



NOTE D'INFORMATION TECHNIQUE

N° 252

UNE ÉDITION DU CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION

Décembre 2014



L'humidité dans les constructions
Particularités de l'humidité ascensionnelle
(remplace la NIT 210)



NOTE D'INFORMATION TECHNIQUE

N° 252

L'humidité dans les constructions

Particularités de l'humidité ascensionnelle (remplace la NIT 210)

La présente Note d'information technique a été élaborée sous l'égide du Comité technique Gros œuvre et remplace la NIT 210. Elle s'appuie sur les compétences des membres d'un groupe de travail mis sur pied avec le soutien de la Guidance technologique 'Ecoconstruction et développement durable', subsidiée par la Région de Bruxelles-Capitale au travers du financement de l'Institut bruxellois pour la recherche et l'innovation (InnovIRIS), ainsi que de la Guidance technologique COM-MAT 'Matériaux et techniques de construction durables', bénéficiant du soutien financier de la Direction générale de l'économie et de l'emploi (DGO6) du Service public de Wallonie. Cette Note intègre également les derniers enseignements de la recherche HUMIBATI, subsidiée par la Région wallonne (2010-2012).

Composition du Comité technique Gros œuvre

Président

L. Eeckhout

Membres

N. Barbarossa, J. Bettens, C. Buyl, C. Callandt, B. Coghe, L. Courard, G. De Schutter, M. Denayer, A. Dherte, A. Dillen, P. Dresse, S. Dumortier, V. Favier, D. Hellemans, P. ibens, P. Jaumain, B. Lebon, J. Maertens, C. Maes, B. Marynissen, G. Michaux, K. Neutens, J. Petit, P. Pirotton, M. Stas, J. Vander Linden, K. Van Hooyweghe, B. Wallyn, G. Xhonneux

Ingénieurs-animateurs

B. Parmentier et N. Huybrechts (CSTC)

Composition du groupe de travail

Membres

H. Ackermann, K. Allaert, J. Bettens, C. Buyl, H. De Clercq, S. Declercq, W. Dombrecht, L. Eeckhout, R. Keppens, C. Ladang, C. Malfilatre, F. Moens, K. Neutens, T. Pacary, D. Pallix, S. Peters, C. Pien, J. Roegiers, C. Sluiter, J. Torfs, B. Vanden Houte, P. Van Gysegem, D. Versées, T. Vissac

Ingénieurs-rapporteurs

S. Herinckx et Y. Vanhellemont (CSTC)

Ont également apporté leur collaboration à l'élaboration du document :

M. de Bouw, P. Montariol et P. Steenhoudt (CSTC) ainsi que M. Wagneur (ex CSTC)



CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION

CSTC, établissement reconnu en application de l'arrêté-loi du 30 janvier 1947
Siège social : Rue du Lombard 42 à 1000 Bruxelles

Publication à caractère scientifique visant à faire connaître les résultats des études et recherches menées dans le domaine de la construction en Belgique et à l'étranger.

La reproduction ou la traduction, même partielles, du texte de la présente Note d'information technique n'est autorisée qu'avec le consentement de l'éditeur responsable.

Sommaire

PRÉFACE.....	5
1 INTRODUCTION	7
1.1 Pathologies liées à la présence d'humidité et de sels solubles dans les constructions.....	7
1.1.1 Pathologies entraînant la dégradation des matériaux de construction ou de finition.....	7
1.1.2 Pathologies ayant un effet néfaste sur le confort et la santé des occupants.....	10
1.2 Humidité ascensionnelle et enjeux dans les constructions	10
1.2.1 Bâtiments anciens	10
1.2.2 Bâtiments plus récents.....	11
1.2.3 Traitement de l'humidité dans le cadre d'une rénovation énergétique.....	11
1.2.4 Séquence des travaux	12
1.3 Objectifs de cette Note d'information technique	12
1.4 Mémento pour l'établissement de l'offre de prix	12
2 TRANSPORT ET CAUSES POTENTIELLES D'HUMIDITÉ DANS LES CONSTRUCTIONS.....	13
2.1 Transport d'humidité et de sels dans les matériaux de construction poreux	13
2.1.1 Porosité	13
2.1.2 Transport de vapeur	13
2.1.3 Hygroscopicité	14
2.1.4 Capillarité	14
2.1.5 Séchage.....	15
2.1.6 Transport et manifestation des sels solubles dans les matériaux poreux	15
2.1.7 Conséquences pratiques pour les maçonneries.....	16
2.2 Causes potentielles d'humidité dans les constructions	17
2.2.1 Humidité de construction	17
2.2.2 Condensation superficielle ou interne.....	17
2.2.3 Hygroscopicité des matériaux de construction.....	18
2.2.4 Sels solubles contenus dans les matériaux de construction	19
2.2.5 Infiltrations dues aux pluies	20
2.2.6 Humidité ascensionnelle	21
2.2.7 Autres causes d'humidification.....	23
3 DIAGNOSTIC DE L'HUMIDITÉ DANS LES CONSTRUCTIONS	25
3.1 Mise en évidence des causes d'humidité : dialogue, constatations et mesures	25
3.1.1 Mesure résistive ou capacitive de l'humidité.....	26
3.1.2 Mesure de l'humidité par pesées comparatives ou gravimétrie	27
3.1.3 Mesure de l'humidité au moyen d'une bombe à carbure.....	28
3.1.4 Détermination de la présence de sels	28
3.1.5 Mesure des conditions hygrométriques ambiantes et des températures de surface	30
3.2 Diagnostic : interprétation des informations, des constatations et des mesures.....	31

4 TRAITEMENT DE L'HUMIDITÉ ASCENSIONNELLE ET CONTRÔLE DE L'ASSÈCHEMENT	35
4.1 Introduction.....	35
4.2 Blocage de l'humidité ascensionnelle.....	35
4.2.1 Pose d'une barrière d'étanchéité physique	35
4.2.2 Injection de produits hydrophobes ou de bouche-pores	36
4.3 Recouvrement des maçonneries au-dessus du niveau du sol.....	46
4.3.1 Recouvrements freinant l'assèchement.....	46
4.3.2 Enduits d'assainissement.....	47
4.4 Autres interventions.....	47
4.4.1 Traitements favorisant l'évaporation	47
4.4.2 Électro-osmose	48
4.4.3 Systèmes électromagnétiques	48
4.5 Efficacité des procédés	48
4.6 Contrôle de l'assèchement des maçonneries après une intervention contre l'humidité ascensionnelle	48
5 TECHNIQUES D'INTERVENTION COMPLÉMENTAIRES.....	51
5.1 Traitement des sels	51
5.1.1 Protection des finitions intérieures	51
5.1.2 Protection des finitions extérieures.....	51
5.1.3 Extraction des sels	52
5.2 Traitement des autres causes d'humidité.....	53
5.2.1 Humidité de construction	53
5.2.2 Condensations superficielles ou internes et hygroscopicité des matériaux	53
5.2.3 Infiltrations dues aux pluies à travers les maçonneries	53
5.2.4 Autres types d'infiltrations et autres causes d'humidification	53
ANNEXE Méthodologie d'essai pour les produits d'injection	55
BIBLIOGRAPHIE.....	61



PRÉFACE

Le succès de la Note d'information technique n° 210 et différentes évolutions dans le domaine du traitement de l'humidité dans les bâtiments ont incité le Centre scientifique et technique de la construction à revoir le texte existant. Pour ce faire, le Centre s'est non seulement basé sur une expérience acquise depuis de nombreuses années, mais s'est également assuré la collaboration des professionnels du secteur.

La présente Note d'information technique remplace la NIT n° 210 et vise à offrir aux professionnels une aide encore plus complète lorsqu'ils ont à élaborer un diagnostic de l'humidité dans un bâtiment ou lorsqu'ils sont confrontés au choix et à la mise en œuvre d'une technique d'intervention.

Une attention particulière est accordée à la technique de blocage de l'humidité ascensionnelle par injection de produit hydrophobe. La NIT aborde notamment la question du choix des produits, rendu plus complexe ces dernières années par l'évolution des produits commercialisés vers des formulations innovantes, plus respectueuses de l'environnement. Une procédure d'évaluation de ces produits mise au point récemment par le CSTC est présentée dans ce document. Elle offrira un outil précieux lors de ce choix et forme d'ores et déjà la base de l'obtention d'un agrément technique auprès de l'Union belge pour l'agrément technique dans la construction (UBATc).

1.1 PATHOLOGIES LIÉES À LA PRÉSENCE D'HUMIDITÉ ET DE SELS SOLUBLES DANS LES CONSTRUCTIONS

La présence d'humidité, souvent accompagnée de sels solubles dans les constructions, est un phénomène particulièrement mal perçu, car elle entraîne diverses formes de dégradations et de désagréments qui affectent non seulement la durabilité et l'aspect esthétique des matériaux, mais aussi le confort et la santé des occupants.

Ce premier paragraphe propose un aperçu photographique non exhaustif des différents types de pathologies potentiellement liées à la présence d'humidité et de sels dans les

constructions. Ces pathologies, ou 'symptômes' d'un problème d'humidité dans le bâtiment, peuvent être liées à différentes causes, qu'il conviendra d'identifier lors d'un diagnostic complet afin de déterminer les remèdes à mettre en place.

1.1.1 PATHOLOGIES ENTRAÎNANT LA DÉGRADATION DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION OU DE FINITION

Les figures 1 à 15 (p. 7 à 9) illustrent quelques pathologies qui provoquent la dégradation des matériaux de construction ou de finition.



Fig. 1 Pulvérisation des joints de mortier dans un mur de maçonnerie. Dans le cas concerné, les symptômes relevés sont dus à l'hygroscopicité et à la cristallisation de sels solubles qui ont pénétré dans la maçonnerie à la suite du stockage d'engrais chimiques.



Fig. 2 Expulsion des éléments d'une maçonnerie. Les symptômes constatés ont été provoqués par l'action mécanique des racines d'un arbuste ayant pu s'implanter dans la maçonnerie grâce à la présence d'humidité.



Fig. 3 Pulvérisation des briques et des joints de mortier dans un mur de clôture en contact avec les terres. Les symptômes observés sont ici dus à la cristallisation de sels solubles dans la maçonnerie (en particulier dans la partie supérieure de la zone humide) et à l'action des cycles de gel-dégel sur la maçonnerie.

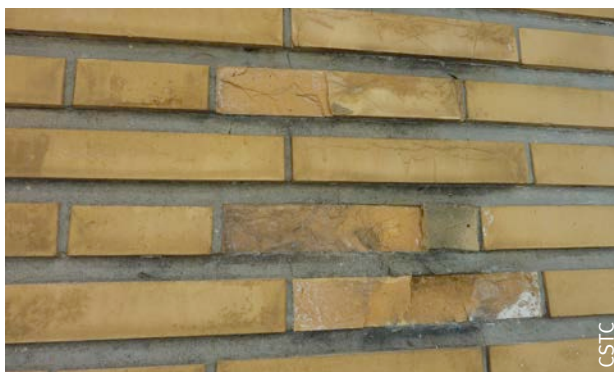


Fig. 4 Délitement de la surface des briques sur quelques millimètres d'épaisseur. Les symptômes observés résultent ici de l'action des cycles de gel-dégel sur une maçonnerie fortement exposée aux pluies, dont la vitesse de séchage a diminué à la suite d'un traitement d'hydrofugation de surface.



Fig. 5 Tache d'humidité apparaissant sur un enduit intérieur et fluctuant en fonction de l'humidité relative ambiante. Les symptômes relevés sont provoqués par les sels hygroscopiques contenus dans la maçonnerie sous-jacente.



Fig. 6 Tache d'humidité se manifestant sur un badigeon extérieur et fluctuant en fonction de l'humidité relative ambiante. Les symptômes décelés sont engendrés par les sels hygroscopiques contenus dans la maçonnerie sous-jacente.



Fig. 7 Corrosion de la protection métallique d'un élément d'éclairage situé dans une cave. Les symptômes relevés sont dus à l'action des sels solubles et de l'humidité qui sont contenus dans les voûtes en maçonnerie et qui tombent sur les éléments métalliques par pulvérisation du mortier.



Fig. 8 Pourriture cubique ou pourriture brune du bois. Les symptômes constatés sont liés à l'action d'un champignon tel que la mērule. Celle-ci peut se développer même à grande distance d'une source d'humidité, à laquelle elle accède grâce à des rhizomorphes conducteurs capables de traverser les maçonneries.



Fig. 9 Décollement d'un enduit appliqué sur un mur de cave. Les symptômes observés sont dus à l'action combinée de l'humidité en provenance des terres en contact avec la maçonnerie et de la cristallisation des sels solubles.



Fig. 10 Pulvérisation d'un enduit extérieur. Les symptômes décelés résultent de la cristallisation des sels solubles entraînés dans la maçonnerie par absorption capillaire de l'humidité présente dans le sol.



Fig. 11 Fissuration et décollement de l'enduit d'un mur. Les symptômes observés résultent de l'action des cycles de gel-dégel sur la maçonnerie qui a été humidifiée par l'infiltration d'eau de pluie.



Fig. 12 Décollement du feuil d'une peinture. Les symptômes observés sont liés à une infiltration d'eau de pluie dans la maçonnerie du pignon.



Fig. 13 Effritement de la couche inférieure d'une dalle de béton constituant le plafond d'une cave. Les symptômes observés sont dus aux tensions créées par la corrosion des armatures métalliques résultant, par exemple, de l'infiltration d'eau de pluie dans la dalle de béton.



Fig. 14 Dégradation et condensation à la surface d'une dalle de béton constituant le plafond d'une cave. Les symptômes décelés (formation de stalactites) sont dus à l'infiltration d'eau de pluie par des fissures présentes dans la dalle de béton. La condensation se forme en raison d'une humidité relative de l'air élevée dans la cave et d'une température de surface du plafond très basse.



Fig. 15 Soulèvement d'un parquet. Les symptômes constatés découlent d'un taux d'humidité élevé dans la chape sous-jacente.

1.1.2 PATHOLOGIES AYANT UN EFFET NÉFASTE SUR LE CONFORT ET LA SANTÉ DES OCCUPANTS

Les figures 16 à 18 illustrent différentes pathologies qui ont un effet néfaste sur le confort et la santé des occupants du bâtiment.

1.2 HUMIDITÉ ASCENSIONNELLE ET ENJEUX DANS LES CONSTRUCTIONS

1.2.1 BÂTIMENTS ANCIENS

Dotée d'un patrimoine particulièrement ancien, la Belgique est fortement touchée par les problèmes d'humidité. Ceux-ci affectent généralement les bâtiments constitués de parois en maçonnerie massive et dépourvus de membrane anticapillaire en pied de mur. Comme illustré à la figure 19 (p. 11), plus d'un tiers des logements existants en Belgique date d'avant 1945. Or, les constructions en maçonnerie comprenant une coulisse d'air et une membrane anticapillaire drainante en pied de mur ne sont généralisées qu'après-guerre.

Les bâtiments construits avant 1945 ont en commun une conception parfois peu compatible avec les notions actuelles de confort et de performances énergétiques. Malgré leur épaisseur, les maçonneries massives anciennes sont à la fois peu isolantes d'un point de vue thermique et sensibles aux pénétrations des pluies battantes. L'absence de membrane d'étanchéité en pied de mur favorise en outre les remontées capillaires d'eau et de sels en provenance du sol.

Si les causes d'humidité à l'origine de dégradations et de désagréments dans les bâtiments anciens sont nombreuses, les phénomènes d'absorption capillaire par les maçonneries en contact avec le sol (ou 'humidité ascensionnelle', voir figure 20, p. 11) y sont particulièrement courants. En effet, ces bâtiments ne comportent pas d'éléments permettant

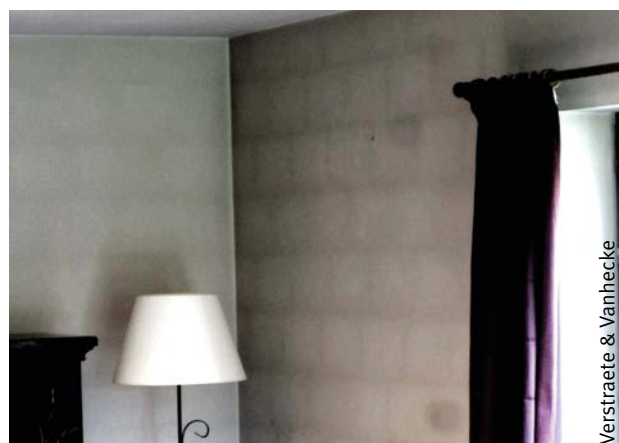


Fig. 16 Développement de moisissures au droit des joints de mortier sur un mur en maçonnerie constituée de blocs isolants. Les symptômes décelés sont dus à des températures de surface plus faibles au droit des joints et à une humidité relative de l'air intérieur élevée.

une séparation capillaire entre le sol et les matériaux de construction poreux (une membrane d'étanchéité en pied de mur, par exemple). Comme nous le verrons plus loin (§ 2.1.4, p. 14), les matériaux poreux absorbent l'humidité lorsqu'ils sont mis en contact avec une source d'eau liquide et sont donc susceptibles de s'imprégner de l'humidité présente dans le sol avec lequel ils entrent en contact.

Les phénomènes d'humidité ascensionnelle sont non seulement courants, mais aussi particulièrement gênants, car l'humidité en provenance des terres contient d'importantes concentrations en sels solubles, qui élargissent la gamme des dégradations occasionnées. Ainsi, une intervention contre l'humidité ascensionnelle s'avère nécessaire dans de nombreux cas. Les bâtiments dépourvus de membranes anticapillaires ne sont toutefois pas systématiquement sujets au phénomène d'humidité ascensionnelle. Par ailleurs, les

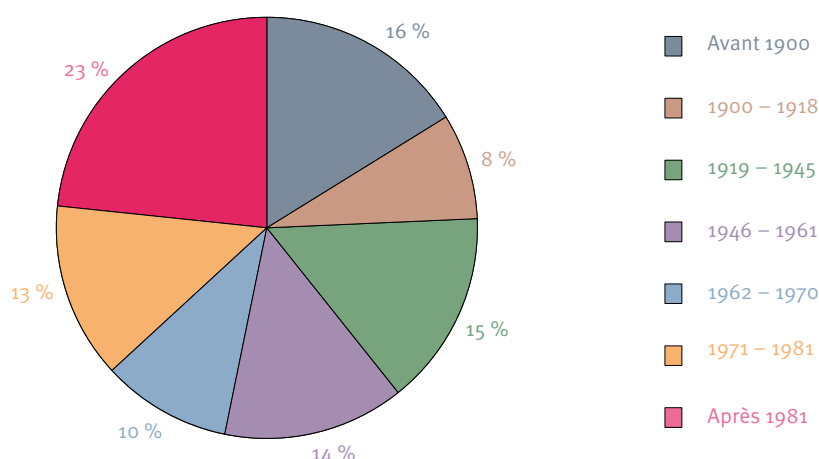


Fig. 17 Développement de moisissures dans l'angle d'une pièce utilisée comme chambre à coucher. Les symptômes observés sont dus à des températures de surface plus faibles dans l'angle de la pièce et à une humidité relative de l'air intérieur élevée.



Fig. 18 Développement de moisissures à l'arrière d'un papier peint. Les symptômes relevés résultent d'une infiltration d'eau dans la maçonnerie et d'une forte étanchéité à la vapeur du papier peint.

Fig. 19 Répartition des logements en Belgique en fonction de leur époque de construction (source : bestat.economie.fgov.be; année de référence : 2013).



symptômes observés peuvent également être liés à d'autres causes d'humidité, voire à une combinaison de causes.

Dans les bâtiments anciens, l'enjeu sera donc de déceler, d'une part, la présence d'humidité ascensionnelle et la nécessité d'un traitement et, d'autre part, l'existence éventuelle d'autres causes d'humidité à traiter en parallèle.

1.2.2 BÂTIMENTS PLUS RÉCENTS

Bien que les interventions dans les bâtiments anciens représentent la majeure partie du volume des travaux d'assèchement, il est bon d'ajouter que le traitement de l'humidité peut aussi s'appliquer aux constructions plus récentes. Ces bâtiments peuvent, eux aussi, nécessiter des interventions contre l'humidité ascensionnelle, notamment si aucune membrane anticapillaire n'a été mise en place, si cette membrane est dégradée, en cas d'erreurs de placement ou de conception, ou encore lorsque des terres ou des aménagements extérieurs sont apportés contre les murs au-dessus du niveau de la membrane sans qu'une protection adaptée soit prévue.

Dans ce cas, l'enjeu consistera à déterminer quel défaut ou intervention est à l'origine de l'humidité ascensionnelle, tout en ne négligeant pas l'existence éventuelle d'autres causes d'humidité.

1.2.3 TRAITEMENT DE L'HUMIDITÉ DANS LE CADRE D'UNE RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE

Lorsqu'on entreprend des travaux d'adaptation, de rénovation ou d'entretien en vue d'atteindre des niveaux de confort et de performances énergétiques adéquats dans un bâtiment existant, les améliorations thermiques et la lutte contre l'humidité constituent des objectifs prioritaires. Ces deux objectifs sont étroitement liés : le traitement de l'humidité est un préalable indispensable à l'obtention et au maintien de caractéristiques thermiques acceptables.

En outre, toute autre intervention visant à améliorer les performances thermiques d'un bâtiment peut avoir une influence significative sur l'équilibre hygrothermique du bâtiment; citons entre autres :

- **l'isolation thermique de parois sujettes aux remontées capillaires (humidité ascensionnelle)** : la pose d'un isolant contre la paroi diminue les possibilités d'évaporation et de séchage de la maçonnerie du côté de l'isolant. Si l'humidité ascensionnelle n'est pas traitée au préalable, le taux d'humidité dans la maçonnerie risque alors d'augmenter et le phénomène pourrait s'étendre. En cas d'humidification de l'isolation elle-même, les propriétés isolantes peuvent être fortement diminuées
- **l'isolation par l'intérieur de murs extérieurs** : la pose d'une isolation thermique du côté intérieur d'une façade occasionne une baisse importante de la température des matériaux de façade. Par conséquent, ceux-ci sécheront plus lentement après une humidification (due aux pluies battantes, par exemple) et seront, de ce fait, davantage sujets aux dégradations par le gel
- **la pose de nouveaux châssis étanches à l'air munis de double vitrage** : l'étanchéification à l'air des châssis a un

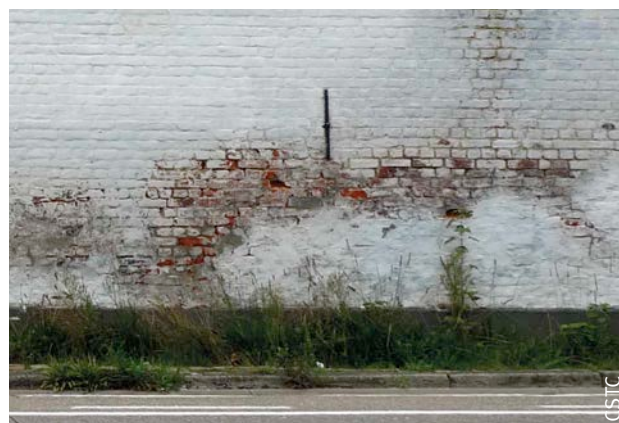


Fig. 20 Humidité ascensionnelle dans une maçonnerie dépourvue de membrane anticapillaire en pied de mur : l'humidité et les sels solubles contenus dans le sol sont entraînés dans la maçonnerie par un phénomène d'absorption capillaire.

impact non négligeable sur l'aération naturelle du bâtiment. Ce type d'intervention peut – en l'absence d'un système de ventilation adéquat – créer ou déplacer des phénomènes de condensation superficielle depuis les vitrages vers d'autres surfaces et notamment les enduits intérieurs, avec un éventuel développement de moisissures à la clé.

L'enjeu consistera donc à traiter chaque bâtiment dans sa globalité, tant sur le plan de l'humidité et de la ventilation que sur le plan thermique, afin d'évaluer à l'avance l'influence des interventions prévues et de prendre les mesures nécessaires pour éviter leurs effets indésirables.

1.2.4 SÉQUENCE DES TRAVAUX

Étant donné le temps nécessaire à l'assèchement des maçonneries (voir § 2.1.7, p. 16), tout traitement de l'humidité doit être mis en œuvre dès le début des travaux de rénovation. Si les travaux d'assèchement ne sont pas prévus en temps opportun, d'autres travaux d'amélioration, portant sur les finitions ou l'isolation thermique, par exemple, verront leur durabilité ou leurs performances compromises par la migration de l'humidité résiduelle et par la cristallisation des sels.

Rappelons d'emblée que les sels constituent une source importante de désordres non seulement avant, mais aussi après les interventions contre l'humidité. Leur présence nécessite d'ordinaire des interventions complémentaires telles que le décapage des enduits contaminés ou la mise en place de protections spéciales préalablement aux travaux de finition.

1.3 OBJECTIFS DE CETTE NOTE D'INFORMATION TECHNIQUE

Le premier objectif de cette NIT est de fournir une base de réflexion aux acteurs de terrain (concepteurs et entrepreneurs), afin de les aider à détecter la présence d'humidité ascensionnelle dans un bâtiment et à déterminer la nécessité d'une intervention (voir chapitres 2 et 3, respectivement p. 13 et p. 25). Cette NIT aborde en outre d'autres causes courantes d'humidité dans les bâtiments, dans le but de sensibiliser le professionnel à la complexité du diagnostic de l'humidité dans les constructions. Compte tenu de cette complexité, les informations fournies dans la présente NIT ne peuvent remplacer une longue expérience de terrain. En cas de doute quant à l'origine d'un problème d'humidité dans un bâtiment, le CSTC se tient donc à la disposition des entrepreneurs pour les assister dans l'établissement du diagnostic.

Cette NIT a pour second objectif de donner un aperçu des techniques d'intervention contre l'humidité ascensionnelle actuellement disponibles sur le marché et de préciser leur

efficacité potentielle dans la pratique (voir chapitre 4, p. 35). Une attention particulière est accordée à la technique de blocage de l'humidité ascensionnelle par injection d'un produit hydrophobe dans la maçonnerie, dont l'efficacité a été largement démontrée (voir § 4.2.2, p. 36). Le concepteur pourra s'y référer pour élaborer un cahier des charges; quant à l'entrepreneur, il pourra y recourir lors de la mise en œuvre des travaux. En cas de doute quant au choix des techniques d'intervention à appliquer, le CSTC se tient à la disposition des entrepreneurs.

1.4 MÉMENTO POUR L'ÉTABLISSEMENT DE L'OFFRE DE PRIX

Pour toute intervention contre l'humidité dans un bâtiment, l'offre remise par l'entrepreneur doit indiquer clairement quels travaux et analyses sont repris ou non dans le prix. Ceux-ci peuvent notamment inclure :

- **le diagnostic des causes d'humidité et l'évaluation de la nécessité d'une intervention.** Pour les chantiers de grande envergure ou complexes (bâtiments classés, par exemple), ce diagnostic est effectué par le concepteur. Pour les chantiers plus restreints, l'entrepreneur établira souvent le diagnostic lui-même. En cas de doute quant à l'origine du problème d'humidité, l'entrepreneur peut faire appel au CSTC
- **le choix des techniques d'intervention et l'élaboration d'un plan d'intervention.** Pour les chantiers de grande envergure ou complexes (bâtiments classés, par exemple), cette tâche revient généralement au concepteur. Pour les chantiers plus restreints, l'entrepreneur s'en chargera souvent lui-même. En cas de doute quant aux techniques à appliquer, l'entrepreneur peut faire appel au CSTC
- **la préparation de la maçonnerie avant l'intervention** (enlèvement des tuyauteries et des doublages, décapage des finitions, etc.)
- **la mise en œuvre de la technique d'intervention choisie**
- **la remise en état (provisoire) de la maçonnerie.** Les nouvelles finitions ne seront mises en place qu'après un délai de séchage suffisant ou après des traitements de protection appropriés
- **le contrôle de l'assèchement des maçonneries après un délai suffisamment long.** Il incombe au maître d'ouvrage et à l'entrepreneur de fixer le moment où ces contrôles doivent être effectués, de désigner les personnes chargées de les exécuter et de définir la procédure d'évaluation, et ce, avant le début du chantier
- **les interventions complémentaires éventuelles** pour le traitement des sels résiduels
- **la réfection des finitions.**

L'offre remise par l'entrepreneur doit mentionner de manière explicite si les travaux prévus sont destinés à résoudre uniquement le problème d'humidité ascensionnelle ou l'ensemble des causes d'humidité dans le bâtiment (voir chapitre 5, p. 51).

2

TRANSPORT ET CAUSES POTENTIELLES D'HUMIDITÉ DANS LES CONSTRUCTIONS

Une bonne compréhension des causes potentielles d'humidité dans les constructions est indispensable à l'établissement d'un diagnostic correct et complet. Ce chapitre donne un aperçu des principes physiques sous-jacents à la problématique de l'humidité dans les bâtiments et aborde les causes d'humidité les plus courantes dans les constructions.

2.1 TRANSPORT D'HUMIDITÉ ET DE SELS DANS LES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION POREUX

Avant de détailler les causes potentielles d'humidité dans les bâtiments, il est utile de rappeler que les mouvements de l'humidité dans les matériaux de construction poreux sont essentiellement liés aux phénomènes suivants : le transport d'eau sous forme de vapeur, l'hygroscopicité et la capillarité (qui régit les mouvements de l'eau en phase liquide). Par ailleurs, les mouvements de l'eau à travers des matériaux poreux peuvent entraîner la migration de sels solubles au sein de la maçonnerie.

