveau d'env. 12 ns des données de mesure n'apparaît pas dans le radargramme synthétique. Il est probable qu'il s'agisse d'un effet 3-D ne pouvant pas être modélisé en 2-D. Il est probablement dû à des réflexions multiples au niveau des parois latérales de la colonne. Les illustrations 2c à 2e montrent la propagation des ondes calculée à différents moments. Au début les ondes se propagent circulairement au départ de leur lieu d'origine (ill. 2c). Après environ 5,5 ns elles atteignent la paroi postérieure et elles sont réfléchies. Cela correspond à la réflexion qui apparaît au niveau de 10 ns dans les radargrammes mesurés. En cas de teneur en eau accrue, la modélisation devrait en principe se faire à l'aide d'une constante diélectrique plus élevée, ce qui toutefois réduirait la concordance avec les mesures des radargrammes. C'est pourquoi les résultats de la modélisation permettent également d'exclure un taux d'humidité accru dans la partie inférieure de la colonne. Afin de modéliser l'effet d'atténuation lié à la pression saline accrue, la conductivité électrique a été réduite de manière linéaire de 0,05 à 0,005 mS/m dans la partie inférieure de la colonne (ill. 2a), ce qui permet d'obtenir une bonne concordance entre les données mesurées et la modélisation.



ill. 1: Mesures au géoradar sur une colonne de grès de l'église d'Enkenbach a) mesure de profil; b) section temporelle 2,9 – 7 ns; c) radargramme du profil P 9; d) radargramme P 21 [1]



ill. 2: Modélisation de la propagation d'onde radar dans la colonne de grès a) modèle; b) radargramme calculé; c) propagation des ondes après 1,5 ns; d) après 5,5 ns; e) après 10ns [1]

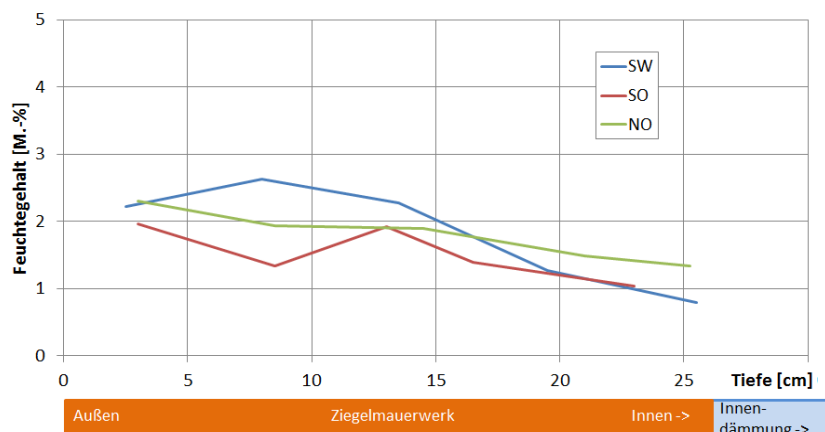
### Monitoring de l'humidité et modélisation du transport d'eau et de chaleur pour contrôle d'une isolation intérieure sans hydrophobisation de la façade

L'intégration d'une isolation intérieure dans des bâtiments existants suppose que la façade soit étanche à la pluie battante [3]. La source principale d'humidité dans un mur extérieur est dans la plupart des cas liée à un phénomène de pluie battante pénétrant de la surface à l'intérieur du mur par phénomène de capillarité. En outre il est possible qu'en cas de dépassement du point de condensation dans la section transversale du mur il se produise aussi un phénomène de condensation d'eau en provenance de la phase de vapeur. L'apport de chaleur par chauffage côté espace intérieur du mur favorise le séchage. Lorsqu'une isolation intérieure est intégrée, le flux de chaleur en provenance du côté de l'espace intérieur à travers la section du mur en direction du côté extérieur du mur est fortement réduit. Ceci réduit la vitesse de séchage du mur, ce qui explique le fait que sous certaines conditions l'humidité puisse s'accumuler progressivement dans le mur. La conséquence logique de ces réflexions et d'un grand nombre de calculs de modélisation débouche sur l'exigence d'étanchéité à la pluie battante en vue de réduire la pénétration d'humidité et d'éviter l'accumulation d'humidité dans le mur.