2.1.1 POROSITÉ

La grande majorité des matériaux de construction minéraux (pierres naturelles, briques, mortiers, bétons, etc.) comportent dans leur masse de minuscules cavités dénommées 'pores'. Ces pores, dont les dimensions varient en fonction

du matériau, sont comparables à des tubes plus ou moins reliés entre eux, formant un réseau accessible à l'eau sous forme liquide ou sous forme de vapeur. La porosité d'un matériau équivaut au volume total de ses pores, exprimé en pourcentage de son volume apparent (% vol). Elle peut être très faible, quelques dixièmes de pour cent pour des grès ou des calcaires compacts, ou beaucoup plus élevée, près de 50 % vol pour des calcaires très tendres; quant aux briques de terre cuite, leur porosité varie généralement entre 10 et 45 % vol.

2.1.2 TRANSPORT DE VAPEUR

Dans des matériaux poreux secs ou peu humides, le transport d'humidité a lieu principalement sous forme de vapeur. Beaucoup plus lent que le transport d'eau sous forme liquide (voir § 2.1.4, p. 14), le transport de vapeur à travers un matériau poreux est, lui aussi, influencé par les caractéristiques du réseau poreux. Plus le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ) est élevé, plus la vitesse de transport de la vapeur à travers le matériau est faible. Ce coefficient indique combien de fois la résistance à la diffusion d'une couche de matériau est supérieure à la résistance d'une couche d'air de même épaisseur dans les mêmes conditions. Il dépend de la proportion de pores ouverts par unité de surface du matériau, de la longueur du chemin à parcourir dans le réseau poreux par unité d'épaisseur du matériau, de la tortuosité du réseau poreux et de l'humidité relative ambiante [H1].

Fig. 21
Représentation schématisée d'un matériau de construction poreux.

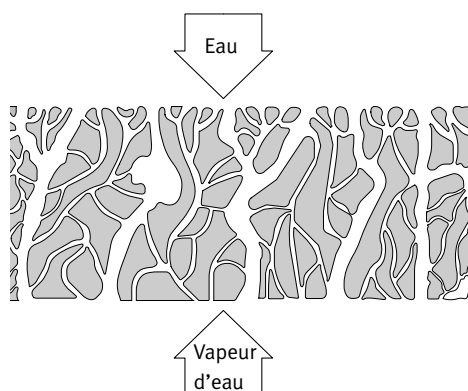


Tableau 1 Exemples de valeurs du coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ pour des matériaux de construction courants [B5, B9].

Catégories de matériaux	Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ (*) [-]
Matériaux en terre cuite	5 – 50
Bétons	100 – 130
Pierres calcaires	30 – 250
Marbres	10.000
Enduits (plâtre, chaux, ciment)	5 – 15

(*) Coefficient déterminé selon la méthode de la 'coupelle sèche'.

Le tableau 1 (p. 13) donne quelques exemples de valeurs du coefficient μ pour des matériaux de construction courants. Ces valeurs μ ont été déterminées selon la méthode de la 'coupelle sèche', qui s'applique lorsque l'humidité relative moyenne au sein du matériau est inférieure à 70 %. Lorsque l'humidité relative augmente, les pores du matériau commencent à se remplir d'eau à l'état liquide et le flux de liquide accélère le mécanisme global de transport. La valeur apparente de la résistance à la vapeur d'eau diminue donc à mesure que l'humidité relative augmente (voir normes NBN EN 1745 [B5] et NBN EN ISO 10456 [B9]).

2.1.3 HYGROSCOPICITÉ

Même en l'absence d'une source d'eau liquide, la teneur en humidité des matériaux poreux augmente en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant, par un phénomène dénommé 'hygroscopicité'. Le caractère plus ou moins hygroscopique d'un matériau est déterminé notamment par ses caractéristiques porométriques, les pores très fins (d'un diamètre inférieur à 0,1 μm) favorisant l'absorption d'humidité hygroscopique. Certains matériaux, tels que les briques et la plupart des matériaux d'isolation, ne comportent qu'une infime proportion de pores très fins. Ces matériaux sont dits non hygroscopiques, car leur teneur en humidité hygroscopique n'augmente de façon significative que si l'humidité relative ambiante est très élevée. Les matériaux dits hygroscopiques, tels que les matériaux à base de ciment ou les matériaux d'origine organique (bois, par exemple), présentent au contraire une teneur en humidité hygroscopique importante, et ce, même lorsque l'humidité relative ambiante est faible. Par ailleurs, le comportement hygroscopique d'un matériau est accentué par la présence de sels au sein de son réseau poreux.

2.1.4 CAPILLARITÉ

Lorsqu'un matériau poreux est en contact avec une source d'eau liquide, il se produit un phénomène d'absorption dû aux interactions entre la surface des pores et le liquide : il s'agit de l'absorption capillaire. Ce phénomène est compa-

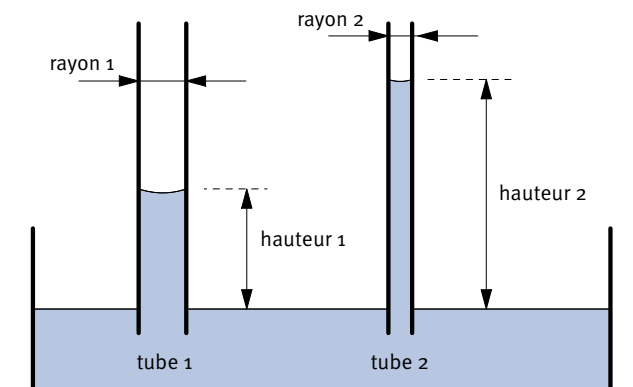


Fig. 22 Représentation schématique de l'absorption capillaire dans de fins tubes en verre (ou 'capillaires').

table à l'absorption qui a lieu dans de fins tubes en verre placés à la verticale, le pied dans un récipient d'eau (voir figure 22). La hauteur d'absorption capillaire dans ces tubes est inversement proportionnelle au diamètre des tubes.

Les pores des matériaux de construction, qu'on peut assimiler à des tubes de diamètre variable, sont généralement reliés les uns aux autres, formant un véritable réseau accessible à l'humidité. La taille des différents pores de ce réseau définit les caractéristiques capillaires du matériau, et notamment :

- la **hauteur maximale d'ascension capillaire** : plus les pores du matériau sont fins, plus la hauteur atteinte par l'eau est élevée, en dépit des forces gravitationnelles. Ainsi, dans un tube en verre vertical de 0,001 mm de rayon, l'eau pourrait en théorie atteindre une hauteur de 15 m environ
- la **vitesse d'absorption capillaire** : plus le diamètre des pores est important, plus l'eau monte rapidement dans le matériau. On peut déterminer la vitesse d'absorption capillaire de façon expérimentale en pesant, à différents intervalles de temps, un prisme de matériau poreux placé 'les pieds dans l'eau' (voir figure 23). L'absorption se fait en deux phases dont la seconde, plus lente, est due à l'échappement de l'air résiduel renfermé dans certains pores.

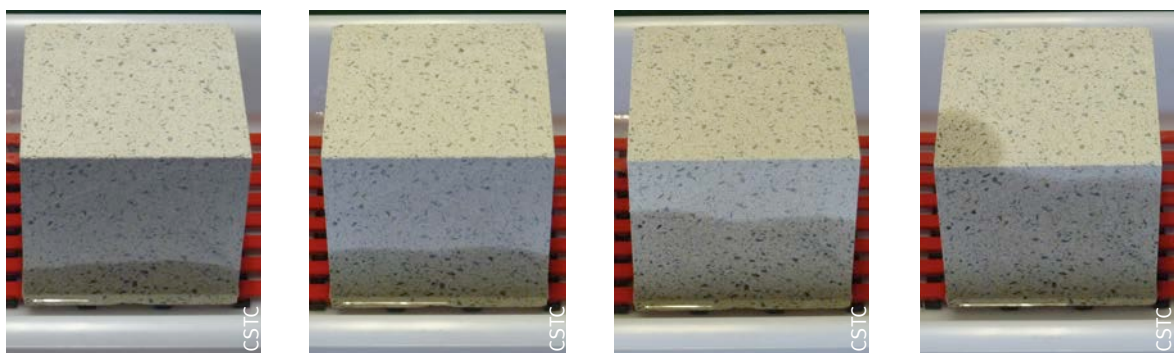


Fig. 23 Test d'absorption capillaire sur un bloc silicocalcaire de 10 × 10 × 10 cm³. Les photos ont été prises, de gauche à droite, respectivement 30, 60, 180 et 480 minutes après le placement du bloc dans un bain d'eau rempli jusqu'à environ 5 mm au-dessus de la surface inférieure du bloc.

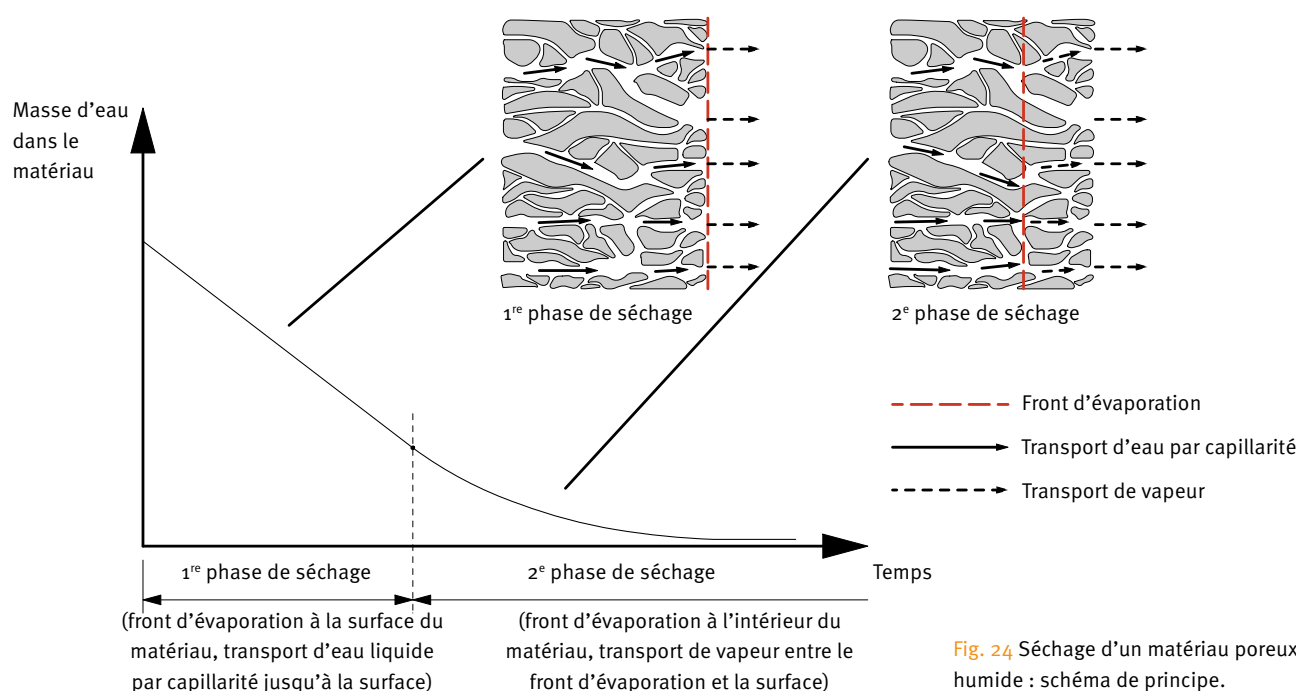


Fig. 24 Séchage d'un matériau poreux humide : schéma de principe.

2.1.5 SÉCHAGE

Les observations en laboratoire montrent que l'assèchement d'un matériau poreux humide se déroule toujours en deux phases distinctes (voir figure 24). Au cours de la première phase, la vitesse de séchage est élevée et constante. L'eau est transportée sous forme liquide jusqu'à la surface du matériau, où elle s'évapore : c'est le phénomène de capillarité. Tant que l'apport d'eau par capillarité vers la surface est suffisant, la vitesse d'évaporation est uniquement influencée par les conditions ambiantes externes et détermine la vitesse de séchage. Au cours de la deuxième phase, la vitesse de séchage connaît un ralentissement considérable et ne cesse de diminuer au fil du temps. À ce stade, l'évaporation ne se fait plus à la surface du matériau, mais au sein du réseau poreux. L'eau est ensuite transportée sous forme de vapeur depuis le front d'évaporation jusqu'à la surface du matériau ; ce transport de vapeur est beaucoup plus lent que le transport par capillarité. La vitesse de séchage est alors fortement influencée par les caractéristiques du réseau poreux.

2.1.6 TRANSPORT ET MANIFESTATION DES SELS SOLUBLES DANS LES MATÉRIAUX POREUX

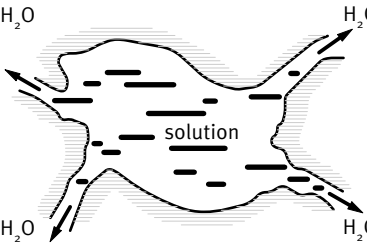
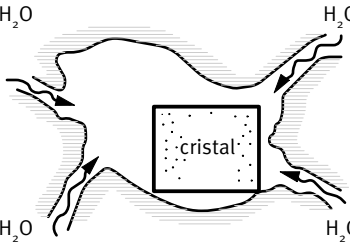
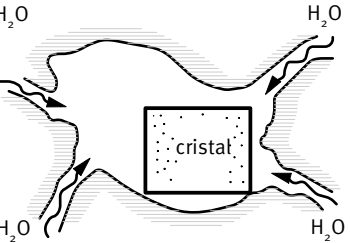
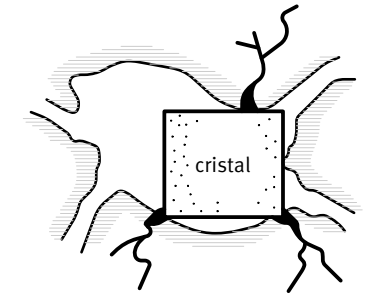
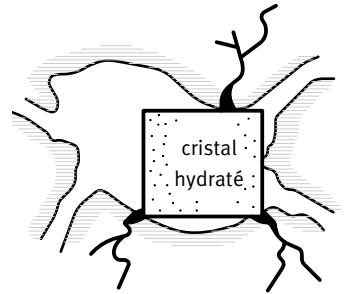
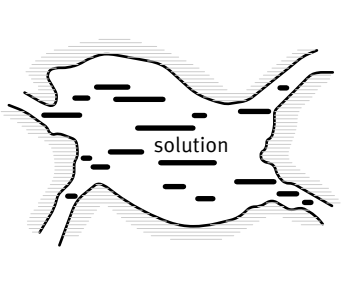
L'eau liquide transportée dans les matériaux de construction poreux contient généralement des sels solubles en concentrations variables. Ces sels peuvent se trouver dans le matériau à l'origine ou y avoir pénétré par absorption capillaire d'une solution saline. L'eau présente dans les sols, par exemple, contient différents types de sels qui peuvent être entraînés dans les matériaux par absorption capillaire (voir § 2.2.6, p. 21).

Lorsque l'eau se trouve à l'état liquide, les sels solubles y sont partiellement dissous, ce qui leur permet de migrer au sein du réseau poreux. De même, lorsque l'eau s'évapore à la surface ou au sein du matériau, les sels solubles sont déposés sur le front d'évaporation.

Les sels peuvent se manifester dans les matériaux poreux par le biais de trois phénomènes, qui sont présentés de manière simplifiée ci-après (voir tableau 2, p. 16) :

- **cristallisation** : la cristallisation des sels se produit principalement lors de l'évaporation d'une solution saline contenue dans le réseau poreux. Lorsque cette évaporation a lieu à la surface des matériaux, des cristaux de sels apparaissent sous forme d'efflorescences blanchâtres. Ceux-ci sont souvent inoffensifs ; ils posent avant tout un problème esthétique qui peut en général être éliminé facilement. Lorsque l'évaporation survient au sein du réseau poreux (voir figure 24, 2^e phase de séchage) ou sous une couche de finition, on parle de 'subflorescence'. Dans ces cas, la force de cristallisation des sels à l'intérieur des pores peut occasionner une dégradation de la maçonnerie ou des couches de finition (voir exemples au § 1.1, p. 7)
- **hydratation** : certains sels possèdent plusieurs états d'hydratation ou plusieurs formes de cristaux. C'est le cas du sulfate de soude, qu'on retrouve sous forme de thénardite (Na_2SO_4) ou de mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), par exemple. Le volume de la mirabilite étant environ trois fois supérieur à celui de la thénardite, le passage du sel d'une forme à l'autre après une phase de dissolution intermédiaire peut engendrer de sérieux dégâts dans un matériau [D4]
- **hygroscopicité** : lorsque l'humidité relative de l'air ambiant est supérieure à la valeur d'équilibre propre à

Tableau 2 Représentation schématique des phénomènes liés à la présence de sels solubles dans les matériaux poreux.

Phéno- mènes liés aux sels solubles	Cristallisation	Hydratation	Hygroscopicité
Avant			
Après			
Description	Évaporation d'une solution saline au sein des pores et dégradations dues aux forces de cristallisation	Changement de l'état d'hydratation (et du volume) d'un sel après une phase de dissolution et dégradations dues aux forces de cristallisation	Absorption hygroscopique d'humidité par un sel et humidification du matériau poreux en l'absence d'une source d'eau liquide

chaque type de sel, les sels solubles peuvent absorber une certaine quantité d'humidité et s'opposer ainsi à l'assèchement de la maçonnerie. Ce phénomène d'hygroscopicité peut provoquer l'apparition de taches d'humidité, dont l'intensité varie en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant (voir exemples au § 1.1, p. 7). La valeur d'équilibre d'un sel est en outre fortement influencée par la présence éventuelle d'autres sels.

2.1.7 CONSÉQUENCES PRATIQUES POUR LES MAÇONNERIES

L'analyse des phénomènes de transport d'eau sous forme liquide ou sous forme de vapeur met en lumière deux conséquences non négligeables pour les maçonneries :

- une maçonnerie en contact avec une source d'eau (l'eau contenue dans les sols, par exemple) fonctionne comme une pompe absorbant l'eau par capillarité et permettant son évaporation plus ou moins rapide par les pores de surface. La combinaison entre les caractéristiques de la maçonnerie et les conditions externes donne lieu à un équilibre entre le phénomène d'absorption et le phénomène de séchage. Dans les maçonneries en contact direct avec le sol, la limite entre la zone concernée par le phénomène d'humidité ascensionnelle ou de remontées capillaires et la zone sèche correspond au point d'équilibre entre les deux phénomènes (voir § 2.2.6, p. 21). À l'endroit où elle s'évapore, l'eau dépose toutes

les impuretés qu'elle renferme, dont les sels solubles. Cette situation est généralement problématique pour les maçonneries, car elle peut entraîner des dégradations des matériaux de construction ou de finition : pulvérisation, décollement ou expulsion (voir exemples au § 1.1, p. 7)

- une fois la source d'alimentation en eau éliminée, une partie de l'humidité contenue dans la maçonnerie s'évacue; il s'agit de la première phase de séchage. Plus les conditions externes sont favorables à l'évaporation (air chaud et sec), plus cette évacuation sera rapide. Cependant, dès le début de la seconde phase, la vitesse de séchage chute et le temps nécessaire à l'évacuation complète de l'humidité est d'autant plus long que la perméabilité des matériaux à la vapeur d'eau est faible, que les quantités d'eau à éliminer sont importantes (porosité totale des matériaux, épaisseur des murs, etc.) et que les conditions externes sont défavorables. Ainsi, un mur de 40 cm d'épaisseur présentant une teneur en humidité moyenne de 10 % en masse sur un mètre de hauteur contient environ 70 litres d'eau par mètre linéaire. Dans des conditions favorables, l'évaporation de cette eau durera plusieurs mois. Dans des conditions difficiles (murs d'église d'une épaisseur allant jusqu'à un mètre, par exemple), l'assèchement peut prendre des années. Afin d'accélérer le processus d'assèchement, on conseille de toujours prévoir une ventilation suffisante et permanente des locaux ainsi qu'un minimum de chauffage pendant les périodes froides.



Fig. 25 Développement de moisissures dans les angles et les espaces confinés.

2.2 CAUSES POTENTIELLES D'HUMIDITÉ DANS LES CONSTRUCTIONS

Parmi les causes d'humidité les plus courantes dans les constructions, citons [F2] :

- l'humidité de construction
- la condensation (superficielle ou interne)
- l'hygroscopicité des matériaux de construction
- les sels solubles contenus dans les matériaux de construction
- les infiltrations dues aux pluies à travers les maçonneries, les menuiseries ou la toiture
- l'humidité ascensionnelle.

2.2.1 HUMIDITÉ DE CONSTRUCTION

On entend par 'humidité de construction' l'humidité qui se trouve dans l'ouvrage ou dans une partie de l'ouvrage après l'achèvement de travaux de construction ou de rénovation. Elle provient de l'eau absorbée par les matériaux lors de leur fabrication, de leur stockage, de leur gâchage ou de leur mise en œuvre, ou encore à la suite d'intempéries survenues en cours de chantier.

Pour une habitation unifamiliale traditionnelle, on estime à près de 5.000 litres la quantité d'eau contenue dans les matériaux, qui doit ensuite s'évacuer. Lorsqu'on entreprend des travaux de construction ou de rénovation, il est donc normal d'attendre plusieurs mois avant la mise en place des finitions, jusqu'à ce que les maçonneries et les sols soient suffisamment secs.

2.2.2 CONDENSATION SUPERFICIELLE OU INTERNE

L'air ambiant (intérieur et extérieur) renferme une certaine quantité de vapeur d'eau. À l'intérieur des bâtiments, cette vapeur est notamment produite par les activités de nettoyage et de cuisine, l'utilisation de bains ou de douches, la présence de plantes vertes et l'occupation humaine. La quantité maximale de vapeur d'eau pouvant être contenue dans un

volume d'air (taux de saturation) dépend de la température de ce dernier : plus l'air est chaud, plus il peut retenir de vapeur d'eau dans un même volume.

L'humidité relative de l'air est définie comme le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau présente dans l'air à une certaine température et la pression partielle de vapeur d'eau maximale pouvant être contenue dans l'air à la même température (taux de saturation). La pression partielle de vapeur d'eau est fonction de la quantité absolue de vapeur d'eau dans un volume d'air. Lorsqu'on refroidit un volume d'air renfermant une quantité de vapeur déterminée, son humidité relative augmente jusqu'à atteindre 100 %, c'est-à-dire le taux de saturation.

La température correspondant à une humidité relative de 100 % est nommée 'point de rosée'. Elle représente le seuil

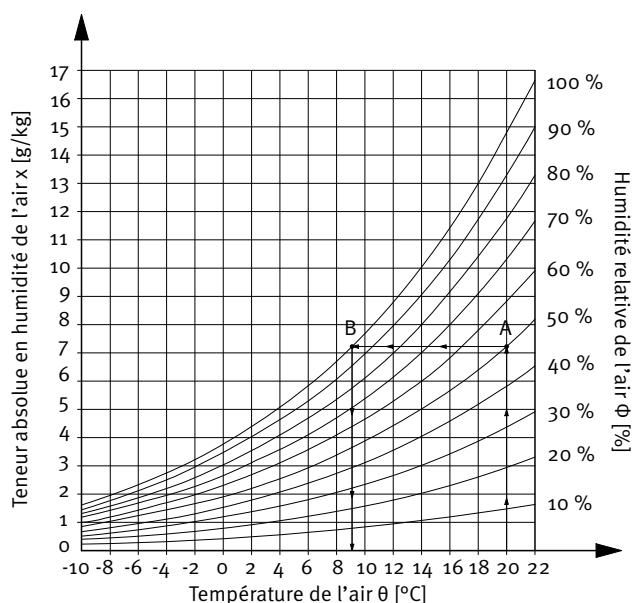


Fig. 26 Diagramme de l'air humide : humidité relative de l'air Φ [%] en fonction de la teneur absolue en humidité x [g/kg] et de la température de l'air θ [°C].

à partir duquel l'humidité se manifeste sous forme de condensation. Lorsqu'un volume d'air humide entre en contact avec une surface dont la température est inférieure à son point de rosée, de la condensation superficielle apparaît.

La présence de condensation superficielle sur les matériaux poreux peut provoquer la dégradation des finitions et le développement de moisissures ⁽¹⁾ (voir exemples au § 1.1, p. 7). Ces problèmes se rencontrent majoritairement dans les zones où la température de surface est basse et les possibilités de ventilation limitées, telles que les angles, les espaces confinés derrière les meubles et les ponts thermiques (voir figure 25, p. 17).

L'isolation thermique réalisée dans des bâtiments existants peut accroître le risque de condensation superficielle locale, notamment en raison de l'accentuation des ponts thermiques. Ce risque est encore amplifié lorsque l'isolation est combinée à une baisse des températures de chauffe et à une réduction du renouvellement d'air résultant, par exemple, du calfeutrage des entrées d'air, de l'isolation des combles ou de la pose de nouveaux châssis sans mise en place d'une stratégie de ventilation adéquate. Il arrive aussi que la pose de vitrages isolants dans un bâtiment peu ou pas isolé déplace le risque de condensation depuis le vitrage vers les murs (le vitrage n'étant plus la surface la plus froide) et augmente ainsi le risque de développement de moisissures; c'est pourquoi elle doit toujours s'accompagner de la mise en place de dispositifs de ventilation adaptés.

Grâce au diagramme de l'air humide présenté à la figure 26 (p. 17), on peut réaliser *in situ* une première évaluation du risque de condensation superficielle. La mesure de la température et de l'humidité relative de l'air permet de déterminer le point de rosée. Si certaines températures de surface enregistrées dans le bâtiment sont inférieures au point de rosée de l'air intérieur, de la condensation superficielle risque de se former. De la condensation apparaît, par exemple, lorsque de l'air présentant une température ambiante de 20 °C et une humidité relative de 50 % (point A) entre en contact avec des matériaux dont la température de surface est égale ou inférieure à 9 °C (point B).

Outre les phénomènes de condensation superficielle précités, la vapeur d'eau se diffuse à travers les éléments de construction sous l'influence d'une différence de pression (de vapeur) entre les ambiances intérieure et extérieure. Lorsque l'air humide rencontre une surface froide au sein de l'élément de construction, de la condensation interne risque d'apparaître. Dans les murs massifs, la condensation interne est le plus souvent restreinte, étant donné les variations climatiques : des périodes de condensation alternent avec des périodes d'assèchement. Cependant, l'ajout d'une isolation par l'intérieur peut avoir un impact négatif sur le

Tableau 3 Humidité d'équilibre de quelques matériaux soumis à une humidité relative de respectivement 65 et 95 %.

Matériaux	Humidité d'équilibre [% masse] dans une ambiance à	
	65 % HR	95 % HR
Briques de terre cuite	0,3	0,9
Enduits au ciment	1,0	7,0
Enduits au plâtre	1,0	3,0
Enduits à la chaux	2,8	7,5
Bois divers	10 – 15	20 – 30
Panneaux agglomérés	5 – 10	15 – 25

risque de condensation interne et doit donc toujours faire l'objet d'une étude préalable [L2, T1].

2.2.3 HYGROSCOPICITÉ DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

Comme mentionné au paragraphe 2.1.3 (p. 14), tous les matériaux poreux font preuve d'une certaine hygroscopicité. Même en l'absence d'une source d'eau liquide, ces matériaux peuvent donc absorber une certaine quantité d'humidité dite hygroscopique, qui varie en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant ainsi que des caractéristiques du matériau et de sa teneur en sels.

Le tableau 3 reprend, à titre d'exemple, l'humidité d'équilibre ⁽²⁾ de quelques matériaux non contaminés par des sels, conservés dans une ambiance courante (20 °C et 65 % d'hu-



Fig. 27 Décollement et pulvérulence des finitions intérieures en pied de mur, résultant de l'action de nitrates (comme le montre la bandelette indicative; voir § 3.1.4, p. 28).

⁽¹⁾ En réalité, les moisissures peuvent aussi se développer avant l'apparition de condensation superficielle, dès que l'humidité relative à proximité d'une surface froide atteint ou dépasse environ 70 % pendant une durée suffisante.

⁽²⁾ Voir les explications concernant la teneur en humidité des matériaux poreux au paragraphe 3.1.2 (p. 27).

Tableau 4 Tendance hygroscopique des sels susceptibles d'être rencontrés dans les constructions.

Type de sel	Formule chimique	Dénomination	Humidité relative de l'air [%] en équilibre avec la solution saturée en sel à 20 °C	Hygroscopicité à l'état pur dans des conditions hygrothermiques normales (20 °C, 30 à 60 % HR)
Sulfates	Na ₂ SO ₄	Sulfate de sodium (thénardite)	82 ⁽¹⁾	Non
	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	Sulfate de sodium (mirabilite)	94 ⁽¹⁾	Non
	MgSO ₄ ·7H ₂ O	Sulfate de magnésium (sel d'Epsom)	90 ⁽²⁾	Non
	K ₂ SO ₄	Sulfate de potassium	97 ⁽³⁾	Non
	CaSO ₄ ·2H ₂ O	Sulfate de calcium (gypse)	> 99 ⁽²⁾	Non
Nitrates	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	Nitrate de magnésium (nitromagnésite)	54 ⁽³⁾	Oui
	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	Nitrate de calcium (nitrocalcite)	54 ⁽³⁾	Oui
	NH ₄ NO ₃	Nitrate d'ammonium	65 ⁽³⁾	Limite
	NaNO ₃	Nitrate de sodium (nitratite)	75 ⁽³⁾	Non
	KNO ₃	Nitrate de potassium (nitre)	93 ⁽³⁾	Non
Chlorures	CaCl ₂ ·6H ₂ O	Chlorure de calcium (antartite)	31 ⁽³⁾	Oui
	NaCl	Chlorure de sodium (halite)	75 ⁽³⁾	Non
	KCl	Chlorure de potassium	85 ⁽³⁾	Non

⁽¹⁾ Voir NIT n° 210 [C10].
⁽²⁾ Voir [B1].
⁽³⁾ Voir [L1].

midité relative) et dans une ambiance très humide (95 % d'humidité relative).

L'hygroscopicité des matériaux peut avoir des conséquences indésirables. En effet, les dimensions des matériaux varient en fonction de leur teneur en humidité hygroscopique et, par conséquent, de l'humidité relative ambiante. Les matériaux fortement hygroscopiques tels que le bois sont sujets à des cycles d'expansion et de contraction hygriques bien connus. Même les matériaux à base de ciment ou les matériaux en terre cuite subissent des variations dimensionnelles pouvant occasionner des fissurations, surtout s'ils sont appliqués en fines couches [H1]. Par ailleurs, lorsque l'humidité relative est élevée (supérieure à 70 %), il arrive que le taux d'humidité hygroscopique de la couche superficielle des matériaux suffise au développement de moisissures.

2.2.4 SELS SOLUBLES CONTENUS DANS LES MATÉRIEAUX DE CONSTRUCTION

Les sels considérés dans ce paragraphe regroupent les sels solubles contenus à l'origine dans les matériaux de construction ainsi que ceux ayant migré vers les maçonneries par capillarité à la suite des phénomènes suivants : humidité ascensionnelle, infiltrations, activités industrielles ou agricoles, etc. Ces sels ont un impact non négligeable sur les dégâts infligés aux maçonneries.

Les dégradations des matériaux poreux provoquées par les sels solubles peuvent être liées aux phénomènes de cristal-

lisation, d'hydratation et d'hygroscopicité (voir § 2.1.6, p. 15). Par ailleurs, le comportement réel d'un sel soluble au sein d'une maçonnerie dépend de différents facteurs, dont la nature du sel lui-même, les différents sels présents et les conditions hygrothermiques ambiantes. Dans les bâtiments aux conditions considérées comme 'normales' (température avoisinant les 20 °C et humidité relative comprise entre 30 et 60 %; voir **Infofiche n° 3** [E1]), les sels solubles peuvent être répartis en deux grandes familles :

- **les sels efflorescents**, qui apparaissent principalement par cristallisation. Dans les bâtiments aux conditions 'normales', il s'agit le plus souvent de sulfates ou de carbonates
- **les sels hygroscopiques**, qui se manifestent surtout par leur hygroscopicité, captant l'humidité de l'air lorsque celle-ci excède leur humidité relative d'équilibre. Dans les bâtiments aux conditions 'normales', il s'agit en général de nitrates issus de matières organiques en contact avec la maçonnerie, ou encore de chlorures dérivant d'activités industrielles ou de sels de déneigement.

Tableau 5 Nécessité d'une intervention en fonction de la concentration des sels solubles ⁽¹⁾ [O2].

Concentration de sels solubles [% masse]			Intervention
Chlorures	Nitrates	Sulfates	
< 0,03	< 0,05	< 0,10	Aucune
0,03 – 0,10	0,05 – 0,15	0,10 – 0,25	À étudier au cas par cas
> 0,10	> 0,15	> 0,25	Absolument nécessaire

⁽¹⁾ Voir § 3.1.4 (p. 28) pour une description des méthodes d'analyse des sels dans un échantillon de maçonnerie.

Cette distinction entre sels efflorescents et sels hygroscopiques n'est pas absolue. Le comportement d'un sel dépend en effet des conditions ambiantes et des différents types de sels présents, qui s'influencent mutuellement. Le chlorure de sodium (NaCl) pur, par exemple, se trouve normalement sous forme de cristaux lorsque l'humidité relative de l'air est inférieure à 75 %. Lorsque l'humidité relative dépasse cette valeur d'équilibre, le chlorure de sodium absorbe l'humidité et entre en solution. Dans un environnement sec, le chlorure de sodium pur se comportera donc comme un sel efflorescent, alors que, dans un environnement très humide, il aura avant tout un comportement hygroscopique, s'opposant à l'assèchement de la maçonnerie. Ainsi, dans des conditions où l'humidité relative oscille autour des 75 %, ce sel subira des cycles de cristallisation-dissolution pouvant exercer des effets désastreux sur les maçonneries. Dans la plupart des cas, on sera confronté en pratique à un mélange de sels qui donne lieu aussi bien à des phénomènes de cristallisation que d'hygroscopicité et qui modifie les propriétés individuelles des différents sels par rapport à l'état pur. Il est dès lors extrêmement difficile de prédire le comportement d'un mélange de sels dans une maçonnerie uniquement sur la base des conditions ambiantes.

Le tableau 4 (p. 19) reprend les différentes familles de sels et indique si les composés les plus couramment rencontrés dans les bâtiments présentent un comportement hygroscopique ou non à l'état pur et dans des conditions hygrothermiques normales (température avoisinant les 20 °C et humidité relative comprise entre 30 et 60 %) [E1]. Les valeurs d'humidité d'équilibre annoncées émanent de différentes sources bibliographiques; elles varient parfois légèrement en fonction des auteurs.

L'hygroscopicité des sels peut s'avérer nettement plus problématique que celle des matériaux de construction et se manifeste souvent par l'apparition de taches d'humidité et par la dégradation des finitions (voir figure 27, p 18, et figure 29).

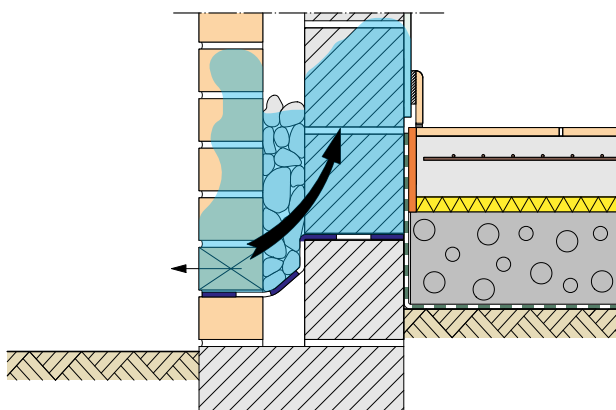


Fig. 28 Remplissage de la coulisse par des débris de mortier empêchant le drainage de l'eau; ce problème peut survenir dans toutes les coulisses, qu'elles soient isolées thermiquement ou non.



Fig. 29 Taches d'humidité et pulvérulence des finitions extérieures, liées notamment à la présence de nitrates dans la maçonnerie.

À l'exception d'avis émis au cas par cas, il n'existe pratiquement aucune information sur les concentrations de sels solubles pouvant se maintenir dans les maçonneries sans provoquer de dégâts. Le risque de dégradation due aux sels dépend en effet d'un grand nombre de paramètres, dont les différents sels présents, les caractéristiques des matériaux et les conditions ambiantes. À titre informatif et en cas de doute, on peut, sous toute réserve, se baser sur les valeurs issues de la norme autrichienne Önorm B 3355-1 [O2] (voir tableau 5, p. 19).

2.2.5 INFILTRATIONS DUES AUX PLUIES

2.2.5.1 Infiltrations en façade à travers les maçonneries

Bien qu'ils soient relativement massifs, les murs des bâtiments anciens n'offrent qu'une protection partielle contre les pluies battantes (voir NIT n° 178 [C3] et n° 224 [C11]). La tendance naturelle de la maçonnerie à absorber l'eau par capillarité, combinée à la pression des vents, favorise la pénétration d'eau de pluie dans les matériaux. En fonction de l'état de la maçonnerie (en particulier des joints) et de son épaisseur (une brique ou une brique et demie au moins), l'eau de pluie pénétrera plus ou moins facilement à travers la façade jusqu'aux finitions intérieures. Le placement de bardages sur de nombreuses façades anciennes témoigne du phénomène et de la difficulté de lutter par d'autres moyens contre l'infiltration d'eau de pluie dans les maçonneries en mauvais état fortement exposées.

Dans les murs creux non isolés, la majorité des problèmes d'infiltration sont attribuables à des défauts de pose des membranes destinées à assurer le drainage de la coulisse ou à la présence de débris dans cette dernière (voir figure 28). Même si, de nos jours, des membranes sont placées de manière systématique, la quantité d'eau qu'elles peuvent être amenées à évacuer est souvent sous-estimée. Si aucun orifice permettant d'évacuer l'eau récoltée par la membrane (au moins un joint vertical ouvert par mètre courant) n'est prévu ou si ces orifices ne sont pas parfaite-

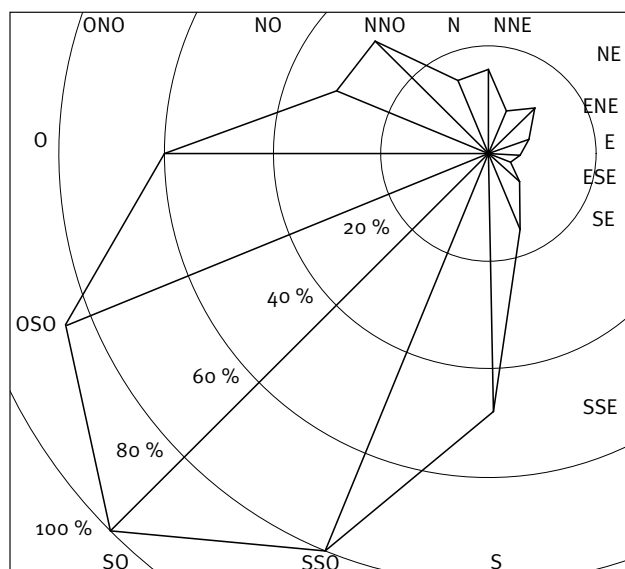


Fig. 30 Importance relative des pluies battantes au cours d'une année en fonction de l'orientation (sur la base du produit de leur intensité et de leur durée moyenne).

ment dégagés jusqu'au niveau de la membrane, l'eau peut s'écouler latéralement et s'infiltrer au droit de la première discontinuité rencontrée (chevauchement, perforation, arrêt de la membrane au droit des baies de portes ou de part et d'autre des linteaux; voir [Infocliche n° 7 \[M2\]](#)). Un manque d'étanchéité à l'air de la façade (face intérieure du mur dépourvue de plafonnage, par exemple) peut également être à l'origine de transferts d'humidité entre la maçonnerie de parement et la maçonnerie portante. Dans de rares cas, les caractéristiques des matériaux de façade (perméabilité à l'eau élevée, faible capillarité), cumulées aux déficiences précitées, donnent lieu à d'importants problèmes de pénétration d'eau à travers des maçonneries récentes [P2].

Les infiltrations en façade sont directement liées à l'intensité des pluies battantes. La figure 30 illustre la répartition des pluies en fonction de l'orientation et met en évidence la sollicitation nettement plus importante des façades exposées au sud, à l'ouest et surtout au sud-ouest.

2.2.5.2 Infiltrations au droit des menuiseries

Les défauts d'étanchéité des menuiseries sont principalement dus à l'ancienneté des châssis ou à un entretien inadéquat des joints souples, de la finition du bois, etc. Les châssis récents sont peu affectés par les infiltrations : lorsque des problèmes sont observés, ceux-ci sont en général liés à des défauts de conception ou de montage (réglage de la quincaillerie, étanchéité des assemblages, contournement du joint de calfeutrement par le gros œuvre, pose de la membrane d'étanchéité à l'air, etc.; voir figure 31 et [NIT n° 188 \[C5\]](#)).

Dans le cas de menuiseries situées au rez-de-chaussée, de telles infiltrations peuvent aisément passer inaperçues lors-

qu'elles se situent dans une zone également affectée par l'humidité ascensionnelle. Elles seront alors détectées au cours d'une seconde phase, après le traitement de l'humidité ascensionnelle.

2.2.5.3 Infiltrations en toiture

Dans la plupart des cas, les infiltrations au niveau de la toiture résultent de mauvais raccords soit entre les différents éléments de couverture, soit entre ceux-ci et d'autres éléments tels que les murs porteurs, les murs mitoyens ou les corps de cheminée. Elles peuvent également survenir en raison de défaillances ponctuelles, d'un manque d'entretien des gouttières et des descentes d'eau, ou encore du mauvais état général des éléments de couverture.

2.2.6 HUMIDITÉ ASCENSIONNELLE

Dépourvus de barrière horizontale (telle qu'une membrane d'étanchéité posée en pied de mur) bloquant le transport vertical d'eau par capillarité depuis le sol vers la maçonnerie, les murs anciens en contact avec le sol sont soumis à des phénomènes d'humidité ascensionnelle ou de remontées capillaires. L'intensité de ces phénomènes dépend de la teneur en humidité du sol, des caractéristiques des matériaux, des possibilités d'évaporation et de la présence de sels. Lorsque le niveau du sol extérieur est supérieur à celui du sol intérieur, des transferts d'eau horizontaux peuvent s'ajouter au problème d'humidité ascensionnelle.

Pratiquement toutes les maçonneries traditionnelles en contact direct avec le sol sont sujettes à ce type de phénomène, et ce, même si elles sont constituées de moellons ou de blocs de matériaux très peu poreux (pierre bleue calcaire, granit, etc.). En effet, la porosité et la continuité du mortier de construction dans l'ouvrage font de ce matériau le milieu de propagation préférentiel de l'humidité.



Fig. 31 Infiltrations d'eau au droit des menuiseries.

Tableau 6 Nécessité d'un traitement contre l'humidité ascensionnelle en fonction du taux d'humidité des maçonneries.

Taux d'humidité [% masse] (*)	Traitement contre l'humidité ascensionnelle
< 3	Superflu
3 – 5	Conseillé en cas de pathologie évidente, ou lorsqu'un recouvrement est prévu (isolation thermique ou autre)
> 5	Nécessaire
(*) Celui-ci est déterminé grâce à l'analyse, par pesée comparative ou au moyen d'une bombe à carbure, d'un échantillon de mortier prélevé dans la zone la plus humide de la maçonnerie (voir § 3.1.2, p. 27, et § 3.1.3, p. 28).	

En moyenne, l'humidité ascensionnelle affecte les maçonneries sur des hauteurs maximales de 0,5 à 1,5 mètre environ, en fonction des conditions ambiantes et des caractéristiques des matériaux. Ces valeurs peuvent s'avérer inférieures dans des ouvrages fortement ventilés ou, au contraire, supérieures lorsque l'évaporation de l'eau est rendue difficile, voire impossible, par la présence d'éléments qui empêchent l'évaporation du côté intérieur et/ou du côté extérieur (enduits bitumineux, cimentages, cuvelages, feuilles étanches, isolation thermique, carreaux en céramique ou doublages, par exemple). On recommande donc de ne jamais poser de recouvrement qui ralentirait l'assèchement sur une maçonnerie sujette à l'humidité ascensionnelle, sans prévoir un dispositif de blocage de cette humidité au préalable (voir chapitre 4, p. 35).

Comparées aux autres causes d'humidité, les remontées capillaires engendrent bien souvent des dégâts plus importants aux finitions intérieures et extérieures, puisqu'elles combinent les effets directs de l'humidité et ceux des sels en provenance du sol et des matériaux.



Fig. 32 Humidité ascensionnelle : absorption d'humidité et de sels solubles contenus dans le sol par les matériaux de construction poreux en contact avec celui-ci.

Si tous les bâtiments dépourvus de membrane d'étanchéité en pied de mur sont susceptibles d'être affectés par l'humidité ascensionnelle, tous ne requièrent cependant pas une intervention. Le tableau 6 donne une indication de la nécessité d'un traitement contre l'humidité ascensionnelle en fonction de la teneur en humidité des maçonneries. Ces teneurs en humidité sont déterminées grâce à l'analyse d'un échantillon de mortier prélevé dans la zone la plus humide de la maçonnerie, à une profondeur de 5 à 8 cm environ. L'analyse se fait au moyen d'une bombe à carbure ou par pesées comparatives (voir § 3.1.2, p. 27, et § 3.1.3, p. 28). Ces valeurs empiriques s'appliquent aux matériaux poreux les plus courants ne contenant pas ou très peu de sels solubles et dans des conditions hygrothermiques normales (température avoisinant les 20 °C et humidité relative comprise entre 30 et 60 %) [E1]. Il convient de les interpréter en tenant compte des conditions ambiantes, des pathologies décelées et des interventions prévues (pose d'une isolation thermique, par exemple) (4).

Dans les constructions récentes, un défaut de pose de la membrane d'étanchéité en pied de mur peut engendrer des phénomènes d'humidité ascensionnelle [M2].

Dans certains cas, on observe des dégâts liés à l'humidité ascensionnelle malgré la présence de barrières anticapillaires situées au bon niveau. Ces dégradations peuvent apparaître à la suite d'un rehaussement du niveau du sol extérieur au-dessus de la membrane de drainage et de la membrane anticapillaire (voir figure 34, p. 23) ou être causés par la mise en œuvre des enduits intérieurs sous le niveau de la membrane d'étanchéité (voir figure 33 et figure 35, p. 23). Ces enduits poreux et capillaires pontent la membrane et entraînent une humidification de la maçonnerie se trouvant au-dessus de celle-ci (5). Un remède à ce type de problème peut consister à réaliser une saignée à la base de l'enduit intérieur et à remettre les plinthes en place à l'aide d'un



Fig. 33 Dégradation des finitions due au pontage de la membrane d'étanchéité par l'enduit intérieur au bas du mur.

(4) Ces valeurs permettent également d'évaluer la nécessité d'une intervention lorsque l'humidification des maçonneries est liée à d'autres causes que l'humidité ascensionnelle.

(5) Dans ce cas, la hauteur de remontée capillaire se limite généralement à une vingtaine, voire une trentaine de centimètres.

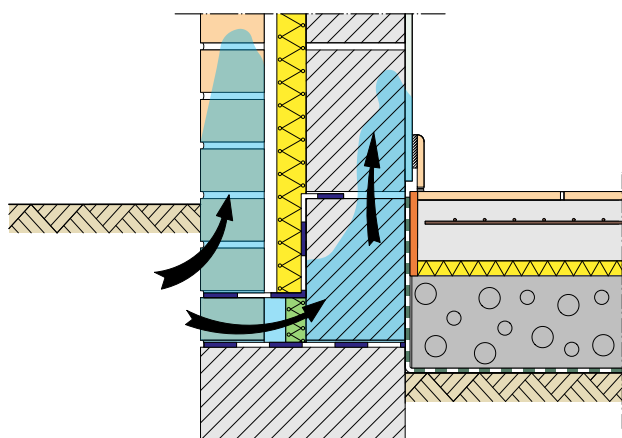


Fig. 34 Humidification par apport de terres au-dessus du niveau de l'étanchéité, avec ou sans dallage de finition.

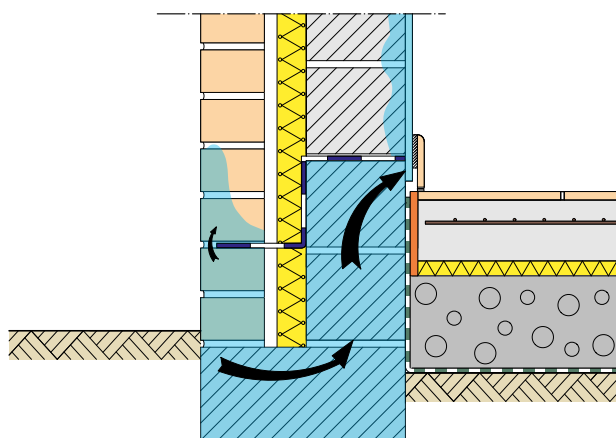


Fig. 35 Pontage de la membrane d'étanchéité par l'enduit intérieur et par le joint de parement (coulisse isolée thermiquement ou non).

mortier-colle hydrophobe ou par des moyens mécaniques (voir NIT n° 199 [C8] et CSTC-Magazine n° 2, 1992 [W1]).

2.2.7 AUTRES CAUSES D'HUMIDIFICATION

Les fuites d'eau dans les canalisations d'amenée ou d'évacuation encastrées représentent un faible pourcentage des cas d'humidité et leur diagnostic est habituellement aisé, excepté dans les cas où le transfert de l'eau vers la maçonnerie est favorisé par une dalle continue sur laquelle est posée une chape désolidarisée, par exemple.

Les phénomènes de projection d'eau au bas des murs sont

difficiles à distinguer de l'humidité ascensionnelle, car ils donnent lieu à des symptômes similaires. Ces projections sont accentuées par l'absence de gouttières ou de descentes d'eau pluviale (voir figure 37).

De même, le phénomène de rejaillissement illustré à la figure 36 est symptomatique des maçonneries à front de rue. Il se caractérise par des projections régulières d'humidité et de chlorures hygroscopiques issus des sels de déneigement.

Outre les rejaillissements, on constate régulièrement une humidification du bas des murs due à la stagnation d'eau en provenance des contre-pentes de terrasses et autres chemins dallés bordant les habitations.

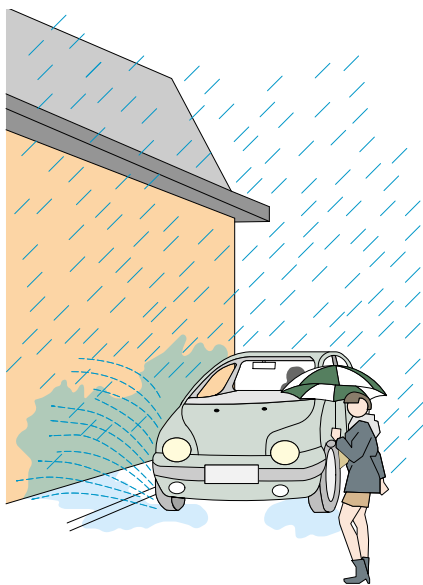


Fig. 36 Projections régulières sur le bas des murs lors de pluies ou de fonte des neiges.



Fig. 37 Projections d'eau au bas de murs dépourvus de gouttière : les projections sont plus marquées sous les versants de toiture que sous les couvre-murs de clôture, car les quantités d'eau évacuées y sont plus importantes.

3

DIAGNOSTIC DE L'HUMIDITÉ DANS LES CONSTRUCTIONS

On ne saurait trop insister sur la nécessité de dresser un diagnostic sérieux avant toute intervention dans les bâtiments en général et dans les constructions anciennes en particulier, a fortiori lorsqu'on se trouve confronté à des dégâts causés par l'humidité. En effet, ces dégradations aux causes souvent multiples apparaissent plus ou moins loin des sources d'humidification. En outre, des causes d'humidité différentes peuvent avoir des conséquences similaires : pulvéulence ou expulsion des matériaux de construction, pulvéulence ou décollement des couches de finition, efflorescences, moisissures, inconfort général dû au taux élevé d'humidité relative de l'air, etc. (voir exemples au § 1.1, p. 7).

Même si l'origine des dégâts paraît évidente, il s'avère essentiel de passer en revue et de vérifier toutes les causes potentielles d'humidification pour chaque chantier, en tenant compte du fait qu'elles peuvent s'influencer mutuellement. Le diagnostic préalable sera d'autant plus fouillé que les chantiers sont importants. Dans certains cas, il s'agit d'une démarche relativement lourde, requérant l'exécution de prélèvements, d'analyses *in situ* et en laboratoire ainsi que l'interprétation des résultats par un expert en la matière.

Pour les chantiers plus restreints, on fera en général directement appel à des entreprises spécialisées en travaux d'assèchement. Celles-ci établiront le diagnostic lors d'une visite sur place, afin de cerner les interventions nécessaires et de remettre une offre de prix en conséquence. Le sérieux et le soin apportés au diagnostic ainsi que la description détaillée des interventions devraient constituer des critères prioritaires pour le choix de l'entreprise par le client.

Les paragraphes suivants ont pour objectif d'aider les acteurs de terrain à dresser un diagnostic correct et complet de l'humidité dans une construction. En cas de doute, les professionnels peuvent également faire appel à l'expérience du CSTC.

3.1 MISE EN ÉVIDENCE DES CAUSES D'HUMIDITÉ : DIALOGUE, CONSTATATIONS ET MESURES

La première étape du diagnostic de l'humidité consiste à dialoguer avec les occupants du bâtiment, afin d'évoquer entre autres les problèmes observés, leur localisation, leur fréquence et les circonstances qui accompagnent leur apparition (climat, occupation, etc.). Les points abordés peuvent ensuite être vérifiés rapidement par de premières constatations visuelles ou tactiles.

Même si, dans un premier temps, ces constatations visuelles ou tactiles permettent de détecter la présence d'humidité ainsi que sa ou ses causes potentielles, le diagnostic complet (tout comme le contrôle de l'assèchement après intervention) doit reposer sur des méthodes plus précises fournissant des mesures fiables dans des conditions reproductibles.

Plusieurs types d'appareils destinés à mesurer l'humidité dans les matériaux de construction sont disponibles sur le marché. Certains appareils de diagnostic fonctionnent sur la base des principes de mesure électrique (résistivité ou capacitance). Rapides et pratiques d'utilisation, ces appa-



Fig. 38 Appareils de mesure de l'humidité capacitifs et résistifs.

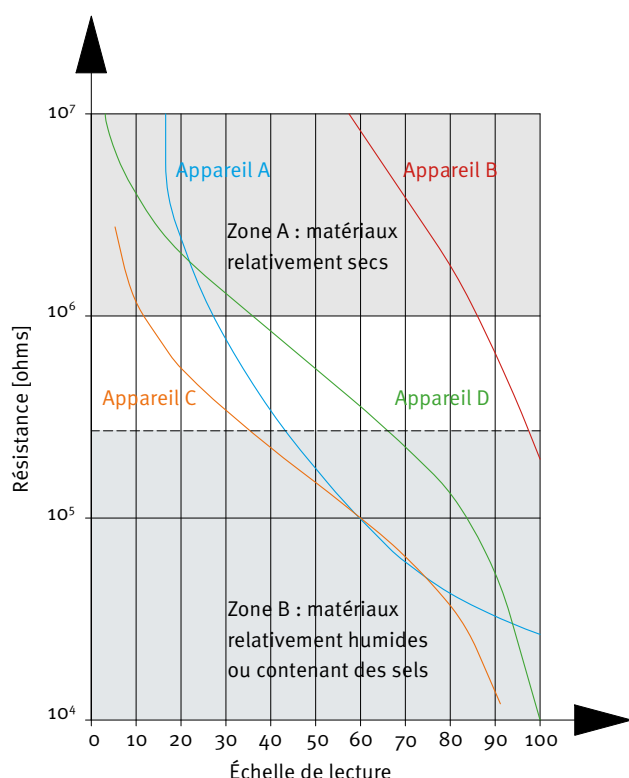


Fig. 39 Exemple de courbes de résistivité de quelques appareils de mesure.

reils sont incontournables pour le diagnostic. Ils permettent en effet de mettre facilement en évidence les zones potentiellement humides grâce à la comparaison des valeurs mesurées à différents endroits sur des matériaux identiques (mesures à différentes hauteurs sur des enduits intérieurs, par exemple). Toutefois, les valeurs fournies par ces appareils sont influencées par de nombreux paramètres, qui englobent non seulement l'humidité, mais aussi la densité des matériaux et les différents sels qu'ils contiennent ainsi que la présence éventuelle d'éléments métalliques. Par conséquent, il est impossible de déduire la teneur en humidité exacte des matériaux à l'aide de ces seuls appareils, quels qu'en soient le coût ou le degré de sophistication. En bref, ces appareils fournissent une mesure indicative visant à localiser les zones potentiellement humides au moyen d'une analyse comparative sur des matériaux identiques.

Afin d'évaluer avec certitude le taux d'humidité des matériaux de construction dans les zones identifiées comme potentiellement problématiques et de déterminer la nécessité d'une intervention, il convient d'effectuer au moins un prélèvement. L'échantillon prélevé est ensuite analysé par pesées comparatives avant et après séchage (en

laboratoire ou *in situ*) ou par mesure directe au moyen d'une bombe à carbure. Notons cependant que l'humidité n'est pas répartie de manière uniforme dans les maçonneries. Bien que les mesures soient précises, les valeurs obtenues dans une même zone peuvent donc varier entre autres selon la porosité des matériaux et la profondeur à laquelle l'échantillon est prélevé; c'est pourquoi plusieurs prélèvements peuvent s'avérer nécessaires. Étant donné les caractéristiques intrinsèques des mortiers, des briques et des pierres naturelles, on conseille de toujours réaliser les prélèvements dans les joints de mortier, qui présentent les teneurs en humidité les plus critiques ⁽⁶⁾.

Outre les mesures de la teneur en humidité des matériaux, il sera souvent utile de procéder à des mesures complémentaires pour déterminer les conditions hygrothermiques ambiantes et la présence de sels.

Les paragraphes suivants détaillent les principes d'utilisation ainsi que les avantages et les inconvénients des appareils et des techniques mentionnés ci-avant [A2, A3].