A l'opposé de cette exigence il faut tenir compte du fait que certaines constructions historiques et souvent classées avec des façades constituées de matériaux absorbants non étanches à la pluie battante fonctionnent jusqu'à présent sans problème au niveau de la physique du bâtiment. Se pose dès lors la question de savoir si ces constructions doivent réellement être traitées de façon à les rendre hydrophobes ou avec un effet inhibiteur pour permettre une isolation intérieure. Nous avons cherché à apporter une réponse à cette question dans l'exemple de cas de l'ancien bâtiment de transformateur à Bischofsheim [4]. Le bâtiment classé monument historique ayant perdu son usage originel avait été reconverti en centre associatif. Un assainissement énergétique du bâtiment avait été projeté en tant que partie des travaux de réhabilitation et de rénovation.

Il était initialement prévu de réaliser un assainissement général de toutes les façades avec un nettoyage de fond, l'élimination du mortier des joints avec remplacement intégral des joints, le remplacement de toutes les briques même faiblement endommagées, la réparation de fissurations sur les surfaces des pierres avec hydrophobisation successive de toutes les surfaces des murs extérieurs. Cela aurait permis de réduire à un niveau acceptable l'absorption de pluie battante par la façade et de pouvoir procéder aux mesures d'isolation sans provoquer de dommages. Toutefois cette démarche va à l'encontre de l'exigence fondamentale en terme de conservation des bâtiments historiques qui est de réduire au minimum les interventions au niveau de la substance historique, puisque les mesures préparatoires constituent une intervention massive au niveau de la substance originale. En outre l'efficacité des procédés d'imprégnation se réduit avec le temps, ce qui peut entraîner des dommages graves [5], [6] et rend nécessaire un contrôle régulier de l'effet hydrophobe.

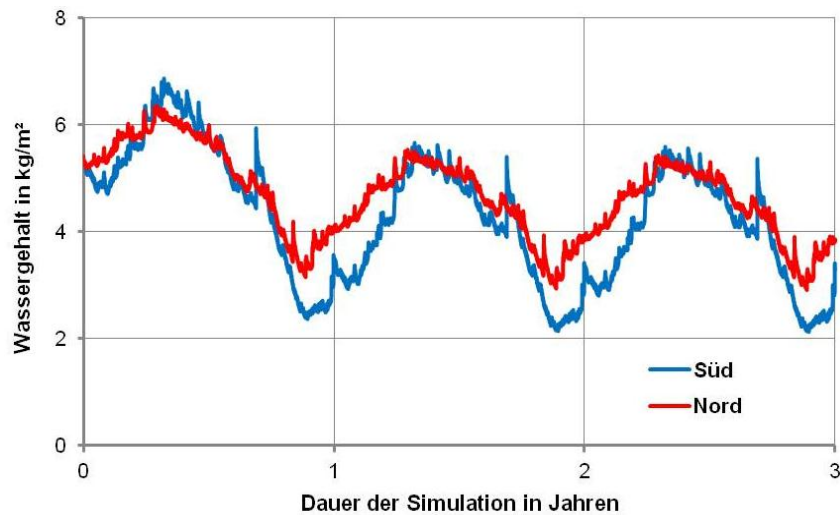
Dans le cas présent, il a été proposé de renoncer en un premier temps au remplacement des joints et à l'hydrophobisation et de substituer ces mesures par un simple monitoring de l'exposition à l'eau des murs extérieurs. Tout d'abord nous avons utilisé des échantillons de carotte afin de déterminer la teneur en eau dans la section transversale du mur. Il est conseillé de prélever ces échantillons à un rythme annuel, respectivement à la fin de la période hivernale, à proximité des croisillons des joints pour vérifier si au fil du temps une accumulation d'humidité peut être observée au niveau de la maçonnerie à proximité de la couche intérieure d'isolation. Au cas où l'exposition à l'eau augmenterait de manière continue, il est possible de procéder rétrospectivement au remplacement des joints et à l'hydrophobisation. La présente combinaison d'isolation intérieure, de mur en brique nue à simple épaisseur ainsi que l'élimination de mesures en vue de réduire l'impact des pluies battantes est très défavorable du point de vue de la physique du bâtiment. Néanmoins les résultats des mesures d'humidité montrent que, du moins dans un premier temps, il n'y a pas d'accumulation d'humidité dans la section du mur (ill. 3). Pour ne pas être contraints de poursuivre ces séries de mesures prévoyant des interventions destructives, entre temps deux électrodes servant à mesurer la résistance électrique ont été intégrées au profil de profondeur, mesure qui n'a toutefois pas encore permis de fournir des résultats fiables.



ill. 3: Exposition à l'eau mesurée dans les sections transversales des murs en fonction de l'orientation un an après le montage de l'isolation intérieure

En parallèle des calculs de simulation combinés du transport de chaleur et d'humidité ont été réalisés conformément aux nouvelles fiches mémoire WTA [7], [8]. Les calculs ont été réalisés en utilisant la version actuelle du programme WUFI de l'Institut Fraunhofer de physique du bâtiment. L'illustration 4 représente la teneur en eau totale calculée pour la construction durant les 3 premières années de la simulation. Les calculs montrent que d'un côté le côté nord du bâtiment présente une teneur en eau moyenne plus élevée que le côté sud, mais que de l'autre des charges de pointe plus élevées suite à des phénomènes de pluie battante sont constatés pour la façade sud. En même temps l'illustration 4 met en évidence qu'indépendamment de

l'orientation un processus d'assèchement a lieu sur la base des conditions initiales habituellement retenues, à savoir 20°C et 80 % hum. r. Il ne faut donc pas s'attendre à une humidification constante pour cette construction, compte tenu des conditions cadre climatiques. Sur la base de la simulation cette mesure d'isolation apparaît comme non critique en ce qui concerne la teneur en humidité. Cela repose en particulier sur la situation favorable en terme de climat (faible risque de pluie et température annuelle moyenne élevée), ce qui permet à l'eau de pluie éventuellement infiltrée de sécher relativement vite. Toutefois un calcul de simulation ne saurait être plus précis que les données caractéristiques sur lesquelles il repose. C'est pourquoi il est conseillé de procéder à un contrôle de mesure des teneurs en humidité (ill. 3).



ill. 4 : Teneur en eau totale mesurée au niveau du mur intérieur isolé pour une orientation sud et une orientation nord [4]

La solution proposée engendre une réduction des coûts pour le maître d'ouvrage dans la mesure où les mesures à prévoir et l'énergie de chauffage sont moins importantes. Quant à la conservation des bâtiments, elle profite de la conservation maximale de la structure du bâtiment grâce au non remplacement des joints et à la conservation des surfaces originales des briques en l'absence de colmatage des fissures. Les deux parties profitent en outre du parti pris de ne pas hydrophobiser les murs, mesure qui impliquerait des conséquences non calculables et des coûts de contrôle et de maintenance non quantifiables. Le cas de figure présenté montre également que certaines constructions historiques sont suffisamment robustes pour pouvoir supporter une isolation interne sans que les propriétés des matériaux historiques n'aient à subir de modification importante.

### Mesure ultrasonique pour la détection de dommages dus à l'érosion à proximité de la surface des pierres en grès

La Porta Nigra à Trèves est la porte de ville d'époque romaine la mieux conservée au nord des Alpes et fait partie du patrimoine culturel mondial de l'UNESCO depuis 1986. Le nom de Porta Nigra est transmis depuis le Moyen Age et prouve que les surfaces de la pierre de grès claire utilisée pour la construction sont noircies depuis déjà longtemps. La coloration noirâtre est due en partie à la mobilisation de liaisons ferreuses dans le grès qui ont été transportées à la surface de la pierre, en partie à des dépôts de suie, de poussière minérale et de polluants atmosphériques. Ces dépôts obstruent en partie les espaces entre les pores de la pierre à la superficie du bâtiment, ce qui a pour conséquence de rendre la surface de la pierre plus dure et plus dense que le substrat. De nombreuses analyses réalisées sur d'autres monuments en pierre ont mis en évidence que ce type de compactage pouvait entraîner des dommages sur le long terme, lorsqu'une zone friable se forme sous la surface compactée provoquant d'éventuelles altérations au niveau de la surface originelle de la pierre [9]. Cela provoque la perte irrémédiable de détails réalisés par le travail de la