3.1.1 MESURE RÉSISTIVE OU CAPACITIVE DE L'HUMIDITÉ

Vu leur faible coût, leur facilité et leur rapidité d'utilisation, les appareils de mesure dont le fonctionnement est basé sur des principes de résistivité ou de capacitance électriques sont particulièrement utiles pour le diagnostic. Ces appareils analysent la variation de résistivité ou de capacitance des matériaux en fonction notamment de leur teneur en humidité (voir figure 38, p. 25).

Les appareils résistifs utilisent des pointes enfoncées à faible profondeur (quelques millimètres) dans le matériau et fixées soit directement sur le boîtier, soit sur un porte-sonde relié à l'appareil. Il est en outre possible de relier des sondes spéciales qui, une fois placées dans des trous forés au préalable, prennent des mesures en profondeur (quelques dizaines de centimètres).

Les appareils capacitifs s'emploient, quant à eux, par simple contact avec les surfaces et mesurent l'humidité contenue dans le matériau sur une profondeur de quelques millimètres, voire quelques centimètres.

Quel que soit le type ou la marque de l'appareil utilisé, la méthode reposera toujours exclusivement sur une comparaison des valeurs mesurées sur les parties réputées 'sèches' et les parties potentiellement problématiques de matériaux identiques situés dans des zones voisines. Les zones présentant des valeurs sensiblement plus élevées

⁽⁶⁾ Il importe de choisir les points de mesure de manière judicieuse. Lorsqu'on est confronté à un phénomène d'humidité ascensionnelle, la teneur en humidité des matériaux doit, en toute logique, décroître à mesure que la distance par rapport au niveau du sol augmente. Si l'on effectue une mesure dans un joint situé juste au-dessus d'une discontinuité dans la maçonnerie (fissure ou cavité), on obtiendra toutefois une teneur en humidité anormalement basse, l'humidité ascensionnelle étant bloquée localement par la discontinuité.

que celles mesurées sur une zone 'sèche' proche seront ensuite analysées plus en détail, selon les méthodes exposées aux paragraphes suivants.

Bien que certains appareils soient fournis avec des tableaux de conversion permettant de déterminer un taux d'humidité en fonction de la nature des matériaux contrôlés, on évitera de convertir les résultats de mesure de cette façon. Rappelons en effet que, même si la teneur en humidité des supports a un impact direct sur les mesures, ces dernières sont également influencées par de très nombreux autres paramètres tels que la teneur en sels, la densité des matériaux et la présence d'éléments métalliques (canalisations, films d'aluminium ou de plomb).

Par ailleurs, il est tout à fait déconseillé de comparer des valeurs mesurées par différents appareils. Comme on peut le voir à la figure 39 (p. 26), les divers appareils testés donnent effectivement des résultats complètement différents pour une même résistivité réelle (exprimée en ohms).

Notons en outre que ces appareils sont totalement inadaptés au contrôle de l'assèchement des murs après traitement, étant donné que les sels ont un impact très important et non vérifiable sur les mesures. En effet, la concentration de sels sur les surfaces d'évaporation lors de l'assèchement donne lieu à une forte augmentation des valeurs mesurées, y compris dans des maçonneries sèches et d'autant plus lorsque l'humidité relative ambiante est élevée. Ainsi, l'utilisation de ce type d'appareil pour le contrôle de l'assèchement risque de mener à des conclusions erronées quant à l'efficacité des interventions réalisées.

Pour une mesure correcte de la teneur en humidité des matériaux, on optera donc pour d'autres méthodes telles que les pesées comparatives ou la mesure au moyen d'une bombe à carbure.



Fig. 40 Bombe à carbure et accessoires.

3.1.2 MESURE DE L'HUMIDITÉ PAR PESÉES COMPARATIVES OU GRAVIMÉTRIE

3.1.2.1 Mesure de l'humidité totale contenue dans le matériau

La mesure de la teneur en humidité des matériaux peut se faire de manière simple et précise, en réalisant, avant et après séchage, des pesées comparatives d'un échantillon prélevé par forage lent ou par burinage à une profondeur de 5 à 8 cm dans la maçonnerie, de préférence dans un joint de mortier.

La mesure en laboratoire consiste à conditionner hermétiquement l'échantillon prélevé *in situ* avant de le sécher dans une étuve ventilée à température contrôlée ou dans un four à micro-ondes (technique plus rapide), jusqu'à l'obtention d'une masse constante. Le pourcentage d'humidité en masse de l'échantillon est donné par le rapport entre la quantité d'humidité qui s'est échappée de l'échantillon (masse initiale humide de l'échantillon moins sa masse sèche) et la masse sèche de l'échantillon [B10] :

$$\begin{array}{l} \text{teneur en humidité} \\ \text{d'un matériau} \\ \text{poreux [\%]} \end{array} = \frac{\text{masse d'humidité contenue} \\ \text{dans le matériau [g]}}{\text{masse du matériau sec [g]}} \times 100 \, \%. \quad \text{}$$

Pour la mesure *in situ*, il existe des dessiccateurs compacts capables de peser et de sécher des échantillons de plusieurs dizaines de grammes en quelques dizaines de minutes grâce à des technologies infrarouges ou halogènes. Ces appareils offrent des résultats plus rapides tout en évitant le transport de l'échantillon.

Notons que la température et la technique de séchage influencent le résultat de la mesure. Dans une étuve ventilée, les températures de séchage couramment utilisées sont de 45, 70 et 105 °C. Les résultats d'une série de mesures gravimétriques effectuées sur des chapes ont permis de constater que la teneur en humidité obtenue est fonction de la température de séchage : plus la température de séchage est élevée, plus le taux d'humidité mesuré est important [C1]. De même, les résultats obtenus par séchage au four à micro-ondes ne peuvent pas être comparés directement aux résultats obtenus par séchage à l'étuve.

La mesure de l'humidité par pesées comparatives est semi-destructive en raison des prélèvements nécessaires à sa réalisation. L'exactitude des résultats est directement liée, d'une part, au soin apporté au prélèvement et, d'autre part, à la précision de la balance par rapport à l'échantillon prélevé. On recommande notamment de prélever l'échantillon par burinage ou par forage lent, afin d'éviter un réchauffement trop important de la maçonnerie, qui entraînerait à son tour l'évaporation de l'humidité qu'elle renferme. Par ailleurs, pour un échantillon d'une dizaine de grammes, on conseille de réaliser une pesée au centième de gramme.

Il est à noter que, lorsque l'échantillon est séché à des températures très élevées ou dans une ambiance très sèche,

une partie de l'humidité hygroscopique contenue dans le matériau est éliminée. Ainsi, la teneur en humidité mesurée reflète non seulement l'humidité liée à des phénomènes d'absorption capillaire (c'est-à-dire issue d'une source d'eau liquide), mais aussi l'humidité hygroscopique due à l'absorption de la vapeur d'eau présente dans l'air par le matériau. C'est donc bien la teneur totale en humidité qui est évaluée.

3.1.2.2 Distinction entre l'humidité capillaire et l'humidité hygroscopique contenues dans le matériau

La norme autrichienne Önorm B 3355-1 [O2] propose une méthode visant à estimer la proportion d'humidité hygroscopique par rapport à l'humidité totale contenue dans un matériau poreux. Cette méthode consiste à comparer la teneur en humidité totale déterminée par pesées comparatives (voir § 3.1.2.1, p. 27) et la teneur en humidité de l'échantillon calculée selon la même technique, mais après avoir entièrement séché l'échantillon et l'avoir exposé à une humidité relative ambiante de 85 % jusqu'à l'obtention d'une masse constante. Cette seconde mesure étant censée représenter l'humidité hygroscopique renfermée dans l'échantillon, la différence entre les deux mesures devrait correspondre au taux d'humidité lié à des phénomènes d'absorption capillaire.

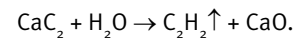
Cependant, ce raisonnement ne serait entièrement valable que si l'humidité relative ambiante s'élevait à 85 % à température égale lors de la prise de l'échantillon, ce qui est rarement le cas dans les bâtiments. Une fois sa teneur totale en humidité déterminée, l'échantillon devrait donc idéalement être exposé *in situ*, afin d'atteindre un équilibre avec les conditions hygrothermiques ambiantes. Toutefois, cette solution est longue à mettre en œuvre et difficilement applicable dans la pratique, étant donné que les conditions ambiantes *in situ* fluctuent. La méthode proposée par la norme autrichienne peut donc servir à estimer la composante hygroscopique de la teneur totale en humidité, lorsqu'on soupçonne que cette dernière est importante (en raison de fortes concentrations de sels, par exemple). En outre, l'humidité relative ambiante à laquelle l'échantillon est exposé (85 % dans la norme) peut éventuellement être adaptée pour se rapprocher des conditions réelles rencontrées sur site.

3.1.3 MESURE DE L'HUMIDITÉ AU MOYEN D'UNE BOMBE À CARBURE

Le prélèvement d'un échantillon de 5 à 20 g de matériau humide dans la zone étudiée s'exécute de la même façon que pour la mesure par pesées comparatives, c'est-à-dire par forage lent ou par burinage à une profondeur de 5 à 8 cm dans la maçonnerie, de préférence dans un joint de mortier.

Après la pesée, l'échantillon est broyé si nécessaire et est introduit dans un récipient calibré muni d'un manomètre (voir figure 40, p. 27), dans lequel on ajoute un jeu de billes

d'acier et une fiole contenant du carbure de calcium (CaC_2) en excès. Le récipient est ensuite fermé hermétiquement, puis agité de manière à briser l'ampoule de carbure de calcium et à obtenir un contact homogène avec la matière prélevée, ce qui favorise la réaction de formation de gaz d'acétylène (C_2H_2) décrite ci-après :



La pression créée par le gaz d'acétylène ainsi formé est mesurée à l'aide d'un manomètre. Cette valeur est alors transformée en pourcentage d'humidité sur la base d'un tableau de conversion fourni avec l'appareillage. Cette méthode présente l'avantage d'être relativement rapide et de donner des résultats immédiats sur chantier.

Signalons que la remarque concernant l'humidité hygroscopique et l'humidité capillaire formulée au § 3.1.2.1 (p. 27) vaut aussi pour les mesures réalisées à l'aide de la bombe à carbure. En effet, le carbure de calcium réagit sans distinction avec l'humidité hygroscopique et l'humidité capillaire contenues dans l'échantillon. Cependant, les mesures effectuées par pesées comparatives donnent en général un résultat légèrement supérieur, puisqu'une certaine quantité d'eau faiblement liée s'échappe lorsque l'échantillon est exposé à des températures élevées pendant une durée relativement longue. Les résultats d'une série de mesures réalisées sur des chapes au moyen d'une bombe à carbure ont d'ailleurs montré que la teneur en humidité évaluée est systématiquement inférieure à celle obtenue par séchage dans une étuve ventilée à 45 °C [C1]. Les mesures à la bombe à carbure et les mesures par pesées comparatives ne peuvent donc pas être comparées sans discernement.

3.1.4 DÉTERMINATION DE LA PRÉSENCE DE SELS

Tout comme de nombreuses causes d'humidité, les phénomènes d'humidité ascensionnelle entraînent la migration de



Fig. 41 Bandelettes indicatrices servant à déterminer la présence de sels (nitrates et chlorures).

Tableau 7 Méthodes d'analyse des sels et de leurs composants (éléments et ions).

Méthode d'analyse	Préparation	Particules identifiées			Détermination
		Éléments	Ions	Sels	
Bandelettes	<i>In situ</i> ou broyage et dispersion	–	Ions solubles selon le type de bandelette (chlorures, nitrates et sulfates)	–	Qualitative (<i>in situ</i>) ou semi-quantitative (en laboratoire)
Conductivité	Broyage, dispersion et filtration	–	Total des ions solubles, sans distinction	–	Qualitative (quantitative si un seul sel est présent et qu'on dispose d'une courbe d'étalonnage pour ce sel)
Hygroscopicité	–	–	–	Sels hygroscopiques dans les conditions hygrothermiques choisies, sans distinction	Qualitative (quantitative si un seul sel est présent et qu'on dispose d'une courbe d'étalonnage pour ce sel)
Chromatographie ionique	Broyage, dispersion et filtration	–	Ions solubles	–	Quantitative
EDX	–	Éléments	–	–	Qualitative
XRD	Broyage	–	–	Sels	Semi-quantitative
XRF	Broyage et formation d'une pastille ou d'une perle	Éléments	–	–	Quantitative
Combinaison XRD et XRF	Broyage (et formation d'une pastille ou d'une perle)	Éléments	–	Sels	Quantitative

sels solubles dans les maçonneries. La présence de ces sels accentue encore davantage le caractère destructif et gênant du problème d'humidité et peut empêcher l'assèchement complet des maçonneries dans certains cas.

Lors du diagnostic de l'humidité, il s'avère donc utile de vérifier également si l'on retrouve des sels solubles à la surface des matériaux. Pour ce faire, il existe des bandelettes indicatrices qui permettent de détecter, de façon qualitative, la présence d'ions de nitrates, de chlorures et de sulfates directement sur site (voir figure 41, p. 28). Lorsque la bandelette et la zone à tester sont humidifiées, on appuie la partie réactive de la bandelette contre le support. En fonction de la rapidité et de l'intensité du changement de couleur, on établit une estimation qualitative de l'aspect pathologique des sels décelés. Un changement très rapide (en l'espace de quelques secondes) et intense de la couleur de la partie indicatrice reflète des concentrations pathologiques. À l'inverse, un virage très léger ou inexistant de la couleur après une minute d'attente indique que la concentration en sels solubles peut être considérée comme négligeable.

Notons qu'on déconseille de mesurer les sulfates à l'aide de bandelettes sur chantier, puisqu'ils sont contenus naturellement dans la plupart des matériaux de construction. Les bandelettes conviennent en revanche parfaitement pour démontrer la présence de chlorures et de nitrates.

Ces bandelettes peuvent être utilisées en laboratoire pour une analyse comparative des échantillons prélevés *in situ*.

Au cours de cette analyse, l'échantillon prélevé dans la maçonnerie est broyé finement, pesé et dispersé dans un volume d'eau déminéralisée. On immerge ensuite la bandelette pendant quelques secondes dans la solution ainsi obtenue et on déduit l'ordre de grandeur de la concentration des ions en solution sur la base de l'échelle de couleur fournie par le fabricant. Des essais ont cependant démontré que les résultats de ces mesures peuvent varier en fonction du degré de dilution choisi ou de la présence de certains éléments dans la solution.

Il existe en outre différentes techniques permettant une analyse plus précise des sels. Le choix d'une de ces techniques dépendra du niveau d'information requis. Toutes les techniques présentées ci-après requièrent le prélèvement *in situ* d'un ou de plusieurs échantillons représentatifs ainsi qu'une analyse en laboratoire. Les sels se trouvant à la surface des matériaux sous forme d'efflorescences peuvent être récoltés par simple brossage ou absorbés sur du papier buvard analytique. L'analyse des sels situés en profondeur nécessite, quant à elle, le prélèvement d'un échantillon de mortier, de pierre ou de brique par forage lent ou par burinage. Ces échantillons seront conservés dans une ambiance hermétique jusqu'à leur analyse en laboratoire [E4, V5]. Certaines techniques d'analyse permettent d'identifier les sels (sulfate de soude Na_2SO_4 , par exemple), tandis que d'autres identifient uniquement les ions (ion de sulfate SO_4^{2-} , par exemple) ou les éléments (soufre S, par exemple) contenus dans l'échantillon.

Parmi les techniques d'analyse les plus courantes, on peut citer :

- **la mesure de la conductivité** : à l'aide d'une électrode spécifique, on mesure la conductivité électrique d'une solution d'eau déminéralisée qui a été mise en contact avec l'échantillon broyé puis filtrée. Cette méthode ne permet pas d'identifier les sels ou leurs ions constitutifs, mais donne une estimation de la concentration globale en sels solubles. Elle peut s'avérer utile lorsqu'on compare plusieurs échantillons d'un même matériau, par exemple des échantillons prélevés à différentes profondeurs dans un mur ou avant et après traitement. Si l'échantillon ne contient qu'un seul sel (ce qui est rarement le cas en pratique), on peut déterminer une courbe d'étalonnage pour ce sel, ce qui permet d'obtenir des résultats quantitatifs
- **la mesure de l'hygroscopicité** : une fois séchés et pesés, les échantillons sont placés dans un environnement dont la température et l'humidité relative sont connues et constantes. Lorsque l'équilibre est atteint, la différence entre la masse de l'échantillon et sa masse sèche donne une indication de la quantité de sels exerçant une activité hygroscopique dans les conditions hygrothermiques choisies. Comme la précédente, cette méthode ne permet pas d'identifier les sels ou leurs ions constitutifs, mais peut s'avérer efficace lorsqu'on souhaite comparer un grand nombre d'échantillons [D3]. Si l'échantillon ne contient qu'un seul sel (ce qui est rarement le cas en pratique), on peut déterminer une courbe d'étalonnage pour ce sel dans un matériau donné, ce qui permet d'obtenir des résultats quantitatifs
- **la chromatographie à échange d'ions ou chromatographie ionique** : cette technique de chromatographie en phase liquide permet d'identifier et de quantifier avec précision les ions de sels contenus dans une solution d'eau déminéralisée qui a été mise en contact avec l'échantillon broyé puis filtrée
- **la microsonde EDX (Energy Dispersive X-rays, EDX)** : cette méthode permet d'identifier les éléments chimiques se trouvant à la surface d'un échantillon analysé, mais ne permet pas de déterminer sous quelle forme (sel ou ion) ils se présentent. Elle est généralement combinée à une analyse au microscope électronique à balayage, ce qui permet de localiser très précisément l'endroit où se trouve l'élément à étudier. Pour l'analyse des sels, on lui préférera d'ordinaire les méthodes XRD et XRF
- **la diffractométrie des rayons X (X-ray Diffraction, XRD)** : la méthode XRD permet d'identifier des composés cristallins tels que les sels contenus dans un échantillon broyé, pour autant qu'ils soient présents en quantité suffisante (plus de 5 % en masse), sans quoi les pics de diffraction se fondent dans le bruit de fond du spectre. Grâce à cette méthode, on peut en outre déterminer de façon semi-quantitative la teneur en sels du matériau analysé
- **la spectrométrie de fluorescence X (X-ray Fluorescence, XRF)** : la méthode XRF permet l'analyse quantitative des éléments chimiques renfermés dans un matériau. L'échantillon est soit broyé, mélangé à de l'acide borique et pressé de façon à former une pastille de surface plane,

soit fondu de manière à former une perle. Le choix de la préparation dépend de la précision d'analyse requise. Cette technique ne permet pas de déterminer sous quelle forme (sel ou ion) l'élément chimique identifié se présente. Seule la combinaison des méthodes XRF et XRD permettra d'évaluer les quantités de sels. Notons, par ailleurs, que si ces analyses sont effectuées sur de la brique ou du mortier, par exemple, elles renseigneront la teneur totale en sels et non uniquement la teneur en sels solubles.

Le tableau 7 (p. 29) reprend les différentes méthodes d'analyse décrites ci-avant ainsi que leurs principales caractéristiques.

3.1.5 MESURE DES CONDITIONS HYGROMÉTRIQUES AMBIANTES ET DES TEMPÉRATURES DE SURFACE

Si l'on suspecte les phénomènes de condensation, l'hygroscopicité des matériaux ou la présence de sels d'être à l'origine des problèmes constatés, il peut se révéler utile de mesurer l'humidité relative de l'air ainsi que la température de l'air et des surfaces concernées.

Pour mesurer l'humidité relative de l'air, on utilise un hygromètre ou un (thermo)hygrographe (voir [Guide pour la restauration des maçonneries](#) [C13]). L'hygromètre ne livrant qu'une valeur instantanée de l'humidité ambiante, il convient d'effectuer plusieurs mesures à intervalles réguliers si l'on veut suivre l'évolution de l'humidité relative de l'air dans le temps. L'hygrographe enregistre, quant à lui, l'humidité relative de l'air pendant une période prédéterminée. Tout comme les hygromètres à cheveux et les thermomètres 'secs' et 'humides', les hygromètres et les (thermo)hygrographes les plus courants exploitent les propriétés résistives ou capacitatives de l'air pour en mesurer l'humidité relative.

La température ambiante est souvent enregistrée en même temps que l'humidité relative de l'air à l'aide d'un thermo-hygrographe (voir figure 42).

La température de surface des matériaux est évaluée soit par contact soit à distance, à l'aide d'un thermomètre (infra-



Fig. 42 Thermohygrographe électronique.



Fig. 43 Photographie et thermogramme réalisés à l'aide d'une caméra infrarouge. Le thermogramme met en évidence les surfaces présentant les températures de surface les plus basses et comportant de ce fait un risque de développement de moisissures et de condensation superficielle accru.

rouge) ou d'une caméra infrarouge. La caméra infrarouge offre une vue d'ensemble des surfaces observées, ce qui permet de repérer rapidement les différences de température et les zones particulièrement froides (voir figure 43).

3.2 DIAGNOSTIC : INTERPRÉTATION DES INFORMATIONS, DES CONSTATATIONS ET DES MESURES

Le dialogue avec les occupants, les constatations et les mesures permettront d'identifier une ou plusieurs causes d'humidité. Le tableau 8 (p. 32 et 33) a pour but de faciliter l'interprétation de ces données en rassemblant de manière systématique les informations, les constatations et les mesures liées aux principales causes d'humidité (même si tous les symptômes décrits ne se manifestent pas dans tous les cas). Ce tableau ne prétend toutefois pas couvrir toutes les situations possibles, l'expérience et la connaissance du sujet restant les principaux atouts d'une bonne interprétation.

Soulignons que, si la plupart des constatations reprises ci-après concernent l'intérieur du bâtiment, il est aussi important d'étudier l'extérieur du bâtiment. En effet, les détails architecturaux, la pente du terrain ou encore la présence de coulées autour d'une descente d'eau, par exemple, sont autant d'éléments qui contribuent à déterminer l'origine exacte d'un problème d'humidité.

Les autres causes d'humidification doivent être étudiées au cas par cas. Lorsque l'apparition d'un problème d'humidité ne peut être attribuée à aucune des causes décrites dans le tableau 8 (p. 32 et 33), il convient de rechercher une origine spécifique. Il peut s'agir de causes aussi diverses qu'une fuite de tuyauterie sanitaire (alimentation ou évacuation) ou de tuyauterie de chauffage, une descente d'eau bouchée ou mal raccordée (voir figure 44), un robinet de jardin mal fermé, etc. Il arrive en outre que le problème se manifeste relativement loin de sa source, comme dans le cas des infiltrations d'eau de pluie, alors que la relation de cause à effet sera évidente dans d'autres cas.

Fig. 44 Infiltration d'humidité et décollement de l'enduit résultant d'une interruption entre les éléments de la descente d'eau.

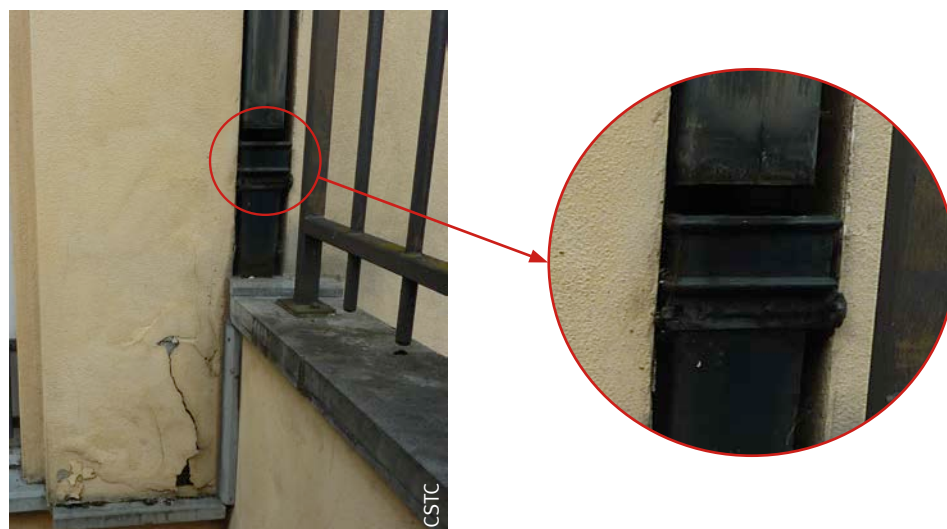


Tableau 8 Diagnostic : aide à l'interprétation des informations, des constatations et des mesures.

Type de diagnostic	Constatations	
Dialogue avec les occupants	Histoire du bâtiment et interventions antérieures	Bâtiment à usage agricole ou industriel (actuellement ou par le passé)
		Problème d'humidité ascensionnelle ayant été traité dans le passé (même récemment)
		Mise en œuvre récente d'une (partie de) construction : annexe, dalle de sol, etc.
		Ouvrage récent soumis à de fortes intempéries ou sur lequel les matériaux ont manqué de protection lors de la période de construction
		Mise en œuvre récente d'une isolation thermique, de nouveaux châssis ou de doubles vitrages, ou calfeutrage des fuites d'air, etc., sans mise en place d'un système de ventilation adapté
		Rehaussement récent du niveau du sol intérieur ou extérieur au-dessus du niveau de la membrane en pied de mur
		Symptômes apparaissant sur des finitions récemment mises en œuvre
	Évolution de la pathologie dans le temps	Séchage spontané des matériaux au fil du temps
		Symptômes se manifestant en période hivernale
		Symptômes apparaissant dans les caves ou les bâtiments à très forte inertie thermique au printemps et en été
		Variations dimensionnelles des matériaux hygroscopiques (portes et châssis en bois) au cours de l'année
Constatations	Conditions d'apparition de la pathologie	Fluctuation de l'intensité des taches d'humidité ou des efflorescences blanchâtres en fonction de l'humidité de l'air ambiant
		Symptômes se manifestant pendant ou après de fortes pluies
		Conditions d'occupation engendrant une production importante de vapeur, manque de chauffage ou de ventilation
	Répartition de l'humidité dans le bâtiment	Répartition de l'humidité sur l'ensemble du bâtiment
		Présence d'humidité dans le bas des murs en contact avec le sol
		Présence d'humidité dans les murs intérieurs
		Taches d'humidité réparties de façon apparemment aléatoire
	Symptômes observés	Présence d'humidité dans les éléments orientés au sud, au sud-ouest ou à l'ouest
		Gouttelettes visibles sur les matériaux peu ou non poreux
		Présence de champignons ou de moisissures
		Présence d'efflorescences blanchâtres
Mesures	Caractéristiques du bâtiment	Décollement ou dégradation des finitions
		Murs massifs en mauvais état (en particulier les joints), murs creux dont la coulisse présente un drainage défectueux
		Dégradation ou manque d'entretien de la toiture ou des châssis
		Absence de dispositif de ventilation adéquat
	Conditions hygrométriques ambiantes	Absence de cave ou de vide ventilé (fondations capillaires)
		Éléments issus d'interventions antérieures : enduits au ciment, soubassement goudronné, doublages, feuilles métalliques sous les papiers peints, tuyaux d'aération, etc.
		Humidité relative de l'air intérieur élevée
	Condition des matériaux	Forte teneur en humidité des matériaux dans la masse, estimée à l'aide d'un appareil électrique ou mesurée à l'aide d'une bombe à carbure ou par pesées comparatives sur un échantillon prélevé
		Faible teneur en humidité des matériaux dans la masse
		Par temps froid, température de surface inférieure au point de rosée déterminé sur la base de l'humidité relative et de la température de l'air intérieur
	Présence de sels	Présence de sels détectée sur chantier ou après l'analyse d'un échantillon prélevé <i>in situ</i>

(¹) Surtout en cas de traitement récent d'un problème d'humidité ascensionnelle.

(²) Il peut s'agir d'un contournement de la membrane ou de la zone d'injection, ce qui donne lieu à des remontées capillaires dans l'enduit.

(³) Si les remontées capillaires proviennent d'une chape fraîche.

(⁴) Généralement sur une hauteur de 0,5 à 1,5 mètre.

(⁵) Selon des formes géométriques typiques dans les angles, derrière les meubles, au droit des ponts thermiques, etc.

(⁶) Sur des matériaux hygroscopiques : bois, cuir, papier, papier peint, textile, etc.

(⁷) À mesurer de préférence sur une certaine période, afin d'identifier les valeurs critiques.

(⁸) Concerne principalement les matériaux récemment mis en œuvre.

(⁹) La teneur en humidité diminue avec la hauteur par rapport au sol.

(¹⁰) La température et l'humidité relative de l'air intérieur doivent être mesurées de préférence sur une certaine période.

(¹¹) Lorsque l'eau de pluie est contaminée par des matières organiques, les sels peuvent s'infiltrer dans les maçonneries par des gouttières en mauvais état, à travers un grenier, etc.

(¹²) Sels en provenance du sol; la concentration et le type de sels peuvent varier en fonction de la hauteur par rapport au sol.