Pierre en surface. C'est pourquoi on procède usuellement au nettoyage des surfaces de pierre ainsi encrassées afin d'éviter la propagation ultérieure des dommages ou bien de la ralentir [10]. Dans le cas de la Porta Nigra ceci s'avère néanmoins comme problématique puisque le nettoyage de la pierre irait à l'encontre du nom porté par le bâtiment.

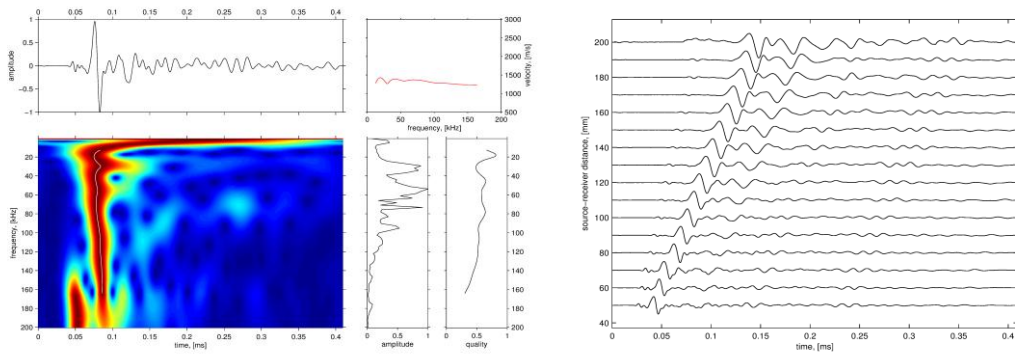
Heureusement de forts écaillages des croûtes noires au niveau de la Porta Nigra sont constatés uniquement à des endroits relativement rares. Ceci est probablement dû en premier lieu aux dernières mesures de réflexion à la fin des années 1960 qui ont permis de remplacer une grande partie de la substance de pierre détériorée. Ces mesures avaient également permis une amélioration sensible du guidage de l'eau dans la construction, ce qui a permis de ralentir nettement l'apparition de nouvelles dégradations au niveau de la pierre.

Sous les croûtes il est impossible de détecter macroscopiquement une détérioration de la pierre à un stade précoce. Si une telle détérioration est déjà enclenchée, il serait possible d'empêcher une évolution future des détériorations ou au moins de les ralentir sensiblement en nettoyant partiellement et avec de très grandes précautions la pierre et en la renforçant éventuellement. Afin d'évaluer la structure, l'Université de Kiel a réalisé dans le cadre d'un projet de recherche<sup>ii</sup> des mesures aux ultrasons au niveau de portions sélectionnées de la surface en pierre de grès de la Porta Nigra. Normalement les mesures aux ultrasons réalisées sur des pierres naturelles se font à travers le procédé de transmission et l'évaluation concerne uniquement la vitesse des ondes longitudinales. A cet effet, transmetteur et récepteur du signal sont placés de part et d'autre d'un bloc de pierre ou d'une partie de sculpture. La mesure de la vitesse des ultrasons est intégrée sur l'ensemble du trajet mesuré, si bien que des désagrégations dues aux altérations dans les secteurs proches de la superficie sont difficiles à détecter.

C'est pourquoi dans le cas présent ce sont surtout les ondes Rayleigh qui ont été évaluées, ondes qui suivent une trajectoire parallèle à la surface de la pierre et dont la profondeur de pénétration dans la pierre, variant entre quelques millimètres seulement et quelques centimètres, dépend de la fréquence. Une excitation sur une bande large et une exploitation des signaux par analyse de fréquence [11] permettent de déduire un profil de profondeur qui à son tour permet de caractériser les zones de désagrégation ou de solidification à quelques centimètres en dessous de la surface. A cet effet des mesures de profil ont été effectuées pour lesquelles transmetteur et récepteurs sont placés à une distance de 5 cm à la superficie de la pierre. Après enregistrement du premier signal, le transmetteur est resté en place, alors que le récepteur a été décalé de 0,5 à 2 cm. Cette manipulation a été répétée à plusieurs reprises, pour chaque point de mesure 10 à 15 mesures individuelles ont permis de réaliser des profils. Ceci a permis de déterminer la vitesse de groupe de l'onde Rayleigh. Une diminution de la vitesse de groupe allant de pair avec une augmentation de la fréquence indique une désagrégation en surface alors qu'une augmentation de la vitesse de groupe allant de pair avec l'augmentation de la fréquence indique un compactage du matériel à proximité de la surface. Par conséquent une stratification et des modifications de la structure de la pierre peuvent être détectées avec la profondeur.

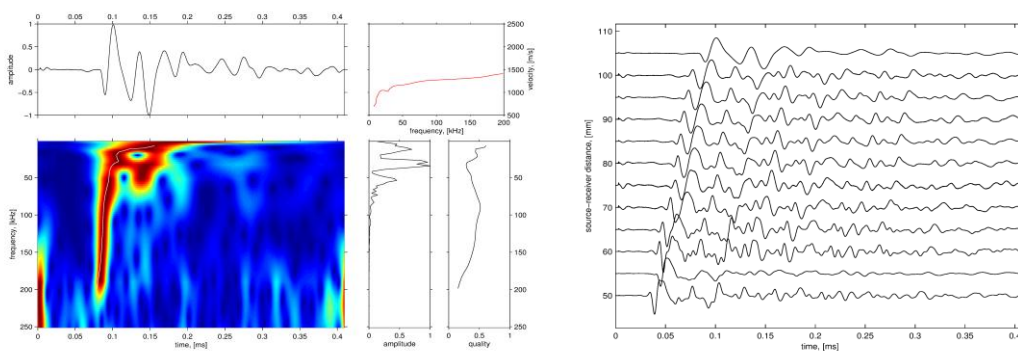
Pour réaliser ces mesures, des sondes de mesure à ultrasons à bande large (20 – 300 kHz) ont été placées à la surface au moyen d'un dispositif de couplage manuel avec une pression de contact faible et constante. Les sondes de mesure sont équipées d'une pointe de palpé de seulement 2 mm de diamètre et permettent ainsi de réaliser des mesures très précises et reproductibles sans utilisation de liquide de couplage. Les illustrations 5 – 7 montrent quelques résultats à titre d'exemples. L'illustration 5 présente les résultats obtenus pour un bloc de grès du Moyen Age de la Porta Nigra avec un encrassement réduit et une structure intacte. En bas à droite on trouve les mesures individuelles du profil, du côté gauche l'exploitation des données pour une mesure individuelle de ce profil. En bas à gauche le diagramme en couleur temps-fréquence, à droite de ce diagramme l'amplitude en fonction de la fréquence et une mesure de qualité pour la détermination de la vitesse de groupe des ondes Rayleigh. Au-dessus une ligne rouge représente la vitesse pour les fréquences individuelles. Cette ligne montre que la vitesse de l'onde Rayleigh augmente légèrement en passant de fréquences élevées (à proximité de la surface) à des fréquences moins élevées (profondeur de pénétration plus importante). Ceci indique une désagrégation légère de la structure en grès à proximité de la surface.