Risques ou causes potentiels d'humidité					
Humidité de construction	Condensation superficielle	Hygroscopicité des matériaux	Présence de sels dans les matériaux	Infiltrations dues aux pluies	Humidité ascensionnelle
			×		
			×		
×					
×					
	×	×			
					×
×			×		×
×					
	×	×			
	×	×			
		×			
			×		
				×	
	×	×			
×					
×					×
×			×		×
	×		×	×	
				×	
	×				
×	×	×		×	×
×			×	×	×
×			×	×	×
				×	
				×	
	×	×			
			×	×	×
×	×	×			×
×				×	×
	×	×	×		
	×	×			
			×	×	×
×	×	×			×
×				×	×
	×	×	×		
	×	×			
			×	×	×

4

TRAITEMENT DE L'HUMIDITÉ ASCENSIONNELLE ET CONTRÔLE DE L'ASSÈCHEMENT

4.1 INTRODUCTION

Le diagnostic de l'humidité dans les constructions a pour but de déterminer et de localiser toutes les causes d'humidité, afin de définir un ensemble d'interventions adéquates.

Comme mentionné au chapitre précédent (p. 25), on se trouvera souvent confronté à de multiples causes d'humidité. Dans pareil cas, il y a lieu d'envisager un ensemble d'interventions visant à résoudre le problème d'humidité dans sa globalité. Ces interventions peuvent être menées simultanément ou successivement, de manière à pouvoir juger, à chaque étape, de l'évolution de l'assèchement et de la pertinence des traitements complémentaires.

L'humidité ascensionnelle étant l'une des causes d'humidité les plus fréquentes dans les bâtiments anciens, mais aussi l'une des plus gênantes, elle est généralement traitée en priorité. C'est pourquoi ce chapitre se concentre sur les techniques d'intervention susceptibles de remédier à ce phénomène. Le traitement des sels et des autres causes d'humidité sera abordé au chapitre suivant (p. 51).

Il est toutefois primordial de procéder à un diagnostic correct avant toute intervention visant à lutter contre l'humidité ascensionnelle. En effet, de nombreux bâtiments présentent des problèmes d'humidité qui ne sont pas liés à un phénomène de remontées capillaires; son traitement ne doit donc pas constituer un automatisme, mais découler de constatations et de mesures préalables.

Une large gamme de traitements destinés à lutter contre les effets de l'humidité ascensionnelle est disponible sur le marché. Certains de ces traitements ont pour objectif d'éliminer la cause du phénomène en bloquant les remontées capillaires, tandis que d'autres tentent d'en limiter l'ampleur ou les effets néfastes.

Ces procédés seront détaillés dans les prochaines pages et seront classés en fonction de leur principe d'action :

- systèmes de blocage des remontées capillaires
- recouvrement des maçonneries au-dessus du niveau du sol
- autres interventions.

4.2 BLOCAGE DE L'HUMIDITÉ ASCENSIONNELLE

Les interventions de blocage de l'humidité ascensionnelle ont pour objectif d'éliminer les remontées capillaires en introduisant une barrière physique ou physicochimique qui empêche l'eau sous forme liquide de migrer à travers la maçonnerie.

Pour être efficace, la barrière doit être continue et placée de façon à exclure tout contournement. Elle se trouvera donc en tous points à un niveau supérieur à celui des terres et des aménagements extérieurs en contact direct avec la maçonnerie, mais aussi généralement au-dessus du niveau du sol fini intérieur (au niveau des plinthes, par exemple; voir § 4.2.2.1, p. 37). Lorsque les techniques de blocage de l'humidité ascensionnelle ne sont pas appliquées à l'ensemble des murs d'un bâtiment, il y a lieu de prévoir des barrières verticales entre les murs traités et les murs non traités, habituellement sur une hauteur de 1,2 à 1,5 mètre. Ces barrières verticales sont destinées à éviter les transferts d'humidité latéraux et peuvent être réalisées de la même manière que les barrières horizontales.

4.2.1 POSE D'UNE BARRIÈRE D'ÉTANCHÉITÉ PHYSIQUE

De nos jours, la pose d'une membrane d'étanchéité en pied de mur est d'application courante dans les constructions neuves. L'utilisation d'une barrière d'étanchéité physique telle qu'une membrane est également possible pour la rénovation de bâtiments anciens sous certaines conditions. L'intervention consiste à intercaler, dans le mur à traiter et sur toute sa section, un matériau imperméable sous forme de membrane, de plaque, ou encore de mortier hydrophobe (hydraulique ou résineux). La mise en œuvre varie selon le type de matériau utilisé :

- réalisation de saignées horizontales pour le placement de membranes ou de feuilles (semi-)rigides (voir figures 45, 46 et 47, p. 36)
- introduction de plaques rigides au niveau d'un joint à l'aide d'un vérin pneumatique vibrant
- ou forage et colmatage au mortier de deux séries de trous se chevauchant (système comparable aux pieux sécants utilisés pour la construction de murs de soutènement).



Fig. 45 Réalisation d'une saignée horizontale dans la maçonnerie.



Fig. 46 Dégagement de la saignée.



Fig. 47 Insertion d'une membrane semi-rigide, préalablement enduite de mortier, dans la saignée.

La réalisation de saignées horizontales s'effectue en trois phases. D'abord, on pratique des saignées sur un mètre de longueur en laissant un intervalle de deux mètres de maçonnerie intacte entre chaque saignée. On insère ensuite la barrière dans les saignées et on attend que le matériau de colmatage soit suffisamment durci, avant de répéter l'opération à deux reprises sur les parties de maçonnerie laissées intactes précédemment; on obtient ainsi une barrière continue sur toute la longueur de la maçonnerie.

Appliqué dans les règles de l'art, ce type de traitement est d'une efficacité redoutable et peut être considéré comme un système d'assèchement de référence. Sa durabilité est pratiquement égale à la durée de vie du bâtiment.

Pour des raisons pratiques, ce type d'intervention est toutefois très peu utilisé. En effet, le procédé n'est pas applicable aux murs épais, ni aux murs en moellons dépourvus de joint horizontal continu, ni aux maçonneries instables. De plus, toutes les variantes de cette technique requièrent un travail particulièrement intensif, qui se répercute sur les coûts d'intervention. En outre, la pose d'une barrière d'étanchéité physique nécessite en général d'avoir accès aux deux côtés du mur, ce qui exclut souvent les murs mitoyens. Par ailleurs, l'absence de tuyaux, de conduites et de câbles dans le mur constitue une condition indispensable à l'insertion de la barrière. Enfin, le bruit et la poussière liés à cette intervention limitent son application aux seuls bâtiments inoccupés.

4.2.2 INJECTION DE PRODUITS HYDROPHOBES OU DE BOUCHE-PORES

Le terme 'injection' utilisé dans cette NIT désigne les différentes méthodes de mise en place de produits hydrophobes ou de bouche-pores dans les maçonneries, que ce soit par gravité (diffusion), par injection sous moyenne ou basse pression, ou encore par diffusion d'un produit appliqué sous forme de crème dans les trous d'injection.

Ce type de traitement consiste à hydrofuger ou à colmater les pores de la maçonnerie de façon à créer, sur toute la section du mur considéré, une zone s'opposant aux remontées capillaires.

Les bouche-pores, qu'ils soient à base de silicates alcalins, d'acrylamides ou de résines synthétiques, ne sont pratiquement plus utilisés pour ce type d'intervention. Destinés à empêcher les remontées capillaires en bouchant les pores des matériaux, ces produits présentent en effet plusieurs défauts : difficultés de migration dans les matériaux humides, effets secondaires néfastes (taches, efflorescences, etc.) ou performances insuffisantes.

Ils sont désormais remplacés par des produits hydrophobes, qui rendent les matériaux répulsifs à l'eau en réduisant les énergies superficielles des parois de leurs pores. Caractéristique des matériaux de construction poreux (pierre, mortier, brique, blocs de béton, etc.), l'absorption capillaire est en effet due aux énergies superficielles élevées (environ 80 mN/m) des parois des pores de ces matériaux. Ces énergies superficielles élevées se traduisent par l'attraction des molécules d'eau, lesquelles peuvent dès lors monter jusqu'à une certaine hauteur dans le réseau poreux, et ce, en dépit de la force gravitationnelle (voir § 2.1.4, p. 14). En limitant ces énergies superficielles, les produits hydrophobes inversent la tendance, puisqu'ils rendent les pores des matériaux répulsifs à l'eau. Ces produits ne visent donc pas à boucher les pores, mais bien à modifier les propriétés des parois de ces derniers.

Plus de quarante années d'expérience de chantier ainsi que de nombreuses recherches menées au CSTC et à l'étranger ont démontré que les traitements par injection de produits hydrophobes permettent d'atteindre des résultats d'assèchement comparables à ceux obtenus grâce à la pose d'une membrane d'étanchéité. Les traitements par injection se distinguent en outre par leur polyvalence ainsi que par leur mise en œuvre facile et rapide.

L'expérience de chantier et les recherches ont par ailleurs souligné l'importance du choix du produit hydrophobe. L'efficacité des produits dépend en réalité du type de matière active utilisé ainsi que de leur formulation (phase aqueuse, phase solvant, crème ou gel). Il va de soi que l'efficacité d'un traitement par injection est également influencée par la qualité du diagnostic, par sa mise en œuvre et par les possibilités d'assèchement de la maçonnerie.

4.2.2.1 Choix du niveau d'injection

En règle générale, le niveau d'injection horizontal se trouve au-dessus et le plus près possible du plus élevé des deux niveaux suivants (voir figure 48) :

- le niveau supérieur des terres ou aménagements (terrasse, par exemple) extérieurs en contact direct avec la maçonnerie
- le niveau du sol fini intérieur (rez-de-chaussée ou cave).

Dans certains cas, les murs (partiellement) enterrés peuvent être protégés contre l'humidité ascensionnelle par l'injection d'une barrière horizontale combinée à un système d'étanchéité vertical. Une telle solution n'est toutefois envisageable que si les problèmes d'humidité sont liés à des phénomènes de transport purement capillaires, et non s'ils sont dus à des pénétrations d'eau en provenance d'une nappe phréatique située à un niveau supérieur à celui du sol

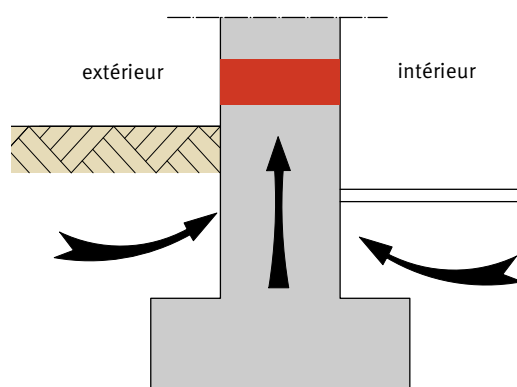


Fig. 48 Niveau d'injection horizontal situé au-dessus du niveau supérieur des terres extérieures en contact direct avec la maçonnerie et du niveau du sol fini intérieur.

du local enterré ou à des infiltrations résultant de l'accumulation d'eau de surface le long des parois [P1].

Dans les murs enterrés séparés des terres environnantes par une barrière d'étanchéité verticale placée du côté extérieur, l'injection peut avoir lieu dans la partie basse des murs (voir figure 49). La présence d'une barrière d'étanchéité verticale empêche en effet le transport d'humidité en direction horizontale depuis le sol vers la maçonnerie. Les terres en contact direct avec la maçonnerie se trouvent par conséquent dans la partie basse du mur. Notons qu'il est nécessaire de réaliser l'injection dans la partie basse des murs uniquement si les fondations sont composées de matériaux capillaires.

Dans les murs semi-enterrés dépourvus de barrière d'étanchéité verticale les séparant des terres environnantes du côté extérieur, l'injection doit impérativement s'effectuer au-dessus du niveau des terres extérieures (voir figure 50). Le niveau d'injection se situe alors dans la partie haute des

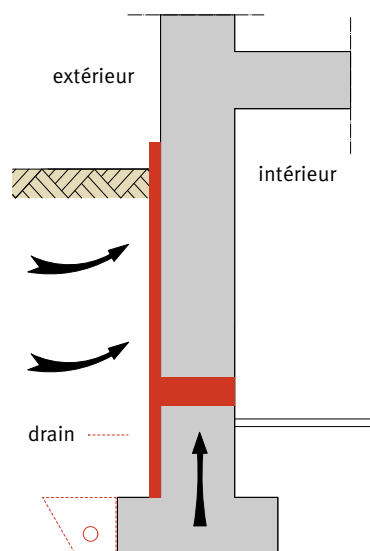


Fig. 49 Mur enterré séparé des terres extérieures par une barrière d'étanchéité verticale. Le niveau d'injection peut se situer en pied de mur, au-dessus du niveau du sol de la cave et du niveau inférieur de la barrière d'étanchéité verticale (nécessaire uniquement en présence de fondations capillaires).

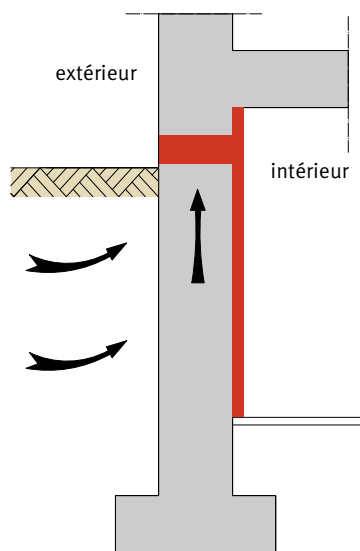


Fig. 50 Mur semi-enterré dépourvu de barrière d'étanchéité verticale le séparant des terres environnantes. Le niveau d'injection doit impérativement être situé au-dessus du niveau des terres extérieures.

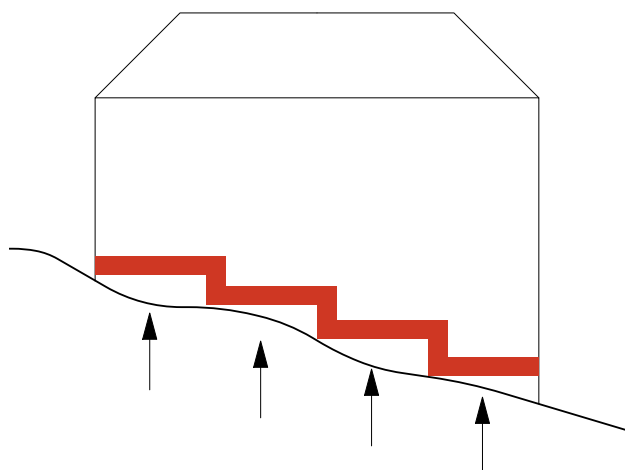


Fig. 51 Niveaux d'injection dans un bâtiment situé sur un terrain en pente : les différents niveaux d'injection horizontaux sont reliés par des rangées d'injections verticales afin d'obtenir une barrière continue.

murs du local partiellement enterré ou, si cela s'avère impossible, au-dessus du niveau du sol du rez-de-chaussée. Dans ce cas, on peut prévoir une protection verticale résistante à l'humidité et aux sels sur la face intérieure des murs enterrés, afin de protéger les finitions intérieures à cet endroit [P1].

Lorsque la configuration du terrain et du bâtiment l'exige, on peut utiliser plusieurs niveaux d'injection horizontaux dans différentes parties du bâtiment. Ces niveaux d'injection doivent être reliés par des injections verticales, afin d'assurer la continuité de la barrière (voir figure 51). Aux endroits où la maçonnerie à injecter est en contact avec des éléments non traités (construction mitoyenne, mur de jardin, escalier ou cheminée, par exemple), des injections verticales empêchant le contournement de la barrière doivent également être prévues, généralement sur une hauteur de 1,2 à 1,5 mètre (voir figure 52).

4.2.2.2 Produits hydrophobes : matières actives

■ Siliconates

Les méthyles ou propyles siliconates de potassium ou de sodium en phase aqueuse ont besoin de dioxyde de carbone (CO_2) pour réagir et former une résine silicone hydro-

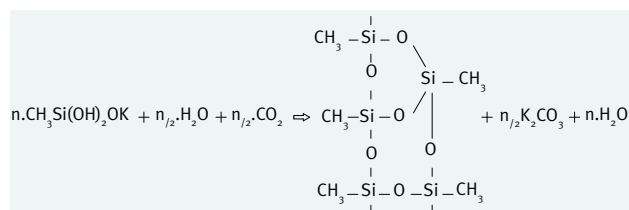


Fig. 53 Réaction de méthylsiliconate de potassium [C11].

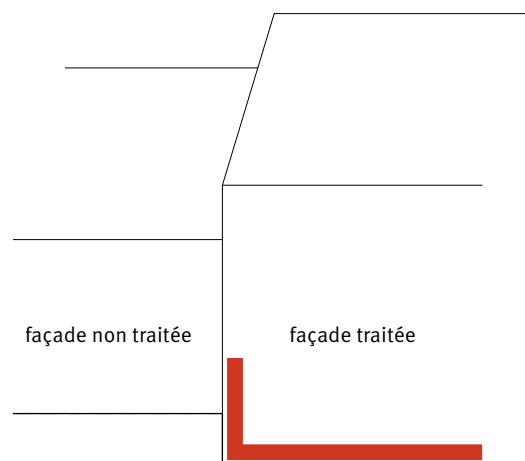


Fig. 52 Rangée d'injections verticales réalisée au droit d'un bâtiment mitoyen et destinée à éviter les transferts d'humidité depuis la façade non traitée vers la façade traitée.

phobe (voir figure 53). Lorsque le produit est injecté dans des murs très épais, la quantité limitée de CO_2 peut ainsi compromettre l'efficacité du traitement.

Cette réaction s'accompagne en outre de la formation de sels (carbonates de soude ou de potasse) pouvant s'opposer à l'assèchement du mur et éventuellement entraîner une dégradation des matériaux (voir § 2.1.6, p. 15).

De manière générale, l'expérience de chantier montre que l'efficacité de ce type de produits est restreinte dans les murs présentant une teneur en humidité ou en sels élevée. En Belgique, ces produits ne sont donc pratiquement plus utilisés par les professionnels.

■ Copolymères fluorés

D'apparition plus récente, les produits à base de copolymères fluorés permettent d'atteindre des tensions superficielles extrêmement basses et ont non seulement un effet hydrophobe, mais aussi un effet oléophobe (répulsif aux produits huileux).

Ces produits sont peu utilisés dans les bâtiments, notamment en raison du coût élevé des résines de base.

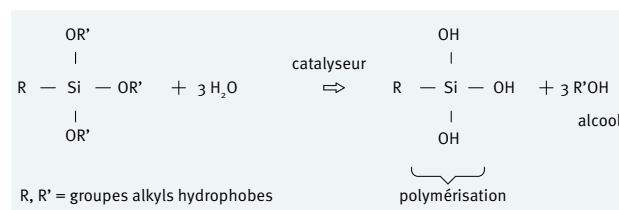


Fig. 54 Réaction d'hydrolyse des silicones monomères (silanes) [C11].

■ Silicones

Parmi les produits portant l'appellation commerciale 'silicones', on retrouve :

- les silicones monomères ou silanes, en phase solvant ou en phase aqueuse (émulsion ou micro-émulsion)
- les silicones oligomères ou siloxanes, en phase solvant ou en phase aqueuse (émulsion ou micro-émulsion)
- les silicones polymères ou résines silicones, en phase solvant.

Dans le commerce, les silicones monomères sont désignés sous le nom de 'silanes'. Il s'agit de 'molécules organosiliciques' monomères de très petites dimensions qui, après injection, s'hydrolysent et polymérisent pour former un polymère silicone. L'avantage des silanes réside dans leur pouvoir de pénétration dans les matériaux à pores extrêmement fins. Par contre, le fait qu'ils polymérisent dans le support constitue leur principal inconvénient. En effet, cette polymérisation peut entraîner une perte de matière active de 60 à 80 %, due au caractère volatil du produit et surtout à la formation d'alcool en cours de réaction. De plus, son déroulement optimal nécessite des conditions particulières (présence de catalyseurs adaptés à la nature du support). Cette réaction est représentée schématiquement à la figure 54 (p. 38).

Du point de vue de leur composition, les siloxanes se situent entre les silicones monomères et les silicones polymères. Ces produits sont constitués de molécules faiblement polymérisées qui réagissent après injection pour former une résine silicone (polymère). Les pertes de matière active liées à cette réaction sont toutefois relativement faibles (20 à 30 %). De plus, la polymérisation des siloxanes est nettement moins délicate et est peu affectée par la nature du support.

Les silicones polymères sont des composés semblables aux silanes et aux siloxanes, à la différence qu'ils s'appliquent sous une forme complètement polymérisée. L'action hydrofuge est obtenue après évaporation du solvant, par le dépôt de molécules organiques à groupements hydrophobes (méthyle, butyle, pentyle, etc.). Un exemple de formulation de ce produit est représenté de façon schématique à la figure 55.

De nombreuses recherches ainsi que l'expérience de chantier ont mis en évidence les caractéristiques particulièrement favorables des produits à bases de silanes ou de siloxanes.

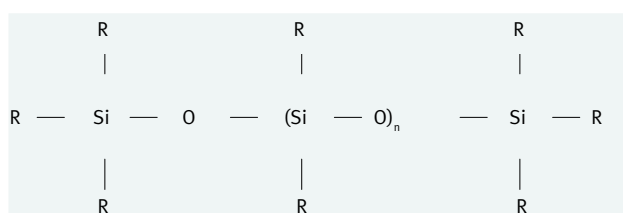


Fig. 55 Exemple de formulation d'une résine silicone [C11].

Bien que globalement performants, ces produits montrent tout de même des degrés d'efficacité divers en fonction de leur formulation et notamment de leur mode de commercialisation : en phase solvant (*white-spirit*, isoparaffinique, etc.), en phase aqueuse (émulsion ou micro-émulsion), ou encore sous forme de crème ou de gel (voir § 4.2.2.3). L'expérience révèle en outre que si les joints de mortier contiennent des matières organiques (telles que des cendres), l'efficacité de ce type de produits n'est pas garantie.

4.2.2.3 Produits hydrophobes : formulations

Les différentes matières actives décrites au paragraphe précédent peuvent être utilisées sous forme liquide en phase solvant ou en phase aqueuse, ou sous forme de gel ou de crème. Le choix de la formulation aura une influence sur l'efficacité du traitement, sur les émissions de composés organiques volatils (COV) lors de l'injection et sur le possible développement de moisissures ou de micro-organismes au sein de la maçonnerie après l'injection. En ce qui concerne les émissions de COV, aucune réglementation en vigueur ne s'applique aux produits d'injection contre l'humidité ascensionnelle, même si la tendance actuelle est à la réduction de ces émissions pour des raisons sanitaires et environnementales. Il paraît donc logique de chercher à limiter le plus possible les émissions de COV lorsqu'on choisit des produits et leur formulation, en prévision d'une éventuelle réglementation à venir.

■ Produits liquides en phase solvant

Utilisés depuis plus de quarante ans, les produits hydrophobes liquides en phase solvant de type '*white-spirit*', en particulier ceux à base de silanes ou de siloxanes (concentration en matière active de 5 à 10 % environ), se caractérisent par une efficacité et une durabilité éprouvées. Ils provoquent néanmoins d'importants désagréments olfactifs, les quantités de produit injectées dans un bâtiment s'élevant à plusieurs dizaines de litres. De même, les COV émis par ces produits ont un impact néfaste sur la qualité de l'air intérieur et sont donc potentiellement dangereux pour la santé des habitants. Ces différents inconvénients sont d'autant plus gênants lorsque le bâtiment est occupé. Depuis une vingtaine d'années, les solvants *white-spirit* 'classiques' sont ainsi remplacés progressivement par des solvants isoparaffiniques qui dégagent moins d'odeurs.

Dans de très rares cas, l'application de produits en phase solvant peut donner naissance à des odeurs prononcées et persistantes, généralement accompagnées d'un développement de moisissures. Il semble que ces problèmes aient différentes origines : utilisation de solvants relativement lourds, exécution d'injections en période hivernale (réticence à ventiler le bâtiment de façon intensive à cette période), existence de points chauds localisés (éléments de chauffage électrique, plaques de cuisson, feu ouvert, etc.) et absence de système de ventilation permanente.

Tableau 9 Récapitulatif des produits d'injection susceptibles d'être mis en œuvre dans les maçonneries.

Famille	Matière active	Formulation	Efficacité	Remarques
Bouche-pores	Silicates alcalins, gels acrylamides et résines synthétiques	–	Faible	- Difficultés de migration et performances insuffisantes - Effets secondaires néfastes
Produits hydrophobes	Siliconates	–	Faible	- Réaction nécessitant la présence de CO₂ - Formation de sels indésirables
	Copolymères fluorés	–	Bonne	- Effet hydrophobe et oléophobe - Coût élevé
	Silanes, siloxanes et silicones	Liquide, phase solvant	Très bonne	- Gêne olfactive (odeurs persistantes dans de très rares cas) et émissions de COV importantes - Ventilation intensive indispensable (*) - À éviter dans les bâtiments occupés si possible
		Liquide, phase aqueuse	Bonne	- Potentiel de migration moindre dans les matériaux très humides - Gêne olfactive et émissions de COV très limitées
		Gel ou crème, phase solvant	Bonne	- Intéressant pour les matériaux très compacts ou, au contraire, fortement hétérogènes et caverneux - Potentiel de migration moindre dans les matériaux très humides - Gêne olfactive et émissions de COV moindres, en raison des quantités de solvant injectées plus faibles
		Gel ou crème, phase aqueuse	Bonne	- Intéressant pour les matériaux très compacts ou, au contraire, fortement hétérogènes et caverneux - Potentiel de migration moindre dans les matériaux très humides - Gêne olfactive et émissions de COV très limitées

(*) Lorsqu'un traitement de blocage de l'humidité ascensionnelle est mis en œuvre, une ventilation suffisante des locaux est toujours nécessaire, afin de permettre l'assèchement des murs.

Après l'injection de produits en phase solvant, il est impératif de bien ventiler les locaux, afin de favoriser l'assèchement et de limiter la dégradation de la qualité de l'air intérieur. L'utilisation de ce type de produit est déconseillée dans un bâtiment occupé, a fortiori si l'injection a lieu en hiver (même remarque que ci-dessus), si les occupants sont sensibles aux solvants (enfants en bas âge, personnes allergiques, femmes enceintes, etc.) et si le bâtiment comporte des points chauds (chauffage électrique, cuisinière, feu ouvert, etc.). Dans ces cas, on recommande plutôt des produits en phase aqueuse sous forme liquide ou des produits sous forme de gel ou de crème.

■ Produits liquides en phase aqueuse

Les produits liquides en phase aqueuse sont en majorité des émulsions ou des micro-émulsions de silanes ou de siloxanes. Plus récents que les produits liquides en phase solvant, ils affichent un bilan écologique nettement plus favorable : des mesures en laboratoire ont récemment révélé que leurs émissions de COV sont mille fois inférieures à celles des équivalents dilués dans du *white-spirit* [C15].

Cependant, le potentiel de migration de ces produits dans des supports (très) humides est plus faible, en raison des dimensions des particules contenues dans l'émulsion. Ces

particules sont en effet plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de fois plus grandes que les molécules de silanes ou de siloxanes diluées dans un solvant. Bien qu'ils soient utilisés depuis plusieurs années, certains de ces produits sont toujours en cours de développement, afin d'optimiser leurs performances.

■ Crèmes ou gels

Également à base de silanes ou de siloxanes en phase solvant ou aqueuse, les produits sous forme de gel ou de crème sont apparus il y a peu sur le marché. Même s'ils sont onéreux, ces produits renferment des concentrations en matières actives importantes (40 à 80 %), ce qui limite les quantités à mettre en œuvre. De plus, ils ne dégagent pratiquement pas d'odeur et des mesures en laboratoire ont montré récemment que leurs émissions de COV sont négligeables. En ce qui concerne les crèmes et les gels en phase solvant, cette réduction des odeurs et des émissions est liée à la nature des solvants employés et au fait que les quantités de produits injectées sont largement inférieures à celles injectées sous forme liquide [C15].

Les crèmes et les gels se prêtent particulièrement bien à l'injection de maçonneries extrêmement compactes ou, au contraire, fortement hétérogènes et cavernueuses. Dans le

premier cas, l'application d'une quantité de crème très concentrée à l'intérieur des trous d'injection accélère la mise en œuvre, tout en laissant au produit le temps de migrer dans la maçonnerie environnante. Dans le second cas, la viscosité du produit limite la diffusion incontrôlée dans les fissures et les cavités, puisque celui-ci a tendance à se maintenir dans le trou de forage et à diffuser depuis cet endroit vers la maçonnerie environnante.

Tout comme les produits liquides en phase aqueuse, les crèmes et les gels ont par ailleurs tendance à migrer moins bien dans des supports (très) humides. Les essais réalisés sur certains produits donnent cependant des résultats très positifs, d'où l'importance de se référer aux rapports d'essais basés sur la procédure décrite au paragraphe 4.2.2.5 lorsqu'on choisit un produit.

4.2.2.4 Choix du produit d'injection

Le tableau 9 (p. 40) reprend les différents types de produits d'injection mentionnés ci-avant et propose une évaluation globale de leur efficacité potentielle, accompagnée de quelques remarques à prendre en compte lors du choix du produit. Ces informations sont données à titre purement indicatif : le choix définitif d'un produit reposera de préférence sur un rapport d'essai basé sur la procédure décrite au paragraphe 4.2.2.5.

4.2.2.5 Procédure d'évaluation globale des produits d'injection

Comme signalé précédemment, les traitements par injection de produits hydrophobes, et en particulier de formulations à base de silanes ou de siloxanes, sont d'une efficacité remarquable. Leur polyvalence ainsi que leur facilité et leur rapidité de mise en œuvre ont en outre incité la majorité des entreprises spécialisées en Belgique à opter pour ce type d'intervention contre l'humidité ascensionnelle.