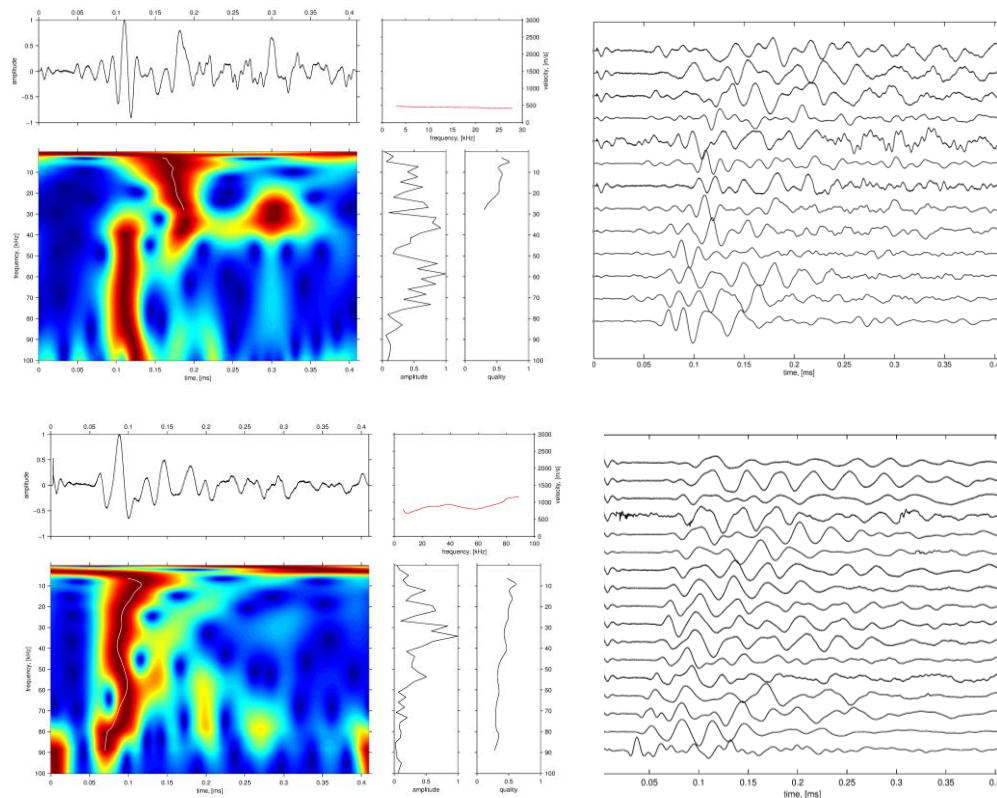


ill.5 : Mesure aux ultrasons sur une pierre en grès peu altérée

Sur l'illustration 6 la ligne rouge met en évidence des vitesses décroissantes sur le diagramme fréquence-vitesse lors du passage de fréquences élevées à des fréquences plus faibles. Ceci montre le compactage dans la partie proche de la surface dû à la formation d'une croûte. Les vitesses des ultrasons sont fortement réduites par rapport au premier point de mesure, les amplitudes des fréquences élevées sont fortement amorties (voir diagramme amplitude-fréquence partie inférieure, au milieu).



ill. 6 : Résultat de mesure sur un bloc de grès romain avec croûte noire



ill. 7 : Mesures aux ultrasons sur un bloc de grès fortement altéré avant (partie supérieure) et après consolidation de la pierre (en bas)

Pour le dernier exemple, nous avons examiné la surface d'une pierre de grès fortement altérée (ill. 7 en haut). Les mesures de profil mettent en évidence des formes d'ondes irrégulières pour lesquelles il est en partie impossible de reconnaître l'utilisation d'ondes P et Rayleigh. Le diagramme temps-fréquence est lui aussi très fortement dilaté. Les vitesses des ultrasons se situent à un niveau extrêmement bas avec des valeurs autour de 500 m/s. Une nouvelle mesure a été réalisée à cet endroit après consolidation de la pierre avec de l'ester d'acide silicique (ill. 7 en bas). A présent la mise en œuvre d'ondes est beaucoup mieux reconnaissable et la vitesse des ultrasons est nettement plus élevée, du moins à proximité de la surface. Pour les fréquences plus faibles néanmoins elle diminue très nettement, ce qui indique que l'agent consolidant a provoqué une consolidation à proximité de la surface.

Les mesures réalisées au niveau de la Porta Nigra et d'autres objets montrent que la mesure à l'aide des ondes ultrasoniques superficielles permet de procéder à une analyse non destructive du secteur proche de la superficie jusqu'à une profondeur d'env. 2 cm. Ce secteur est particulièrement important car il est tout particulièrement touché par l'altération du grès. L'analyse de la dépendance de la propagation des ondes Rayleigh par rapport à la fréquence permet de détecter et d'évaluer des modifications au niveau de la vitesse de propagation des ondes élastiques en fonction de la profondeur. Ceci permet de tirer des conclusions quant à la formation de croûtes et à d'éventuels processus de désagrégation ou de consolidation.

Les aperçus des détériorations et par conséquent également les formes d'ondes enregistrées montrent une variabilité importante. Toutefois la dépendance de l'onde Rayleigh par rapport à la fréquence permet de distinguer des schémas de détérioration typiques ainsi que des modifications au niveau de la vitesse en fonction de la profondeur qui en dépendent :

- La pierre intacte présente des formes d'ondes Rayleigh avec une dispersion et un amortissement faibles. La vitesse de l'onde Rayleigh se situe entre env. 1300 m/s et 1400 m/s indépendamment de la fréquence.
- Dans les parties claires ou usées par les agents atmosphériques les vitesses sont réduites, la plupart du temps près de la surface (quelques millimètres jusqu'à un centimètre). Ceci semble

indiquer une perte de solidité à proximité de la surface. Les vitesses de groupe du mode base Raleigh peuvent être réduites jusqu'à 1000 m/s en cas de fréquences élevées.

- Les parties fortement friables présentent en partie une perte de solidité drastique sur les premiers centimètres. Le contact lâche entre les grains est suggéré par des vitesses très faibles pour les ondes Rayleigh. Les vitesses de l'onde Rayleigh peuvent être réduites à 500 m/s. Les formes des ondes sont souvent simples et un amortissement important se produit.
- Les croûtes noires sont quant à elles plutôt en lien avec une augmentation de la vitesse jusqu'à 1500 m/s ou 2000 m/s, le profil de profondeur pouvant toutefois être très variable. Les croûtes peuvent être homogènes, ce qui entraîne des formes d'ondes simples et des modifications faibles de la vitesse en fonction de la fréquence. Mais elles peuvent aussi être de plus en plus consolidées à la surface, ce qui entraîne une vitesse de groupe croissante avec l'augmentation de la fréquence. Dans d'autres cas la croûte perd de sa solidité en surface, ce qui se manifeste à travers la perte de vitesse à fréquence croissante. Dans ce cas les vitesses peuvent tomber à env. 1200 m/s. Dans ces cas, des vitesses plus élevées sont constatées à une profondeur entre 5 mm et 1 cm ; elles sont réduites à proximité de la surface.
- Les croûtes et les écailles qui se détachent peuvent présenter des vitesses encore plus basses et être liées à des formes d'ondes très complexes.

### **Conclusions**

Les exemples présentés montrent de façon succincte de quelle manière l'analyse de la substance de bâtiments historiques dans le cadre de mesures de restauration ou de monitoring peut profiter de l'application de techniques d'auscultation non destructives et de méthodes numériques de modélisation. Un large éventail d'applications et de techniques d'auscultation non destructives est disponible pour les applications les plus variées. En particulier pour les bâtiments historiques la prise d'échantillons pour les analyses en laboratoire constitue un problème, c'est pourquoi il est raisonnable de privilégier les techniques d'auscultation non destructives ou peu destructives. Dans de nombreux cas, des méthodes destructives doivent être appliquées pour vérifier les résultats de ces investigations, mais l'examen préalable par des méthodes non destructives permet de réduire à un minimum les échantillons, les secteurs critiques pouvant mieux être localisés en amont.