Il reste néanmoins à sélectionner les produits commerciaux les plus adaptés. Étant donné le peu d'informations comparatives fournies par les fabricants et les distributeurs, mais aussi les lacunes des procédures existantes au niveau européen, les laboratoires du CSTC ont développé une procédure d'évaluation de l'efficacité et du potentiel de migration des produits d'injection hydrophobes. Cette procédure et les rapports d'essais qui en découlent constituent une aide précieuse pour le choix d'un produit d'injection, car ils permettent de comparer le comportement de différents produits dans un milieu poreux et humide.

Mesure de l'efficacité et du potentiel de migration

La procédure permettant de mesurer l'efficacité et le potentiel de migration des produits d'injection hydrophobes développée par le CSTC, en collaboration avec l'IRPA (?) et le Certech (®) notamment, a reçu l'aval de l'Union belge pour l'agrément technique dans la construction (UBAtc). Elle sert actuellement de base à l'obtention d'un agrément technique (ATG).

L'efficacité hydrophobe et le potentiel de migration des produits d'injection sont testés sur des éprouvettes en matériau silicocalcaire. Ce matériau présente en effet des caractéristiques relativement constantes et une structure porométrique similaire à celle d'un mortier de construction. Dans une maçonnerie, les mouvements d'humidité capillaire ont généralement lieu à travers le mortier; c'est pourquoi celui-ci doit être traité en priorité lors des opérations de blocage des remontées capillaires.

Les éprouvettes testées sont immergées dans une solution saline pour obtenir différents taux d'humidité d'en moyenne 5,2, 7,8 et 10,4 % en masse (valeurs correspondant respectivement à 40, 60 et 80 % du taux de saturation après absorption capillaire pendant 24 heures). La teneur en humidité et la teneur en sels influencent non seulement la réaction des produits, mais aussi leur migration à travers les pores du matériau.

Tableau 10 Classement des produits d'injection contre l'humidité sur la base de la procédure du CSTC (depuis janvier 2013).

Classe	Efficacité obtenue selon la procédure du CSTC (*)	Migration	Évaluation
A+	≥ 60 %	≥ 25 %	Hautement efficace
A	≥ 40 % et < 60 %		Très efficace
B	≥ 20 % et < 40 %		Efficace
C	< 20 %	< 25 %	Ne remplit pas les conditions

(*) Les essais étant effectués sur la base de quantités de produit inférieures à celles utilisées sur chantier, un produit présentant une efficacité de 60 % à l'essai est considéré comme hautement efficace.

(?) Institut royal du patrimoine artistique.

(®) Centre de ressources technologiques en chimie.

Une fois les éprouvettes conditionnées, le produit est introduit dans un trou foré en leur centre. La quantité de produit est inférieure, mais proportionnelle à celle recommandée par le fabricant pour une application *in situ*.

La mesure de l'efficacité des produits consiste à comparer la capacité d'absorption initiale des éprouvettes non traitées trempées dans l'eau à celle des éprouvettes traitées. En guise de contrôle, on évalue le potentiel de migration des produits en analysant des images de la tranche des éprouvettes coupées en deux.

Pour de plus amples détails concernant cette procédure, nous renvoyons le lecteur à l'Annexe présentée en p. 55.

En fonction des résultats obtenus après les essais d'efficacité et de migration, les produits sont classés selon les critères mentionnés dans le tableau 10 (p. 41). Ce classement est répété pour les différents teneurs en humidité initiales des éprouvettes, ce qui donne un score de trois lettres pour chaque produit.

Cette procédure vise à caractériser les produits de façon normalisée. Dans certains cas, les conditions de chantier sont telles qu'un produit moins bien classé à l'issue de la procédure offre néanmoins des résultats plus satisfaisants dans la pratique et inversement.

Bien que les résultats des essais donnent une indication objective de l'efficacité potentielle des produits d'injection, le choix du produit sera influencé par d'autres paramètres dans une situation concrète. Ainsi, on conseille d'éviter l'injection de produits en phase solvant dans un bâtiment occupé (surtout en présence d'enfants en bas âge ou d'autres personnes sensibles). D'autre part, lorsque la maçonnerie à injecter est très hétérogène, on recommande un produit sous forme de gel ou de crème, afin de limiter les pertes. Par ailleurs, les résultats d'essais réalisés récemment sur plus d'une trentaine de produits à l'aide de cette procédure confirment les tendances décrites dans les paragraphes précédents : les produits liquides en phase solvant sont à l'heure actuelle les plus efficaces, tandis que les produits commercialisés en phase aqueuse ou sous forme de gel ou de crème présentent en général une efficacité tout à fait acceptable, même si celle-ci diminue lorsque la teneur en humidité initiale du support augmente.

Le lecteur trouvera en annexe (voir § A4, p. 58) une aide à l'interprétation de rapports d'essais ou d'agréments techniques basés sur la procédure décrite ci-avant.

Si les produits liquides en phase solvant sont actuellement les plus performants en termes d'efficacité et de migration, les produits liquides en phase aqueuse et les produits sous forme de gel ou de crème affichent, quant à eux, un bilan écologique plus favorable (faibles émissions de COV, notamment) et comportent un risque de dégagement d'odeurs (liées ou non au développement de moisissures) après injection moindre. En collaboration avec le Certech, le CSTC

a développé des procédures d'évaluation de ces critères secondaires, à savoir les émissions de COV et la sensibilité des produits aux développements biologiques. Ces procédures sont décrites brièvement en annexe (voir § A6, p. 58).

4.2.2.6 Mise en œuvre des produits

■ Préparation de la maçonnerie avant injection

Afin de favoriser au maximum l'assèchement de la maçonnerie, les finitions existantes sont décapées sur toute la hauteur concernée par l'humidité ascensionnelle et jusqu'à 40 à 50 cm au-dessus de cette zone. Une variante de cette méthode consiste à décaper les finitions uniquement jusqu'au niveau d'injection choisi, afin de pouvoir dégager un joint de mortier horizontal, et à décaper ensuite les finitions sur la zone concernée par l'humidité après assèchement de la maçonnerie. Ainsi, bien que le séchage soit ralenti, les sels qui migrent vers la surface des finitions lors de l'assèchement sont partiellement éliminés en même temps que les finitions contaminées. Dans tous les cas, il convient de contrôler la présence de sels résiduels dans la maçonnerie après séchage, afin de déterminer si une protection complémentaire est nécessaire avant la réfection des finitions (voir § 5.1, p. 51).

Lorsqu'on utilise un produit liquide et que les joints sont en mauvais état, la maçonnerie est rejointoyée, de manière à éviter les pertes de produit.

En règle générale, une rangée de trous est forée par l'intérieur ou par l'extérieur, de préférence dans un joint de mortier suivant un alignement parallèle au sol, et ce, jusqu'à maximum 50 mm de la surface opposée (20 mm pour les crèmes et les gels) ou conformément aux instructions du fabricant. Les joints de mortier doivent être traités en priorité, car ils forment, au sein de la maçonnerie, un réseau continu à travers lequel l'eau migre par capillarité. Afin d'augmenter les surfaces de transfert, les forages peuvent être réalisés en oblique, tant latéralement que vers le bas.



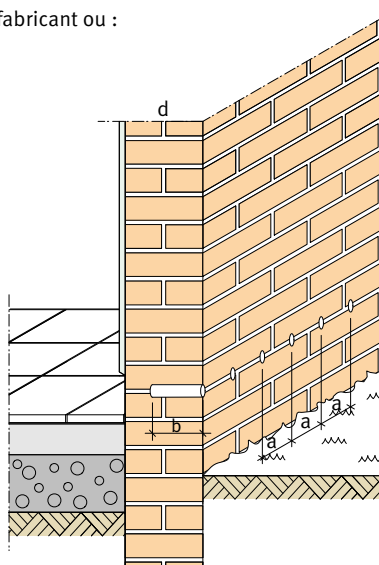
Fig. 56 Injection d'un produit hydrophobe sous forme de crème ou de gel.

Selon les instructions du fabricant ou :

$a = 80$ à 120 mm

$b = d - (50 \text{ ou } 20 \text{ mm})$

$d =$ épaisseur du mur



P = manomètre

D = débitmètre

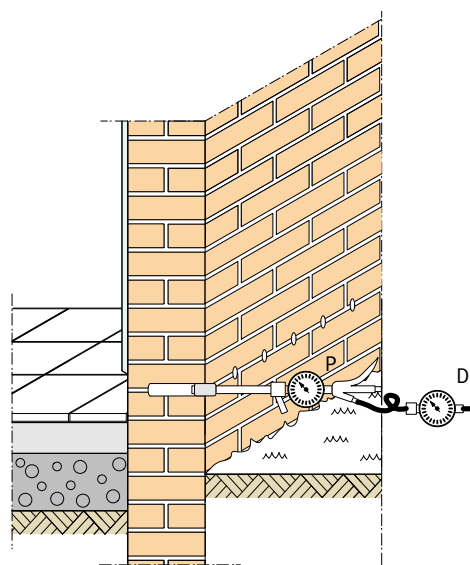


Fig. 57 Disposition des forages dans la maçonnerie et injection d'un produit à basse pression.

Cette configuration risque néanmoins de compliquer la migration du produit vers les joints de mortier. Si les trous sont forés en oblique vers le bas, leur niveau inférieur ne doit jamais se situer sous le niveau du sol ou des terres extérieures (voir § 4.2.2.1, p. 37).

Si l'on injecte un produit liquide, le diamètre des trous importe peu : il variera aux alentours de 12 mm, en fonction de l'appareillage employé. Dans le cas d'un produit sous forme de crème ou de gel, le diamètre des trous définit la quantité de produit pouvant être injectée en un seul passage. La fiche technique du produit indique généralement le diamètre à privilégier (au minimum 12 mm).

La distance entre les trous varie entre 80 et 120 mm environ, selon la composition et l'état de la maçonnerie et des produits injectés. Pour les gels, les crèmes et les produits liquides en phase aqueuse, on rapprochera légèrement les trous, dans le but de compenser leur potentiel de migration plus restreint.

Une fois forés, les trous sont nettoyés à l'aide d'air comprimé, afin d'éliminer les poussières.

■ Injection du produit

La mise en œuvre des produits peut être réalisée selon différentes méthodes, dont les plus courantes sont :

- **l'injection de produit sous forme liquide à basse pression** (voir figure 56, p. 42, et figure 57) : le produit est injecté à basse pression dans les trous de forage. La pression appliquée ne sert en aucun cas à faire pénétrer le produit de force dans les pores de la maçonnerie, les pressions nécessaires à cet effet étant bien trop élevées. Il s'agit uniquement d'accélérer la migration du produit dans les

fissures et les cavités naturellement présentes dans la maçonnerie; le produit migrera vers les pores avoisinants au fil du temps. La pression exercée varie en fonction de la compacité des matériaux et des produits mis en œuvre. Elle se situe d'ordinaire entre 0,05 et 0,2 MPa, les valeurs supérieures à 0,2 MPa étant réservées aux maçonneries très compactes et homogènes. S'il s'avère impossible d'atteindre ces niveaux de pression lors de l'injection, le produit s'écoule probablement par une cavité ou une fissure à l'intérieur de la maçonnerie ou par un trou d'injection recoupant le trou utilisé. Dans ce cas, il convient de vérifier la configuration des trous forés et d'envisager l'emploi de produits sous forme de gel ou de crème, voire une injection multiphase (voir § 4.2.2.7, p. 45)

- **l'injection de produit sous forme de crème ou de gel** : le principe est similaire à celui de la méthode précédente, à la différence que les produits sous forme de gel ou de crème ont tendance à se maintenir plus longtemps dans le trou d'injection sans s'écouler par les fissures et les crevasses. Cette caractéristique peut constituer un avantage dans une maçonnerie très hétérogène. L'application de produits sous forme de crème ou de gel peut également être envisagée dans des maçonneries très compactes et homogènes. Dans ce cas, on remplit les trous de forage d'une quantité de produit suffisante, puis on laisse le produit migrer lentement par diffusion dans le matériau.

Même si elles sont moins utilisées par les professionnels de nos jours, d'autres variantes se rencontrent encore de temps en temps. Il s'agit notamment de :

- **l'injection par gravité** à l'aide de récipients d'attente fixés dans les trous de forage, éventuellement avec un système de goutte-à-goutte interposé. Il convient, comme toujours, de choisir un produit dont l'efficacité a été démontrée

- l'insertion de cylindres de produit hydrofuge en phase aqueuse congelés dans les trous de forage : ces trous doivent avoir un diamètre suffisant, afin qu'on puisse y introduire les quantités de produit nécessaires en trois ou quatre passages successifs. Ce diamètre peut atteindre 24 mm, ce qui implique des dégâts importants pour la maçonnerie. La méthode prend en outre du temps, car elle requiert plusieurs passages successifs avec un délai d'attente intermédiaire, et les cylindres en attente doivent rester congelés. Il importe d'être attentif au type de produit utilisé, puisqu'il s'agit souvent de produits à base de siliconates, dont l'efficacité est aléatoire (voir tableau 9, p. 40).

Quelle que soit la méthode employée, il est primordial de prévoir une ventilation efficace des locaux lors de la mise en œuvre des produits et pendant encore quelque temps ensuite.

■ Quantité de produit à mettre en œuvre

La quantité de produit à mettre en œuvre est déterminée soit sur la base des instructions du fabricant soit, pour les produits liquides et en l'absence de données, selon la formule suivante :

$$Q_{\text{tot}} = L \times d \times c$$

où :

Q_{tot} = la quantité totale de produit à injecter [l]

L = la longueur des murs [m]

d = l'épaisseur des murs [m]

c = le coefficient c [-].

Le coefficient 'c' varie entre 10 et 20 selon l'homogénéité des murs (10 pour les maçonneries homogènes, 15 dans la majorité des cas et 20 pour les murs fissurés ou caverneux). Cette quantité totale à mettre en œuvre doit être répartie de façon aussi homogène que possible. Pour ce faire, les quantités injectées dans chaque trou peuvent être vérifiées au moyen d'un débitmètre, par exemple.

■ Remise en état de la maçonnerie

Après l'injection, les trous sont rebouchés à l'aide d'un mortier hydrophobe à prise rapide, par exemple. Lorsqu'on utilise un produit sous forme de crème ou de gel, seuls les

premiers millimètres du trou sont rebouchés, le reste du trou étant encore rempli de produit. Les éventuelles taches de produit autour des trous sont éliminées au moyen d'un chiffon imbibé de solvant ou d'eau chaude savonneuse, selon la nature du produit utilisé.

■ Délai d'assèchement

Afin de réduire autant que possible le délai d'assèchement des murs, il est indispensable de prévoir une ventilation suffisante des locaux ainsi qu'un chauffage de base, et ce, quel que soit le type de produit mis en œuvre.

Comme mentionné au paragraphe 2.1.6 (p. 15), un mur de 40 cm d'épaisseur affecté par l'humidité ascensionnelle sur une hauteur d'un mètre contient plusieurs dizaines de litres d'eau par mètre linéaire. Dans des conditions d'évaporation favorables, il faudra plusieurs mois, voire un an pour que cette humidité s'évapore jusqu'à atteindre un équilibre avec les conditions ambiantes. Dans des conditions défavorables (murs très épais, peu de ventilation ou de chauffage, comme c'est le cas dans les vieilles églises, par exemple), l'assèchement peut durer plusieurs années.

Lors de l'assèchement, une partie des sels accumulés dans la maçonnerie après des années de remontées capillaires migrent vers la surface, où ils occasionnent des dégâts aux finitions par leur cristallisation ou par leur action hygroscopique. Il est donc impératif de respecter un délai suffisant entre l'injection du produit et la pose des nouvelles finitions, dans le but d'éviter que ces dernières ne soient contaminées par l'humidité et les sels résiduels.

■ Remise en état de la finition

Une fois les maçonneries asséchées, les anciennes finitions qui n'ont pas été éliminées dès le début de l'intervention sont découpées sur toute la hauteur touchée par l'humidité ascensionnelle et jusqu'à environ 40 à 50 cm au-dessus de cette zone.

Les nouvelles finitions appliquées après l'assèchement complet de la maçonnerie s'arrêteront impérativement au-dessus du niveau d'injection, afin d'empêcher tout

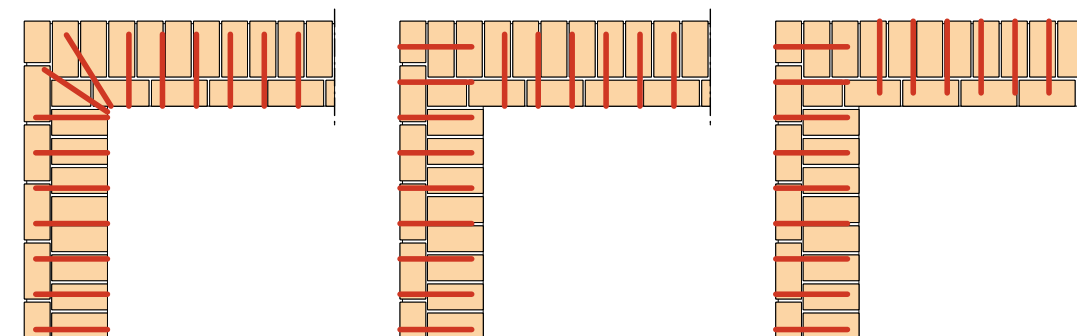


Fig. 58 Exemples de positionnement des trous d'injection dans un angle (vue en coupe) [V3].

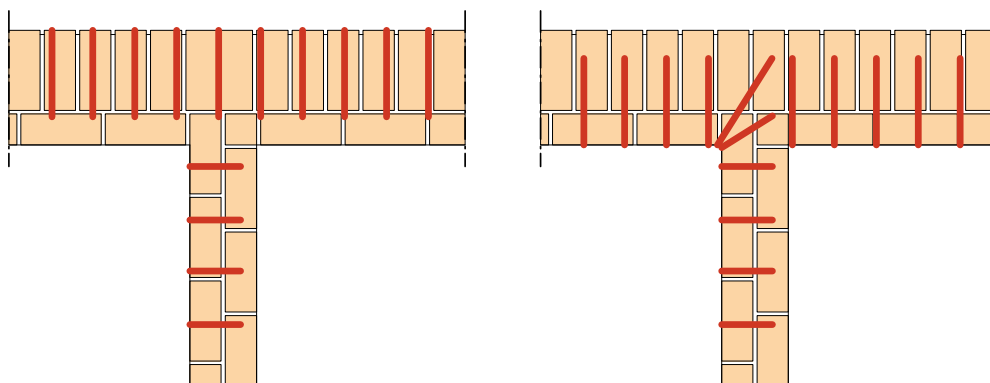


Fig. 59 Exemples de positionnement des trous d'injection à la jonction entre un mur extérieur et un mur de refend (vue en coupe) [V3].

contournement de la barrière anticapillaire par le biais des enduits intérieurs poreux (voir § 2.2.6, p. 21). De même, on évitera de remplir les encoches verticales (passage de tuyaux ou de câbles) de mortier ou d'enduit non hydrophobe, dans le but d'empêcher le contournement de la zone d'injection. Les plinthes sont ensuite posées à sec ou à l'aide d'un mortier hydrofuge (voir NIT n° 199 [C8] et [W1]).

Lorsque le délai d'assèchement ne peut être respecté, les nouvelles finitions peuvent soit être mises en œuvre par-dessus un support adapté (membrane à excroissances, par exemple; voir § 4.3.1, p. 46), à condition que le séchage puisse se faire par la face opposée de la maçonnerie, soit être réalisées au moyen d'un matériau ne bloquant pas l'évaporation (enduit d'assainissement, par exemple; voir § 4.3.2, p. 47). De plus, des interventions complémentaires s'avèrent parfois nécessaires lorsque la présence de sels empêche l'assèchement complet des murs (voir § 5.1, p. 51).

4.2.2.7 Mise en œuvre des produits : cas particuliers

■ Angles et jonctions

Lors de l'injection, il y a lieu d'accorder une attention particulière aux angles et aux jonctions entre différents éléments de maçonnerie. En effet, le risque de ne pas injecter toute la section de la maçonnerie est important à ces endroits et des problèmes d'humidité ascensionnelle locaux pourraient donc persister. Les figures 58 (p. 44) à 60 représentent différentes possibilités de positionnement des trous d'injection

dans les angles, à la jonction des murs et dans le cas particulier d'une colonne en maçonnerie.

Dans les angles et au droit des jonctions, il est important d'éviter que les trous d'injection ne se recoupent entre eux, sans quoi le produit injecté dans un trou pourrait s'échapper par un autre trou, comme illustré à la figure 61 ci-dessous. Cette remarque vaut particulièrement pour les produits en phase liquide. Les produits sous forme de gel ou de crème ont tendance à se maintenir à l'endroit où ils ont été injectés.

■ Barrières verticales

Lorsque les interventions de blocage de l'humidité ascensionnelle dans un bâtiment ne sont pas appliquées à l'ensemble des murs concernés par ce phénomène, il y a lieu de prévoir des barrières verticales entre les parties traitées et les parties non traitées, en général sur une hauteur de 1,2 à 1,5 mètre. Ces barrières doivent être installées, entre autres, au droit des murs des bâtiments voisins, le long des cheminées et le long des murs de refend non traités.

Si, dans un même bâtiment, les injections ne sont pas toutes effectuées au même niveau horizontal (terrain en pente, par exemple), les différents niveaux d'injection doivent en outre être reliés par des barrières verticales. Ces barrières sont destinées à éviter les transferts d'humidité latéraux et peuvent être réalisées de la même manière que les barrières horizontales.

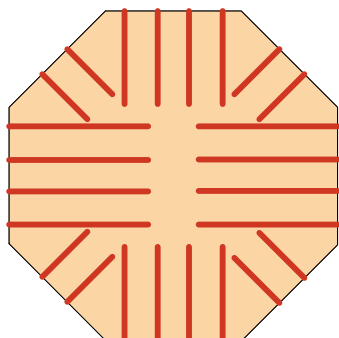


Fig. 60 Exemple de positionnement des trous d'injection dans une colonne en maçonnerie (vue en coupe) [V3].

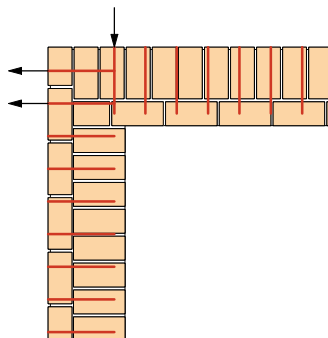


Fig. 61 Situation erronée dans laquelle le produit injecté dans un trou s'échappe par un autre trou [V3].

■ Maçonneries massives en moellons ou en blocs de béton

Dans les maçonneries composées de blocs de béton creux, on forera des trous à hauteur des cavités des blocs situés au-dessus du joint de mortier à traiter. Le produit sera simplement introduit dans chaque cavité et migrera ensuite par gravité vers le joint de mortier sous-jacent.

Dans les murs en moellons, le forage peut être réalisé en ligne sans tenir compte de l'appareillage. Lors du forage, on rencontrera ainsi alternativement des moellons (souvent durs et compacts) et du mortier de remplissage poreux, dans lequel le produit migrera préférentiellement. Il est néanmoins préférable de suivre, dans la mesure du possible, le tracé d'un joint de mortier et, si nécessaire, d'injecter le mur par les deux côtés, afin de garantir la continuité de la barrière.

■ Murs épais et caverneux

Dans les murs épais et caverneux, l'injection reste applicable d'un point de vue technique et économique. Malheureusement, les grandes quantités de produit liquide s'échappant de la zone d'injection par des fissures ou des cavités compliquent le traitement homogène de la maçonnerie. Ces importantes pertes de produit se répercutent en outre sur le coût de l'intervention. Il en va de même pour les murs composés de deux épaisseurs de maçonnerie (en briques ou en moellons) entre lesquelles on a abandonné des débris de matériaux de construction, de mortier, de torchis, etc. Il est dès lors impératif de vérifier au préalable la composition et l'état des murs sur toute leur épaisseur.

Lorsque l'état des maçonneries est tel que même un produit sous forme de gel ou de crème ne permet pas de résoudre le problème, une injection multiphase sera envisagée. On procédera alors comme suit :

- après un contrôle préalable du pourcentage de vides et de cavités, on réalise une première injection de coulis hydraulique ou de résine polyuréthane gonflante, par exemple, pour colmater les principales fissures et cavités. La pression appliquée ne peut excéder 0,3 à 0,5 MPa dans une maçonnerie ancienne, sans quoi on risque de l'endommager [V3]
- après un délai nécessaire à la stabilisation de la masse de colmatage, le produit hydrofuge est injecté dans de nouveaux trous, afin de traiter les pores et les capillaires des matériaux constituant la maçonnerie. Notons que, si l'on utilise des coulis hydrauliques lors de la première phase, il convient de sélectionner un produit hydrofuge présentant une bonne résistance en milieu fortement alcalin.

Enfin, signalons que, si la quantité de creux ou de cavités dans le mur est telle qu'une injection en deux phases est requise, il convient bien évidemment d'évaluer au préalable l'influence de ces creux et de ces cavités sur la stabilité de l'édifice et d'entreprendre, si nécessaire, les travaux permettant d'assurer la stabilité de ce dernier.

4.3 RECOUVREMENT DES MAÇONNERIES AU-DESSUS DU NIVEAU DU SOL

4.3.1 RECOUVREMENTS FREINANT L'ASSÈCHEMENT

L'application de certains recouvrements peut freiner l'assèchement des maçonneries. Il s'agit entre autres des éléments suivants :

- du côté intérieur des murs : doublage, feuilles de plomb ou d'aluminium, enduit imperméable ou imprégnation de résines
- du côté extérieur des murs : goudron à chaud, enduit au ciment ou plaques de pierre.

Utilisées de manière systématique il y a quelques années encore, ces interventions s'avèrent souvent dommageables à plus ou moins brève échéance, car elles contribuent à enfermer l'humidité à l'intérieur des murs, en empêchant son évaporation. En l'absence d'un traitement de blocage de l'humidité ascensionnelle, ces recouvrements peuvent dès lors accentuer les phénomènes de remontées capillaires et déplacer les problèmes d'humidité vers des zones qui n'étaient pas touchées auparavant (voir figure 63, p. 47).

En revanche, les murs contiennent parfois des concentrations en sels telles que la pose de protections intérieures ou extérieures se révèle indispensable, après un traitement de blocage de l'humidité ascensionnelle, pour empêcher la migration de ces sels vers les finitions à venir. Dans ce cas, on conseille souvent de prévoir une protection résistante à l'humidité avant la mise en œuvre des finitions, à condition toutefois d'effectuer un traitement de blocage de l'humidité ascensionnelle au préalable et de respecter un délai d'assèchement suffisant. Cette protection peut être composée :

- de plaques en polyéthylène rigides ou de membranes à excroissances avec treillis thermosoudés, pour les surfaces importantes



Fig. 62 Décoloration d'un système d'enduit sur isolant (EPS, 10 cm d'épaisseur), due à la migration de nitrates contenus dans la maçonnerie sous-jacente.

- d'un revêtement étanche à base de ciment ou de résines synthétiques, pour les zones plus restreintes
- d'un doublage posé sur des structures portantes résistantes à l'humidité et aux sels ou sur des structures séparées de la maçonnerie par une membrane anticapillaire.

Dans certains cas, il est possible d'utiliser les divers types de protections précitées dans le but de permettre la mise en place des nouvelles finitions avant même l'assèchement complet des murs. On raccourcit ainsi les délais relativement longs habituellement nécessaires entre le traitement de l'humidité ascensionnelle et la réfection des finitions (voir § 4.2.2.6, p. 42). Si l'on utilise cette technique, la face opposée du mur doit impérativement être perméable à la vapeur d'eau et permettre un assèchement suffisant du mur. Cela implique que le séchage aura lieu uniquement par la face non recouverte du mur et que les dégradations dues au transport d'humidité et de sels risquent d'être accentuées à cet endroit. En règle générale, on déconseille d'appliquer un recouvrement freinant l'assèchement sur les deux faces du mur avant l'assèchement complet.

4.3.2 ENDUITS D'ASSAINISSEMENT

Les enduits d'assainissement sont des enduits minéraux caractérisés par une forte porosité. Ils sont développés spécifiquement en vue d'une application sur des maçonneries humides et chargées en sels. Leur structure porométrique est conçue pour laisser l'humidité s'évaporer de la maçonnerie tout en piégeant les sels dans la masse de l'enduit, sans que ceux-ci y occasionnent des dégâts immédiats.

Ces enduits constituent une solution intéressante dans les cas suivants : le traitement de blocage de l'humidité capillaire est indésirable ou impossible à mettre en œuvre, la pose de recouvrements étanches comporte un risque trop important de déplacement du problème d'humidité, ou la maçonnerie ne peut rester apparente. En plus de leur aspect esthétique, les enduits d'assainissement jouent un rôle sacrificiel, puisqu'ils déplacent la cristallisation des sels depuis la maçonnerie vers l'enduit. Ainsi, la durabilité de ces enduits dépend de la quantité de sels pouvant être absorbée par leur structure porométrique, mais aussi de la concentration des sels présents dans la maçonnerie. L'application de cette solution implique un entretien régulier, la durabilité des enduits variant entre 5 et 15 ans en fonction de la situation (concentration et flux d'humidité et de sels). En présence de sels à action hygroscopique dans les conditions hygrothermiques ambiantes, des taches d'humidité sont en outre susceptibles d'apparaître à la surface de l'enduit. Enfin, l'enduit est appliqué en couche plus épaisse qu'un enduit traditionnel et seuls des éléments perméables à la vapeur d'eau peuvent être utilisés en guise de finition (valeur de l'épaisseur équivalente de diffusion de vapeur S_d inférieure ou égale à 5 cm)⁽¹⁰⁾.

- A : Badigeon au goudron, enduit au ciment ou plaques de pierre
B : Doublage, feuilles de plomb ou d'aluminium, enduit imperméable ou autre

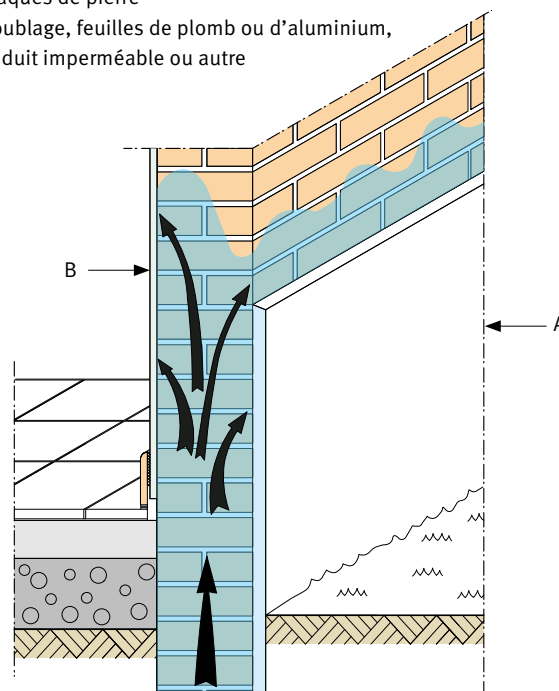


Fig. 63 Recouvrements freinant l'assèchement.

Les enduits d'assainissement peuvent être utilisés seuls ou en combinaison avec un traitement de blocage de l'humidité ascensionnelle, notamment lorsqu'on ne souhaite pas attendre l'assèchement complet du mur pour mettre en œuvre les nouvelles finitions. La réalisation d'une intervention de blocage de l'humidité ascensionnelle améliore en outre la durabilité de l'enduit d'assainissement.

À l'heure actuelle, les enduits d'assainissement sont principalement utilisés dans les bâtiments historiques à valeur patrimoniale, dans lesquels on souhaite éviter toute intervention irréversible liée à la création d'une barrière anticapillaire.

4.4 AUTRES INTERVENTIONS

4.4.1 TRAITEMENTS FAVORISANT L'ÉVAPORATION

Il existe divers traitements qui favorisent l'évaporation de l'eau renfermée dans les maçonneries.

Ces systèmes consistent à placer, à l'intérieur de la maçonnerie humide, des drains en terre cuite, en alumine ou en plastique qui facilitent l'évaporation de l'eau retenue dans les murs. Afin d'accélérer cette évaporation, les tubes sont disposés de manière à créer un courant de convection, qui sera provoqué par le refroidissement de l'air lors de l'évaporation.

⁽¹⁰⁾ Cette valeur est calculée sur la base du coefficient de diffusion de la vapeur d'eau déterminé selon la norme NBN EN ISO 7783 [B8].

Certaines variantes sont pourvues de cônes de déflexion favorisant la circulation de l'air sous l'effet des vents.

Par définition, les systèmes précités se limitent à accélérer l'évaporation de l'eau contenue dans les murs. Ils ne visent en aucun cas à freiner ou à bloquer l'humidité ascensionnelle et ne sont applicables que sur les murs extérieurs.

Lors des essais réalisés *in situ* et en laboratoire, les traitements favorisant l'évaporation se sont révélés moins efficaces pour l'assèchement des maçonneries que les systèmes de blocage de l'humidité ascensionnelle (insertion d'une membrane ou injection de produits hydrophobes). Ce constat peut s'expliquer par :

- la présence, dans l'épaisseur des murs, de cavités ouvertes entraînant l'apparition de ponts thermiques qui, en période froide, favorisent les phénomènes de condensation et accentuent même l'humidification locale
- le fait que le système a pour effet d'intensifier l'évaporation, ce qui accélère les remontées capillaires et augmente la migration ainsi que la concentration des sels dans la zone où les tuyaux d'aération sont mis en place. Rappelons qu'une forte concentration de sels peut causer des dégâts aux matériaux constituant la maçonnerie (voir § 2.1.6, p. 15 et § 2.2.4, p. 19).

4.4.2 ÉLECTRO-OSMOSE

Les essais en laboratoire ont démontré que les mouvements capillaires de l'eau dans les matériaux poreux engendrent une différence de potentiel électrique. L'électro-osmose vise à annuler cette différence de potentiel ou à l'inverser, afin de bloquer ou de repousser l'humidité ascensionnelle. Pour ce faire, on insère dans la maçonnerie un réseau conducteur relié à la terre, avec ou sans interposition d'une source de courant auxiliaire (respectivement électro-osmose active ou passive) [D2, W3, W4, W5, W6].

L'efficacité de cette technique varie selon la méthode et les matériaux utilisés, le mode de contact entre la sonde et la maçonnerie, l'inertie chimique du conducteur placé dans les murs, le potentiel d'oxydoréduction des métaux employés, la corrosion progressive des prises de terre, etc. Les résultats peu favorables obtenus lors de recherches menées au CSTC et dans de nombreux laboratoires internationaux, la complexité des paramètres à prendre en considération lors de la mise en œuvre et la méconnaissance des causes accidentelles de mauvais fonctionnement ont amené les entreprises belges spécialisées à délaisser cette technique.

4.4.3 SYSTÈMES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Les systèmes électromagnétiques sont basés sur le principe d'interférence de champs électromagnétiques. Ils consistent à installer, dans les locaux concernés par l'humidité, un appareil qui neutralise ces champs au sein des maçonneries et empêche ainsi les remontées capillaires.

L'efficacité de ces systèmes n'a pas encore pu être prouvée de façon irréfutable, étant donné que nombre de chantiers 'modèles' ont fait l'objet de plusieurs interventions parallèles (installation d'un système électromagnétique, amélioration des conditions de ventilation, pose d'un enduit d'assainissement, etc.). Une campagne de monitoring récemment réalisée par le CSTC, en collaboration avec un professionnel du secteur, n'a pas permis de confirmer l'efficacité de ce type de système.

4.5 EFFICACITÉ DES PROCÉDÉS

Le tableau 11 (p. 50) résume à titre indicatif :

- les techniques d'intervention précitées et leur principe d'action
- l'efficacité potentielle de ces systèmes pour l'assèchement des murs, appréciée sur la base d'essais conduits par le CSTC en laboratoire et *in situ*, du suivi de chantiers d'assèchement et des enseignements de recherches menées à l'étranger. Notons toutefois qu'un assèchement complet de la maçonnerie n'est pas toujours l'objectif recherché (c'est le cas lorsqu'on applique un enduit d'assainissement sans prévoir une intervention de blocage de l'humidité ascensionnelle complémentaire, par exemple)
- les remarques propres au système en question.

4.6 CONTRÔLE DE L'ASSÈCHEMENT DES MAÇONNERIES APRÈS UNE INTERVENTION CONTRE L'HUMIDITÉ ASCENSIONNELLE

Même si, à l'heure actuelle, la très grande majorité des interventions s'avèrent efficaces, un contrôle de l'assèchement après l'intervention doit néanmoins être prévu. Ce contrôle est crucial, notamment en vue de l'application éventuelle de finitions, pour laquelle on considère en général que le taux d'humidité ne peut excéder 3 à 5 % en masse (voir les expli-



Fig. 64 Humidité résiduelle après un traitement de blocage de l'humidité ascensionnelle, due à l'action de sels hygroscopiques se trouvant dans la maçonnerie.

cations concernant la teneur en humidité des matériaux poreux au paragraphe 3.1.2, p. 27).

Après un délai de séchage suffisant, l'objectif à atteindre est donc d'environ 3 % d'humidité en masse pour les matériaux poreux les plus courants. Lorsque les matériaux contiennent des sels et, plus particulièrement, des sels ou un mélange de sels présentant un caractère hygroscopique dans les conditions ambiantes, il arrive cependant que cette valeur ne soit jamais atteinte malgré un traitement de blocage de l'humidité ascensionnelle efficace. Dans ce cas, la présence d'humidité résiduelle dans les matériaux après le traitement résulte principalement de l'action hygroscopique des sels (voir figure 64, p. 48).

Lorsque le seuil de 3 % n'est pas atteint après un délai d'assèchement suffisant et que la maçonnerie renferme des sels, il convient d'évaluer la part d'humidité hygroscopique et la part d'humidité capillaire comprises dans la teneur en humidité totale des matériaux, en appliquant la méthode décrite au paragraphe 3.1.2.2 (p. 28). Si la part d'humidité capillaire est inférieure au seuil de 3 %, le traitement de blocage de l'humidité ascensionnelle peut être considéré comme efficace. Il y aura alors lieu de mettre en place les mesures adéquates afin de limiter l'influence des sels sur la maçonnerie (voir § 5.1, p. 51).

Le contrôle de l'assèchement consiste généralement à suivre l'évolution de l'humidité dans les maçonneries traitées, en comparant des mesures réalisées à un même endroit et selon une même technique avant le traitement et après le délai habituellement nécessaire à l'évaporation de l'humidité.

L'utilisation d'appareils de mesure de l'humidité résistifs ou capacitifs (voir § 3.1.1, p. 26) pour le contrôle de l'assèchement est déconseillée. Les mesures réalisées à l'aide de ces appareils après le traitement donnent en effet des résultats élevés en présence de sels ayant migré vers la surface d'évaporation lors de l'assèchement, et ce, même pour une maçonnerie parfaitement sèche. En revanche, de simples mesures effectuées au moyen d'une bombe à carbure ou par pesées comparatives permettent d'évaluer avec précision le pourcentage d'humidité contenu dans les murs avant et après le traitement.

Simple, sûre, rapide et peu onéreuse, les méthodes de contrôle à la bombe à carbure ou par pesées comparatives ne peuvent cependant être utilisées pour vérifier l'efficacité d'un traitement qu'après un assèchement suffisant des murs, c'est-à-dire après plusieurs mois, voire après une année ou plus (voir § 2.1.6, p. 15).

Si, après un délai de séchage raisonnable, le taux d'humidité total n'est pas suffisamment bas et si cette valeur élevée ne peut pas être attribuée à la présence de sels, on réinjectera les parties de maçonnerie concernées. Lorsqu'il s'avère qu'on a omis d'injecter un ou plusieurs trous, ceux-ci peuvent être rouverts et injectés à l'aide du produit mis en œuvre précédemment. En cas de réinjection d'une zone traitée, on utilisera éventuellement un produit en phase solvant capable de migrer au travers des zones déjà hydrophobées. Lorsque de nouveaux trous d'injection sont nécessaires, on veillera à sélectionner un joint différent de celui injecté auparavant, afin de ne pas trop affaiblir ce dernier.

Tableau 11 Récapitulatif des techniques d'intervention contre l'humidité ascensionnelle.

Technique d'intervention	Principe d'action	Efficacité pour l'assèchement	Remarques
Insertion d'une barrière d'étanchéité physique	Blocage physique de l'humidité ascensionnelle	Excellente	- Difficilement applicable dans les murs épais, les murs présentant des défauts de stabilité, les murs composés de moellons, etc. - Méthode fastidieuse occasionnant de nombreux désagréments dans les bâtiments occupés
Injection de bouche-pores	Blocage physique de l'humidité ascensionnelle	Moyenne	- Difficultés de migration des produits dans les matériaux humides - Effets secondaires néfastes ou performances insuffisantes - Méthode de moins en moins utilisée
Injection de produits hydrophobes	Blocage physicochimique de l'humidité ascensionnelle	Excellente, sous réserve d'un choix de produit judicieux	- Très bonne efficacité des produits à base de 'silicones', actuellement les plus utilisés en Belgique - Le choix d'un produit reposera notamment sur les agréments techniques et les rapports d'essais du CSTC - Lorsque la qualité de l'air intérieur est primordiale, on optera plutôt pour un produit liquide en phase aqueuse ou un produit sous forme de gel ou de crème - Une bonne ventilation est toujours indispensable
Recouvrement imperméable	Blocage de l'évaporation et de la migration des sels vers la surface de la maçonnerie	Négative	- Pas de blocage de l'humidité ascensionnelle et réduction des possibilités d'évaporation, d'où une accentuation ou un déplacement de l'humidité dans la maçonnerie - À utiliser uniquement si un traitement de blocage de l'humidité ascensionnelle préalable est prévu
Enduit d'assainissement	Stockage des sels et maintien du potentiel d'évaporation	Légèrement négative à pratiquement nulle	- Pas de blocage de l'humidité ascensionnelle et maintien des possibilités d'évaporation, d'où un risque moindre d'accentuation ou de déplacement de l'humidité dans la maçonnerie - À utiliser seul ou en parallèle avec un traitement de blocage de l'humidité ascensionnelle
Traitement favorisant l'évaporation	Amélioration de l'évaporation	Aléatoire	- Pas de blocage de l'humidité ascensionnelle - Peut provoquer l'apparition de ponts thermiques et une concentration des sels autour des ouvertures d'évaporation
Électro-osmose	Influence sur les potentiels électriques	Aléatoire	- Résultats aléatoires - Technique pratiquement abandonnée en Belgique
Système électromagnétique	Interférence entre champs électromagnétiques	Non démontrée	Expérience de chantier très limitée

Le chapitre 3 (p. 25) a mis l'accent sur le fait qu'il est primordial d'établir un diagnostic correct et global de l'humidité dans les bâtiments, car les causes d'humidité sont diverses et pas toujours évidentes à distinguer les unes des autres.

Il arrive régulièrement qu'après un traitement de l'humidité ascensionnelle réussi (voir chapitre 4, p. 35), un traitement contre des sels résiduels soit requis, afin d'empêcher la dégradation des maçonneries et des nouvelles finitions. Les différentes possibilités de traitement des sels sont décrites au paragraphe 5.1.

Dans certains cas, d'autres causes d'humidité subsistent après le traitement de l'humidité ascensionnelle. Il convient alors de les combattre de façon adéquate pour obtenir un assèchement satisfaisant de l'ensemble du bâtiment. Le paragraphe 5.2 (p. 53) donne un aperçu des publications relatives aux méthodes d'intervention destinées à combattre les causes d'humidité autres que l'humidité ascensionnelle.

5.1 TRAITEMENT DES SELS

5.1.1 PROTECTION DES FINITIONS INTÉRIEURES

Lorsque, après un traitement contre l'humidité ascensionnelle, la teneur en sels solubles de la maçonnerie est élevée, des précautions doivent être prises afin d'empêcher la contamination et la dégradation des nouvelles finitions (voir [Guide pour la restauration des maçonneries](#) [C13]). Dans ce cas, il est d'autant plus important de respecter un délai de séchage suffisant avant la mise en œuvre des finitions. Si l'on procède trop rapidement à l'exécution des finitions murales, il devient en effet plus difficile de déceler à temps les sels solubles, ce qui accroît le risque de dégradation.

Si, après l'assèchement complet de la maçonnerie et dans des conditions hygrométriques normales (température avoisinant les 20 °C et humidité relative comprise entre 30 et 60 %) [H2], seules des efflorescences apparaissent (voir § 2.2.4, p. 19), on peut généralement les éliminer en brossant la surface de la maçonnerie ou en découpant les anciennes finitions. Les finitions intérieures peuvent ensuite être appliquées de la façon habituelle.

Si l'on constate, au contraire, la présence de sels hygroscopiques (voir § 2.2.4, p. 19), il y aura lieu de prévoir des protections supplémentaires pour éviter que ces sels ne migrent

vers les nouvelles finitions. En effet, les sels hygroscopiques s'opposent à l'assèchement complet des maçonneries et provoquent l'apparition de taches d'humidité, même si une intervention de blocage de l'humidité ascensionnelle efficace a été réalisée. Étant donné que les sels hygroscopiques ne forment pas de cristaux dans des conditions hygrométriques normales, ils ne peuvent pas être éliminés par brossage. Il convient donc de prévoir une protection qui résiste à l'humidité et qui bloque la migration des sels (voir § 4.3.1, p. 46). Rappelons que ce type de protection doit être utilisé seulement à condition qu'un traitement de blocage de l'humidité ascensionnelle efficace soit entrepris au préalable, et ce, dans le but d'éviter l'accentuation ou le déplacement du problème.

Dans certains cas (par exemple dans les églises, où l'assèchement peut durer plusieurs années du fait de l'épaisseur de la maçonnerie et du manque de chauffage), on souhaitera malgré tout appliquer les nouvelles finitions avant l'assèchement complet de la maçonnerie. Pour ce faire, on utilisera un enduit d'assainissement qui est prévu spécialement pour résister pendant un certain temps à la migration des sels (voir § 4.3.2, p. 47) et qui a l'avantage de ne pas bloquer l'évaporation. On peut également opter pour la mise en œuvre d'une protection qui résiste à l'humidité et qui bloque la migration des sels (voir § 4.3.1, p. 46). Cette protection ralentira néanmoins l'assèchement des maçonneries; c'est pourquoi il est impératif que l'humidité contenue dans la maçonnerie puisse s'évaporer par le côté extérieur du mur. Il convient en outre d'éviter que des éléments en bois ou des pièces métalliques, susceptibles de pourrir ou de se corroder, ne se retrouvent enfermés derrière la protection.

5.1.2 PROTECTION DES FINITIONS EXTÉRIEURES

Les efflorescences de sels solubles se manifestant du côté extérieur de la maçonnerie (en particulier lorsque celle-ci est neuve) seront en partie délavées par les pluies qui s'abattront sur l'ouvrage. Un brossage à sec peut néanmoins accélérer le processus; il sera éventuellement suivi d'un ou de plusieurs cycles d'humidification et de brossage, afin d'éliminer le plus de sels possible. Les finitions extérieures pourront ensuite être réalisées comme à l'accoutumée.

Si la maçonnerie contient des sels hygroscopiques, il sera très difficile d'éviter l'apparition de taches humides et la dégradation des finitions dans les zones contaminées. De

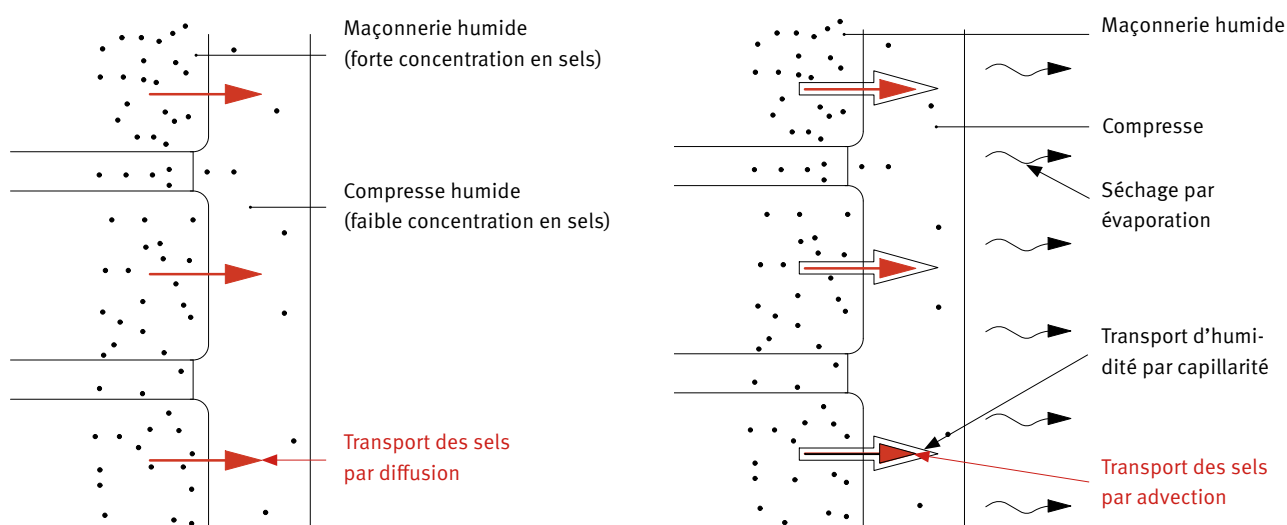


Fig. 65 Mécanismes d'extraction des sels par application d'une compresse hydrophile sur une maçonnerie.

plus, les sels hygroscopiques ne sont pas toujours détectés avant la mise en œuvre des finitions, vu la distribution parfois aléatoire des zones contaminées.

L'une des solutions à ce problème consiste à laisser la maçonnerie apparente, les taches d'humidité étant moins visibles sur un mur nu que sur un enduit ou une peinture. Si l'on doit absolument appliquer une finition, on choisira de préférence un système non filmogène, afin d'éviter la formation de 'cloques'. Toutefois, même les systèmes minéraux risquent de subir des dégradations sous forme de pulvérulences, de décolorations, etc. Certains produits vendus sur le marché en tant que convertisseurs ou inhibiteurs de sels peuvent apporter une amélioration, mais ils sont rarement efficaces à 100 %. Il s'avère souvent utile de procéder à quelques essais *in situ* pour comparer la tenue de différents types de finitions (à base de chaux aérienne, de chaux hydraulique, de silicates, etc.).

5.1.3 EXTRACTION DES SELS

Étant donné les effets néfastes des sels solubles sur les maçonneries, la meilleure solution consisterait en théorie à extraire, en tout ou en partie, ces sels de la maçonnerie pour ramener leurs concentrations à des valeurs acceptables (voir § 2.2.4, p. 19). Cette extraction ne sera toutefois utile que si l'apport de sels est endigué au préalable, par exemple grâce au blocage de l'humidité ascensionnelle.

Une première technique d'extraction des sels solubles se base sur l'application d'une compresse constituée d'un ou de plusieurs matériaux hydrophiles (cellulose, argile, etc.) sur la surface de la maçonnerie. En effet, les sels migrent depuis la maçonnerie vers la compresse par un des deux phénomènes suivants ou par leur action combinée (voir figure 65) :

- **diffusion** : les sels migrent à travers les matériaux humides sous l'influence d'un gradient de concentration allant de

la concentration la plus élevée (dans la maçonnerie) vers la concentration la plus faible (dans la compresse)

- **advection** : les sels migrent à travers les matériaux poreux par transport capillaire, en même temps que la solution dans laquelle ils se trouvent. Ce phénomène se produit lorsque la compresse sèche par évaporation : pour que la compresse soit efficace, le front d'évaporation doit se situer à l'intérieur ou à la surface de celle-ci, afin que les sels cristallisent au sein de la compresse et puissent être éliminés en même temps qu'elle.

La compresse est retirée lorsqu'elle est sèche ou lorsqu'elle se détache spontanément. L'opération est répétée jusqu'à ce que la dernière compresse appliquée n'absorbe plus de sels. Bien que cette technique soit utilisée régulièrement dans le cadre de la conservation et de la restauration de bâtiments, les résultats s'avèrent parfois aléatoires. En particulier, de nombreux auteurs indiquent que l'extraction des sels dépasse rarement une profondeur de 5 à 10 cm [V5]. Les sels contenus plus en profondeur sont donc susceptibles de réapparaître après un certain temps, par exemple sous l'effet des pluies.

Actuellement étudiée par les laboratoires du CSTC, une deuxième technique repose sur la création d'un potentiel électrique à travers la maçonnerie. Les ions de sels en solution contenus dans les pores des matériaux ont tendance à migrer, selon leur charge électrique, vers l'électrode positive ou vers l'électrode négative, grâce auxquelles ils pourront être collectés et évacués. Cette technique a donné des résultats encourageants en laboratoire, mais elle doit encore être développée et testée sur des maçonneries en place. De même, une troisième technique basée sur l'utilisation de bactéries dénitrifiantes est en cours d'évaluation. La recherche en est pour l'instant à la phase de tests en laboratoire.

Il n'existe à ce jour aucune technique efficace, sûre et économique permettant d'éliminer les sels contenus dans les

maçonneries de bâtiments courants. Étant donné que la mise en place de compresses requiert une main-d'œuvre importante et que l'application d'un potentiel électrique n'a pas encore été suffisamment testée, ces techniques restent réservées essentiellement aux monuments classés. À ce jour, les solutions présentées aux paragraphes 5.1.1 et 5.1.2 (p. 51) demeurent donc les principales options pour les bâtiments courants.

5.2 TRAITEMENT DES AUTRES CAUSES D'HUMIDITÉ

Les autres causes d'humidité sont multiples et il arrive bien souvent qu'elles se combinent dans les bâtiments anciens, ce qui complique l'établissement d'un diagnostic précis (voir § 3.2, p. 31) ainsi que leur traitement. L'objectif de ce paragraphe n'est pas de décrire en détail les moyens qui permettraient d'y remédier, mais de renvoyer à d'autres publications comportant davantage de précisions quant à ces causes et à leurs traitements potentiels.

5.2.1 HUMIDITÉ DE CONSTRUCTION

Le traitement de l'humidité de construction consiste à favoriser l'assèchement de la maçonnerie en chauffant et en ventilant suffisamment les locaux pendant et après les activités de chantier. L'utilisation de déshumidificateurs peut également être envisagée. L'assèchement complet de cette humidité s'échelonne sur une période de 6 à 24 mois selon les quantités d'eau accumulées (voir § 2.2.1, p. 17).

Cette problématique est abordée dans les documents suivants :

- [Problèmes d'humidité dans les bâtiments. Causes des dégradations. Ponts thermiques. Climat intérieur. Données pour la conception et l'exécution des bâtiments. Conditions d'occupation des bâtiments](#) [C2]
- [Le séchage des enduits intérieurs](#) [F1].

5.2.2 CONDENSATION SUPERFICIELLE OU INTERNE ET HYGROSCOPICITÉ DES MATÉRIAUX

Ces phénomènes ont fait l'objet des publications suivantes (voir § 2.2.2, p. 17, et § 2.2.3, p. 18) :

- [Isolation des murs existants par l'intérieur : systèmes et dimensionnement](#) [L2]
- [Isolation des murs existants par l'intérieur : diagnostic](#) [T1]
- [Qualité de l'air et logement ancien](#) [V1]
- [Ventilatiegids. Stapplan voor comfortabel en energiezuinig ventileren](#) [V2]
- [Formation de moisissures dans les habitations](#) [E1]
- [Taux d'humidité hygroscopique des matériaux](#) [E2]
- [Condensation superficielle](#) [E3]
- [Guide pour la restauration des maçonneries. Partie 2 : sels et humidité ascensionnelle. Procédure 42 : condensation](#) [C13]
- [Formation de moisissures dans les habitations](#) [H2].

5.2.3 INFILTRATIONS DUES AUX PLUIES À TRAVERS LES MAÇONNERIES

Pour de plus amples informations sur le sujet, on se référera aux documents ci-après (voir § 2.2.5, p. 20) :

- [Infiltrations d'eau au pied des murs creux](#) [M2]
- [Drainage d'un mur creux au droit d'un seuil](#) [M1]
- [Hydrofugation de surface](#) [C11]
- [Pénétration d'eau au travers de maçonneries de parement en blocs de béton \(Question et réponse\)](#) [P2]
- [Les infiltrations par les cheminées et les pignons](#) [H3].

5.2.4 AUTRES TYPES D'INFILTRATIONS ET AUTRES CAUSES D'HUMIDIFICATION

Le lecteur intéressé par le sujet est invité à consulter les publications suivantes (voir § 2.2.5, p. 20, et § 2.2.7, p. 23) :

- [Guide de l'entretien pour des bâtiments durables](#) [C12]
- [Problèmes d'humidité à l'interface entre la menuiserie et le gros œuvre](#) [C14]
- [Infiltrations d'eau par la menuiserie extérieure](#) [S1].

MÉTHODOLOGIE D'ESSAI POUR LES PRODUITS D'INJECTION

L'injection de produits hydrophobes est actuellement la technique de lutte contre l'humidité ascensionnelle la plus utilisée en Belgique. Des essais menés au CSTC et dans des laboratoires étrangers ainsi que le suivi de très nombreux chantiers ont permis de mettre en évidence l'efficacité et la polyvalence des solutions à caractère hydrophobe telles que les silanes et les siloxanes.

À ce stade, on pourrait estimer que les attentes des praticiens et des maîtres d'ouvrage à la recherche d'interventions aux performances optimales ont été satisfaites, si on ne se trouvait pas confronté à des contraintes environnementales croissantes :

- la première concerne les **occupants des bâtiments**, qui peuvent être gênés par des odeurs et éventuellement souffrir d'allergies lors de l'injection du bâtiment. Ces nuisances peuvent être plus ou moins importantes selon les quantités injectées, le type de solvant utilisé, les possibilités de ventilation des lieux, etc.
- la seconde est liée à l'évolution des **prescriptions environnementales** au niveau européen, qui devraient tendre à l'avenir vers une limitation, voire une interdiction, de l'usage des solvants organiques pour de telles interventions.

Face à ces contraintes, les fabricants et les formulateurs ne sont pas restés inactifs. Ces dernières années, on note en effet une tendance à remplacer les solvants habituels de type '*white-spirit*' par des équivalents désaromatisés, à employer de nouveaux types de solvants dégageant moins d'odeur, à s'orienter vers des solutions aqueuses (émulsions ou micro-émulsions), ou encore à proposer des produits à hautes concentrations en matières actives sous forme de gel ou de crème.