Pour les exemples cités d'Enkenbach et de Trèves, des techniques d'auscultation non destructives ont été utilisées pour réaliser le diagnostic des dommages (Enkenbach, Trèves) et pour le contrôle de qualité (consolidation des pierres à Trèves). L'utilisation de modélisations peut servir à reconnaître les parties critiques de la construction ou les situations de sollicitation importante. La combinaison des mesures et de la modélisation permet de sécuriser mutuellement les résultats obtenus (exemple de Bischofsheim) et de vérifier l'interprétation des valeurs mesurées (Enkenbach). Dans le cas de l'utilisation d'ultrasons, les développements récents présentés pour les techniques de mesure et l'interprétation de signaux permettent de nouvelles applications telles que la mesure des ondes Rayleigh pour l'évaluation des intensités de dégradation et des mesures de renforcement des surfaces en grès.

### **Remerciements**

Les auteurs remercient les responsables du programme géotechnologies du Ministère fédéral de la Formation et de la Recherche ainsi que la Deutsche Forschungsgemeinschaft et la Fondation Deutsche Bundesstiftung Umwelt pour leur soutien financier. Nous remercions également les maîtres d'ouvrage et les représentants des maîtres d'ouvrages des bâtiments historiques mentionnés ainsi que les administrations des monuments historiques pour leur autorisation et leur soutien logistique lors de la réalisation des mesures. Nous tenons à remercier Anatol Worch pour les modélisations du transport d'humidité et de chaleur dans l'exemple de Bischofsheim. Et bien entendu nous remercions tout particulièrement Manfred Wenk et les nombreux étudiants de l'Université de Kiel qui se sont inlassablement engagés pour réaliser les mesures d'Enkenbach et de Trèves.

## Bibliographie

- [1] Erkul, E., Kaplanvural, I., Wilken, D., Wunderlich, T., Meier, T. & Auras, M. (2011): Modelling of GPR and infrared thermography measurements at a weathered column of sandstone. In: Drahor, M.G. & Berge, M.E. (Eds.): Archaeological prospection. Extended Abstracts of the 9th International Conference on Archaeological Prospection. 19.-24.09.2011, Izmir (Turkey), pp. 265 – 269
- [2] Egloffstein, P. (2009): Untersuchung von Salzbelastungen in Sandsteinsäulen der Kirche Enkenbach. Données non publiées, Institut für Steinkonservierung e.V., Mainz
- [3] WTA Merkblatt 6-4-01 (2009): Innendämmung nach WTA I: Planungsleitfaden. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München
- [4] Worch, A. & Auras, M. (2012): Innendämmung von einschaligem Ziegelmauerwerk. Bausubstanz, cahier 3/2012: pp. 56 - 61
- [5] Wendler, E. & Snethlage, R. (1988): Durability of Hydrophobing Treatments of Natural Stone Buildings. In: Marinos, P. G.; Koukis, G. C. (eds.): The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites. Proc. Intern. Symp. Athens, 19.–23.09.1988
- [6] WTA-Merkblatt 3-17-10 (2010): Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München
- [7] WTA Merkblatt 6-1-01 (2001): Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München
- [8] WTA Merkblatt 6-2-01 (2001): Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München
- [9] Neumann, H.-H. (1994): Aufbau, Ausbildung und Verbreitung schwarzer Gipskrusten, dünner schwarzer Schichten und Schalen sowie damit zusammenhängender Gefügeschäden an Bauwerken aus Naturstein. Dissertation, Universität Hamburg
- [10] Auras, M. (1997): Natursteinreinigung. Die Denkmalpflege 55: pp. 49 – 54
- [11] Meier, T., Dietrich, K., Stöckhert, B., Harjes, H.-P., 2004. One-dimensional models of shear-wave velocity for the eastern Mediterranean obtained from the inversion of Rayleigh wave phase velocities and tectonic implications, Geophys. J. Int., 156, pp- 45-58.

---

<sup>i</sup> „TOAST - Toolbox for Applied Seismic Tomography“, partie du programme de recherche et de développement en géotechnologies soutenu par le Ministère fédéral de la Recherche et des Technologies ainsi que par la Deutsche Forschungsgemeinschaft

<sup>ii</sup> „Analyse umweltinduzierter Schmutzkrusten und abgestufte Reinigung an den Werksteinen der Porta Nigra in Trier“, soutenu par la Deutsche Bundesstiftung Umwelt