Comme ces évolutions influencent les performances des interventions, il apparaît de plus en plus important d'étudier le comportement de ces différentes solutions en milieu poreux et humide. Une méthodologie d'essai a été développée à cet effet par le CSTC, en collaboration avec l'IRPA, le Certech et l'Union belge pour l'agrément technique dans la construction (UBAtc). Les principaux critères pris en compte sont :

- la correspondance avec la réalité de chantier (matériaux et taux d'humidité)
- la fiabilité et la reproductibilité de la méthode
- la simplicité (délais et budgets acceptables)
- la délivrance de rapports d'essais normalisés facilitant la comparaison de l'efficacité potentielle des produits dans différentes conditions d'humidité initiale du support.

La méthodologie développée par le CSTC sert actuellement

de base à l'obtention d'un agrément technique pour les produits d'injection contre l'humidité ascensionnelle. Jusqu'à présent, plus d'une trentaine de produits d'injection commerciaux ont été testés à l'aide de cette procédure (voir § 4.2.2.5, p. 41), qui est détaillée ci-après.

Il convient de préciser que la procédure vise à caractériser des produits de façon normalisée. Dans certains cas, les conditions de chantier (taux d'humidité initiale, composition de la maçonnerie, température ambiante, etc.) sont telles qu'un produit moins bien classé à l'issue de la procédure d'essai donnera des résultats plus satisfaisants dans la pratique. Injecté dans une maçonnerie peu homogène, un produit sous forme de crème obtiendra, par exemple, de meilleurs résultats qu'un produit liquide, qui occasionne trop de pertes, même si ce dernier montrait des performances supérieures lors de l'essai.

A1 Caractérisation du produit

A1.1 Densité

La densité du produit est déterminée selon la norme NBN EN ISO 2811-1 [O1].

A1.2 Viscosité

La viscosité Brookfield du produit est calculée conformément à la norme ASTM D 2196-10 [A1].

L'équipement utilisé est un viscomètre synchroélectrique Brookfield (modèle LV). Pour les produits sous forme de crème ou de gel, l'appareil Brookfield est monté sur un statif motorisé Helipath, dont la vitesse de déplacement (7 à 8 inch/min, soit 30 à 34 mm/s) permet d'éviter les phénomènes de cavitation.

A1.3 Extrait sec

La procédure appliquée depuis 2014 pour la détermination de l'extrait sec est basée sur la norme NBN EN 480-8 [B4].

A1.4 Analyse chimique par spectrométrie infrarouge (méthode FT-IR)

L'analyse infrarouge est effectuée conformément à la norme NBN EN 1767 [B6].

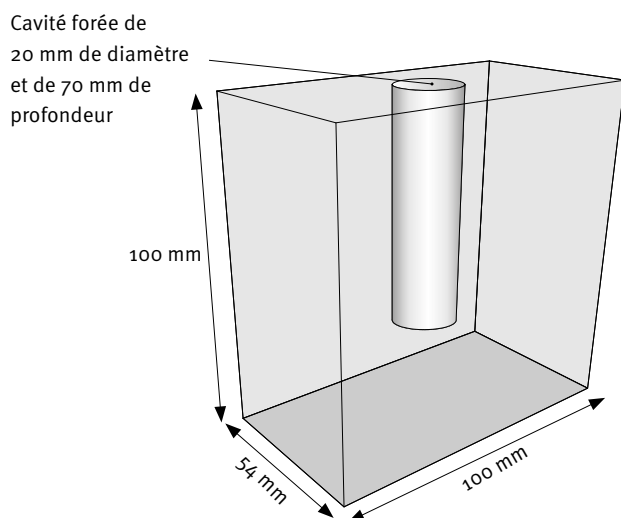


Fig. 66 Éprouvette silicocalcaire utilisée pour les essais de performance des produits.

A2 Essais de performance

A2.1 Éprouvettes

Les éprouvettes sont extraites de blocs silicocalcaires manufacturés de marque définie (voir figure 66) présentant une porosité totale en volume de 28,0 % et une masse volumique de 1,85 g/cm³. Préalablement à l'essai, les blocs sont placés dans une enceinte à haute teneur en CO₂ pour subir une carbonatation complète dans la masse. On effectue ensuite un contrôle à la phénolphthaléine sur un bloc découpé transversalement, afin de s'assurer que les blocs ont été totalement carbonatés (pH < 10) avant les essais.

Après la carbonatation, les essais sont réalisés sur des éprouvettes d'environ 54 × 100 × 100 mm³ de dimensions. Une cavité de 20 mm de diamètre sur 70 mm de profondeur est forée dans les échantillons; celle-ci est nettoyée à la brosse et à l'air comprimé avant de servir à la mise en place des produits de traitement.

A2.2 Absorption initiale des éprouvettes

Une fois les éprouvettes séchées à 45 ± 5 °C et leur masse sèche individuelle (m_{nd}) déterminée, on évalue leur degré de saturation par absorption capillaire. Pour obtenir cette absorption, on met les échantillons en contact avec une solution saline durant 24 heures, conformément à la procédure décrite dans la norme NBN EN 1925 [C16], par leur face non moulée d'environ 100 × 100 mm² (dans une hauteur d'eau de 10 ± 2 mm). La solution saline utilisée contient 0,5 % en masse de NaCl, 0,5 % en masse de KNO₃ et 2,0 % en masse de Na₂SO₄.

L'essai se déroule dans les conditions de laboratoire à 23 ± 3 °C et 50 ± 5 % HR. La saturation en humidité capillaire (m_{na}) des éprouvettes non traitées après 24 heures

est calculée comme étant la différence entre la masse humide après 24 heures (m_{n24}) et la masse sèche initiale ($m_{na} = m_{n24} - m_{nd}$).

A2.3 Préparation des éprouvettes et application du produit

Les éprouvettes sont conditionnées en laboratoire pour obtenir des taux de saturation en eau correspondant à une portion de la saturation capillaire après 24 heures (qui représente 100 % de la quantité $m_{na} = m_{n24} - m_{nd}$). Ainsi, on prépare trois séries de trois éprouvettes avec des taux de saturation respectifs de 40 ± 5 %, 60 ± 5 % et 80 ± 5 %, ce qui équivaut en moyenne à un taux d'humidité des éprouvettes silicocalcaires de respectivement 5,2 %, 7,8 % et 10,4 % en masse. Ces taux de saturation sont obtenus après l'essai d'absorption capillaire (voir ci-avant), en séchant les éprouvettes jusqu'à atteindre le taux de saturation souhaité.

On conditionne ensuite les éprouvettes pendant sept jours à 23 ± 3 °C dans une enceinte individuelle fermée hermétiquement, afin d'obtenir une humidification uniforme.

Après ce conditionnement, on pèse une nouvelle fois les éprouvettes et on calcule les taux de saturation réels, exprimés en pourcentage de la saturation capillaire (m_{na}). Puis, on traite chaque éprouvette conditionnée avec le produit d'injection contre l'humidité ascensionnelle, qu'on applique dans la cavité forée.

La quantité de produit à injecter est déterminée comme suit :

- si le fabricant précise que la quantité de produit d'injection à appliquer est de dix litres par mètre carré, on injectera 16 ml de produit dans la cavité de l'éprouvette
- si le fabricant préconise d'autres quantités, on calculera la quantité de produit à introduire dans la cavité proportionnellement aux quantités mentionnées ci-avant
- si l'on ne dispose d'aucune indication du fabricant et s'il s'agit d'un produit liquide, on incorporera 16 ml de produit dans la cavité.

Pour un même volume à traiter, la quantité appliquée dans un échantillon correspond environ au quart de la quantité prescrite par le fabricant. Dans le cadre de la procédure décrite ici, cette proportion est la même pour tous les produits testés, ce qui permet de comparer l'efficacité des différents produits.

Lorsqu'on injecte des produits sous forme de crème ou de gel, on enfonce, si nécessaire, une vis ou une tige dans la cavité pour faire remonter le produit le long des parois de cette dernière. Lorsque le trou d'injection est entièrement rempli de produit, ce dernier peut ainsi migrer vers la masse de l'éprouvette en suivant un parcours similaire à celui emprunté dans la pratique.

Par la suite, les éprouvettes sont conditionnées pendant 28 jours à 23 ± 3 °C dans une enceinte fermée hermétiquement; chaque éprouvette est emballée individuellement, afin d'éviter les transferts de produit sous forme gazeuse.

A2.4 Mesure de l'efficacité du traitement

Après un conditionnement de 28 jours, les éprouvettes sont retirées de l'enceinte hermétique et placées pendant sept jours dans les conditions de laboratoire à 23 ± 3 °C et 50 ± 5 % HR.

On place ensuite la surface non moulée d'environ 100×100 mm² dans de l'eau déminéralisée. L'essai d'absorption capillaire est effectué selon la norme NBN EN 1925 [C16] (10 ± 2 mm de hauteur d'eau) et se déroule dans les conditions de laboratoire à 23 ± 3 °C et 50 ± 5 % HR. La durée totale de l'essai est de maximum 24 heures (délai identique à celui de l'absorption initiale).

Cette première mesure de l'absorption sur l'échantillon traité est destinée à éliminer les effets de mouillage parasites liés aux additifs tensioactifs qui sont ajoutés dans les formulations pour stabiliser les émulsions. Elle est suivie d'un séchage dans une étuve à 45 ± 5 °C et d'une pesée de la masse sèche après traitement (m_{td}). Puis, on effectue un second essai de capillarité dans les conditions décrites ci-avant et on pèse l'échantillon après 24 heures (m_{t24}). Grâce à ces deux dernières pesées, on peut calculer l'absorption capillaire de l'échantillon traité ($m_{ta} = m_{t24} - m_{td}$) :

$$\text{critère d'absorption [\%]} = \left[1 - \frac{m_{t24} - m_{td}}{m_{n24} - m_{nd}} \right] \times 100 \text{ \%}.$$

A2.5 Mesure du potentiel de migration du produit

Cet essai vise à évaluer le potentiel de migration du produit testé dans les éprouvettes silicoalcalaires présentant différents taux de saturation (40, 60 et 80 % de la saturation capillaire après 24 heures).

L'essai est effectué sur les éprouvettes utilisées auparavant pour la mesure de l'efficacité par absorption et comprend :

- le sciage des éprouvettes à l'aide d'outils diamantés parallèlement à la section 100×100 mm² et dans l'axe de l'orifice d'injection
- le nettoyage des faces de sciage et le séchage des éprouvettes à 45 ± 5 °C

- la mise en absorption par la surface extérieure (environ 100×100 mm²), face sciée vers le haut, dans 5 mm d'eau déminéralisée
- après trois heures, le marquage des zones traitées (zones sèches visuellement) dans le plan de découpe, la photographie des éprouvettes et l'identification des surfaces concernées (orifice d'injection compris) au moyen d'un programme de traitement d'images (ImageJ).

La capacité de migration est calculée selon la formule ci-après et est exprimée individuellement pour les trois taux de saturation testés, sur la base de la moyenne des deux moitiés d'éprouvette correspondantes :

$$\text{critère de migration [\%]} = \frac{\text{surface traitée}}{\text{surface totale}} \times 100 \text{ \%}.$$

A2.6 Corrélation efficacité/migration et reproductibilité de l'essai

Afin de vérifier la reproductibilité des résultats, une même émulsion de silanes a été testée sur sept séries d'éprouvettes conditionnées à 40 ± 5 %, 60 ± 5 % et 80 ± 5 % du taux de saturation capillaire après 24 heures (m_{na}), dans le cadre du projet HUMIBATI subsidié par la Région wallonne. Il ressort de cet essai que la déviation standard est de l'ordre de 7 % pour la mesure de l'efficacité et de 11 % pour l'essai de migration.

A3 Classement des produits en fonction des essais de performance

Pratiqués sur plus d'une trentaine de produits à ce jour, les essais de performance ont révélé une étroite corrélation entre les résultats des mesures d'efficacité et de migration. La mesure de l'efficacité a dès lors été choisie comme principal critère de classement des produits, la mesure du potentiel de migration servant, quant à elle, au contrôle et à la détection d'anomalies lors des essais.

Le tableau 12 reprend le classement appliqué depuis 2013. Chaque produit est caractérisé par une série de trois classes

Tableau 12 Classement des produits d'injection contre l'humidité sur la base de la procédure du CSTC (depuis janvier 2013).

Classe	Efficacité obtenue selon la procédure du CSTC (*)	Migration	Évaluation
A+	≥ 60 %	≥ 25 %	Hautement efficace
A	≥ 40 % et < 60 %		Très efficace
B	≥ 20 % et < 40 %		Efficace
C	< 20 %	< 25 %	Ne remplit pas les conditions

(*) Les essais étant effectués sur la base de quantités de produit inférieures à celles utilisées sur chantier, un produit présentant une efficacité de 60 % à l'essai est considéré comme hautement efficace.

Tableau 13 Ancien classement des produits d'injection contre l'humidité sur la base de la procédure du CSTC (avant janvier 2013).

Classe	Efficacité		Remarques
	Réduction de l'absorption capillaire	Migration dans le matériau	
A	> 40 %	> 75 %	Le produit est classé comme très efficace.
B	> 40 %	25 – 75 %	Le produit est classé comme bien efficace.
C	20 – 40 %	25 – 75 %	Le produit est classé comme efficace.
D	10 – 20 %	25 – 75 %	Le produit est classé comme médiocrement efficace.
E	10 – 20 %	< 25 %	Le produit est classé comme peu efficace.
F	< 10 %	< 25 %	Le produit ne répond pas aux exigences de l'ATG.

correspondant à l'efficacité moyenne mesurée sur des éprouvettes contenant respectivement 40 ± 5 %, 60 ± 5 % et 80 ± 5 % du taux de saturation après 24 heures.

Notons qu'avant 2013, on utilisait un système de classement différent (voir tableau 13). Ce système est encore repris dans certains rapports d'essais ou agréments techniques datant d'avant 2013.

A4 Interprétation des rapports d'essais et des agréments techniques

Les rapports d'essais du CSTC ou les agréments techniques (ATG) délivrés par l'UBATc constituent une aide précieuse pour le choix d'un produit d'injection, car ils permettent de comparer les performances de différents produits dans les conditions d'application normalisées de la procédure décrite ci-avant.

Ces rapports doivent être interprétés en tenant compte des éléments suivants :

- les prescriptions relatives à l'application du produit (voir également la fiche technique fournie par le fabricant) : substrat à injecter, dilution éventuelle, système d'application, quantités de produit à injecter, profondeur et diamètre des trous d'injection et distance entre les trous
- la quantité de produit injectée dans l'éprouvette lors de l'essai, compte tenu du fait que pour dix litres de produit d'injection par mètre carré de section de maçonnerie préconisés par le fabricant, on injecte en fait 16 ml de produit dans la cavité de l'éprouvette
- le classement du produit sur la base des résultats obtenus lors de l'essai : étant donné que les conditions d'application de l'essai sont généralement plus sévères que celles rencontrées dans la réalité, les classes A, B et C de l'ancien classement ainsi que les classes A+, A et B du nouveau classement peuvent être considérées comme suffisamment efficaces dans la plupart des cas
- chaque produit est caractérisé par une série de trois lettres qui correspondent aux résultats obtenus sur des éprouvettes contenant respectivement 40 ± 5 %, 60 ± 5 % et 80 ± 5 % du taux de saturation capillaire après 24 heures.

Vu qu'en pratique, le taux d'humidité varie au sein d'une même maçonnerie, on recommande d'utiliser des produits ayant obtenu des résultats satisfaisants pour les trois taux d'humidité testés (classes A, B et C de l'ancien classement et classes A+, A et B du nouveau classement; voir tableau 14, p. 59).

A5 Durabilité

La procédure décrite ci-avant vise uniquement à évaluer l'efficacité initiale des produits d'injection contre l'humidité ascensionnelle. Les paramètres de vieillissement des produits à l'intérieur d'une maçonnerie sont, quant à eux, peu connus et il n'existe aucun test de vieillissement accéléré correspondant à ce cas de figure à l'heure actuelle. L'expérience de chantier semble en effet indiquer que la durabilité des traitements d'injection est très rarement mise en question dans la pratique. Si des problèmes de durabilité sont apparus dans le passé, il s'agissait vraisemblablement d'injections effectuées au moyen de produits à base de silicates. Dans certains cas, ces produits ont pu perdre de leur efficacité lors d'une période de sécheresse et ne formaient alors plus une barrière suffisante lorsque les maçonneries furent à nouveau en contact avec une source d'humidité.

Néanmoins, ces produits ne satisfont pas aux critères d'efficacité et de migration établis par la procédure du CSTC; le risque de les retrouver sur de nouveaux chantiers est donc limité. Par ailleurs, il semblerait qu'un environnement alcalin (béton, mortier récents, etc.) puisse avoir une influence néfaste sur l'efficacité de certains produits à base de silanes ou de siloxanes. Il apparaît néanmoins que si l'injection d'un produit permet l'assèchement de la maçonnerie dans les mois qui suivent le traitement, elle garantit en général une protection durable contre les phénomènes de remontées capillaires.

A6 Critères secondaires

La méthodologie d'essai décrite ici a pour but d'estimer l'efficacité potentielle des produits d'injection contre l'humidité ascensionnelle. Cependant, d'autres critères, tels

Tableau 14 Exemple de classement (A+AA) d'un produit d'injection sur la base des résultats obtenus selon la procédure du CSTC (tel que repris dans les agréments techniques).

Efficacité initiale du produit X pour une consommation moyenne d'environ 1,5 l/mètre courant/10 cm d'épaisseur de maçonnerie	Humidité de l'éprouvette lors de l'application [% par rapport à la saturation capillaire après 24 heures]		
	40 %	60 %	80 %
Réduction de l'absorption capillaire	> 60 %	> 40 %	> 40 %
Migration dans le matériau	> 75 %	> 75 %	> 75 %
Classe (depuis janvier 2013)	Classe A+	Classe A	Classe A
Ancienne classe (avant 2013)	Classe A	Classe A	Classe A

que les émissions de composés organiques volatils (COV) dues à l'utilisation du produit ou la sensibilité du produit aux développements biologiques, jouent un rôle important dans le choix du produit d'injection. Ce sera notamment le cas dans des situations à risque comme la réalisation d'injections en hiver ou en présence d'enfants en bas âge ou d'occupants souffrant d'une allergie aux solvants.

Afin de répondre à ces préoccupations, le CSTC a développé, en collaboration avec le Certech ⁽¹⁾, deux méthodes d'essai visant à mettre en évidence ces critères secondaires. Ces méthodes ne font pas partie de la procédure d'obtention d'un agrément technique, mais elles sont à la disposition des fabricants qui souhaitent les utiliser.

A6.1 Émissions de COV

En collaboration avec le CSTC, le Certech a mis sur pied une procédure d'essai permettant de quantifier les émissions de COV dues à la mise en œuvre de produits d'injection contre l'humidité ascensionnelle. Cette procédure repose sur la norme ISO 16000-9 [B11]. L'essai d'émission est effectué

dans une chambre de test en acier inoxydable, sur des éprouvettes identiques à celles utilisées pour les essais de performance. Des prélèvements sont analysés respectivement quatre heures (J-0), trois jours (J+3) et 28 jours (J+28) après l'application du produit.

A6.2 Sensibilité aux développements biologiques

L'intérieur d'une maçonnerie affectée par des remontées capillaires forme un milieu propice aux développements biologiques. Par conséquent, il est essentiel que le produit injecté dans la maçonnerie ne favorise pas la croissance des micro-organismes. C'est pourquoi le CSTC a développé une procédure d'essai visant à évaluer la sensibilité des produits d'injection contre l'humidité ascensionnelle aux développements biologiques. Cette procédure est dérivée de la norme EN ISO 846 [B7]. Les produits sont testés dans un milieu de culture complet ou incomplet sur des filtres inertes en microfibrilles de verre inoculées d'une solution mixte de spores. On peut ensuite estimer la sensibilité du produit aux développements biologiques et son éventuelle action biocide en mesurant la croissance des spores après 28 jours.

⁽¹⁾ Centre de ressources technologiques en chimie.

BIBLIOGRAPHIE

A

American Society for Testing and Materials (www.astm.org)

- A1 D2196-10 Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield Type) Viscometer. West Conshohocken (PA), États-Unis, ASTM International, 2010.

Arendt C.

- A2 Praktischer Vergleich von Untersuchungsgeräten und -verfahren zur Feuchtemessung. I. Cologne, Bautenschutz und Bausanierung, volume 16, n° 5, p. 27-31, août 1993.
- A3 Praktischer Vergleich von Untersuchungsgeräten und -verfahren zur Feuchtemessung. II. Cologne, Bautenschutz und Bausanierung, volume 16, n° 6, p. 10-14, septembre 1993.

B

Borrelli E.

- B1 Conservation of Architectural Heritage, Historic Structures and Materials. ARC Laboratory Handbook. Vol. 3: Salts. Rome, International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property, 1999.

Bureau de normalisation (www.nbn.be)

- B2 NBN B 05-201:1976 Essais des matériaux de construction. Gélivité. Capacité d'imprégnation d'eau par capillarité.
- B3 NBN D 50-001:1991 Dispositifs de ventilation dans les bâtiments d'habitation.
- B4 NBN EN 480-8:2012 Adjuvants pour béton, mortier et coulis. Méthodes d'essai. Partie 8 : détermination de l'extrait sec conventionnel.
- B5 NBN EN 1745:2012 Maçonnerie et éléments de maçonnerie. Méthodes pour la détermination des propriétés thermiques.
- B6 NBN EN 1767:1999 Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton. Méthodes d'essais. Analyse par spectrométrie infrarouge.
- B7 NBN EN ISO 846:1997 Plastiques. Évaluation de l'action des micro-organismes.
- B8 NBN EN ISO 7783:2011 Peintures et vernis. Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau. Méthode de la coupelle.
- B9 NBN EN ISO 10456:2007+AC:2009 Matériaux et produits pour le bâtiment. Propriétés hygrothermiques. Valeurs utiles tabulées et procédures pour la détermination des valeurs thermiques déclarées et utiles.
- B10 NBN EN ISO 12570:2000 Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment. Détermination du taux d'humidité par séchage à chaud.
- B11 NBN EN ISO 16000-9:2006 Air intérieur. Partie 9 : dosage de l'émission de composés organiques volatils de produits de construction et d'objets d'équipement. Méthode de la chambre d'essai d'émission.

C

Cailleux E., Coppens E., Noirfalisce E. et Pollet V.

- C1 Teneur en humidité des chapes et réduction du temps de séchage. Bruxelles, CSTC, Les Dossiers du CSTC, n° 3, Cahier 13, 2010.

Centre scientifique et technique de la construction (www.cstc.be)

- C2 NIT 153 Problèmes d'humidité dans les bâtiments. Causes des dégradations. Ponts thermiques. Climat intérieur. Données pour la conception et l'exécution des bâtiments. Conditions d'occupation des bâtiments (1984).
- C3 NIT 178 L'isolation thermique des façades (1989).
- C4 NIT 180 Le traitement curatif du bois dans le bâtiment (1990).
- C5 NIT 188 La pose des menuiseries extérieures (1993).

- C6 NIT 189 Les chapes pour couvre-sols. Partie 1 : matériaux, performances, réception (1993).
- C7 NIT 192 La ventilation des habitations. Partie 1 : principes généraux (1994).
- C8 NIT 199 Les enduits intérieurs. Partie 1 (1996).
- C9 NIT 203 La ventilation des habitations. Partie 2 : mise en œuvre et performances des systèmes de ventilation (1997).
- C10 NIT 210 L'humidité dans les constructions : particularités de l'humidité ascensionnelle (1998, plus d'application).
- C11 NIT 224 Hydrofugation de surface (2002).
- C12 Guide de l'entretien pour des bâtiments durables. Bruxelles, CSTC, 2011.
- C13 Guide pour la restauration des maçonneries. Partie 2 : sels et humidité ascensionnelle. Bruxelles, CSTC, 2003.
- C14 Problèmes d'humidité à l'interface entre la menuiserie et le gros œuvre. Bruxelles, CSTC, Les Dossiers du CSTC, n° 1, Cahier 5, 2014.
- C15 Rapport final HUMIBATI. Recherche collective n° 1017130, 2012 (non publié).

Comité européen de normalisation (www.cen.eu)

- C16 EN 1925 Méthodes d'essai pour pierres naturelles. Détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité. Bruxelles, CEN, 1999.

Confédération Construction (www.confederationconstruction.be)

- C17 Rapport annuel 2010-2011. Bruxelles, Confédération Construction, 2011.

D

De Bie A., Dewilde G., Draelants R., Henderieckx F., Provost M., Venstermans J. et Wagneur M.

- D1 Guide pratique des défauts de construction. Méthodes d'essai *in situ*. Bruxelles, Kluwer Editorial, 2002.

Demberger L.

- D2 Elektro-osmose contra Elektrolyse. Cologne, Baugewerbe, n° 1-2, 1992.

Diaz Gonçalves T.

- D3 Salt Crystallization in Plastered or Rendered Walls. Université technique de Lisbonne, 2007.

Doehne E. et Price C.

- D4 Stone Conservation. An Overview of Current Research. Los Angeles (CA), États-Unis, The Getty Conservation Institute, 2^e édition, 2010.

E

Eeckhout S.

- E1 Formation de moisissures dans les habitations. Bruxelles, CSTC, Infofiche, n° 3, 2004.
- E2 Taux d'humidité hygroscopique des matériaux. Bruxelles, CSTC, Infofiche, n° 4, 2004.
- E3 Condensation superficielle. Bruxelles, CSTC, Infofiche, n° 5, 2004.

English Heritage (www.english-heritage.org.uk)

- E4 Practical Building Conservation. Mortars, Renders & Plasters. Farnham, Royaume-Uni, Ashgate, 2011.

F

Firket L.

- F1 Le séchage des enduits intérieurs. Bruxelles, CSTC, Les Dossiers du CSTC, n° 4, Cahier 11, 2010.

Firket L. et Van Den Bossche T.

- F2 L'humidité dans les bâtiments : causes et remèdes. Bruxelles, CSTC, CSTC-Magazine, n° 2, 1993.

H

Hens H.

H1 Bouwfysica: warmte- en massatransport. Gebouwentechiek. Deel 1. Louvain, Acco, 2003.

Hoste G.

H2 Formation de moisissures dans les habitations. (Pratique). Bruxelles, CSTC, CSTC-Magazine, n° 4, 2000.

H3 Les infiltrations par les cheminées et les pignons. (Pratique). Bruxelles, CSTC, CSTC-Magazine, n° 4, 1995.

L

Lide D.

L1 CRC Handbook of Chemistry and Physics. Boca Raton (FL), États-Unis, CRC Press, 85^e édition, 2005.

Loncour X., Tilmans A., Steskens P. et Roels S.

L2 Isolation des murs existants par l'intérieur : systèmes et dimensionnement. Bruxelles, CSTC, Les Dossiers du CSTC, n° 2, Cahier 4, 2013.

M

Mahieu E.

M1 Drainage d'un mur creux au droit d'un seuil. Bruxelles, CSTC, Infofiche, n° 20, 2006.

M2 Infiltrations d'eau au pied des murs creux. Bruxelles, CSTC, Infofiche, n° 7, 2004.

O

Organisation internationale de normalisation (www.iso.org)

O1 ISO 2811-1:2011 Peintures et vernis. Détermination de la masse volumique. Partie 1 : méthode pycnométrique.

Österreichisches Normungsinstitut (www.austrian-standards.at)

O2 Önorm B 3355-1 Trockenlegung von feuchtem Mauerwerk. Teil 1: Bauwerksdiagnostik und Planungsgrundlagen. Vienne, Österreichisches Normungsinstitut, 2006.

P

Pien A. et Thijs L.

P1 Rénovation des caves. Bruxelles, CSTC, Les Dossiers du CSTC, n° 2, Cahier 18, 2009.

Pien A. et Wagneur M.

P2 Pénétration d'eau au travers de maçonneries de parement en blocs de béton. (Question et réponse). Bruxelles, CSTC, CSTC-Revue, n° 4, Cahier 4, 1990.

S

Salomez L.

S1 Infiltrations d'eau par la menuiserie extérieure. (Pratique). Bruxelles, CSTC, CSTC-Magazine, n° 1, 1995.

T

Tilmans A. et Roels S.

T1 Isolation des murs existants par l'intérieur : diagnostic. Bruxelles, CSTC, Les Dossiers du CSTC, n° 4, Cahier 16, 2012.

V

Van den Bossche P.

V1 Qualité de l'air et logement ancien. Bruxelles, CSTC, Les Dossiers du CSTC, n° 2, Cahier 14, 2011.

Van den Bossche P., Prieus S. et Cootjans P.

V2 Ventilatiegids. Stappenplan voor comfortabel en energiezuinig ventileren. Wavre-Sainte-Catherine/Bruxelles, De Nayer Instituut/CSTC, 2007.

Vanhellemont Y., Van Peer W. et Vernimme N. (éds)

V3 Opleiding restauratievakman moderne bouwchemie. Module injecties van metselwerk. Bruxelles, Vlaams Instituut voor het onroerend erfgoed, 2011.

Vanneste D., Thomas I. et Goossens L.

V4 Enquête socio-économique 2001. Monographie n° 2 : le logement en Belgique. Bruxelles, SPF Économie, P.M.E., classes moyennes et énergie, 2007.

Vergès-Belmin V. et Siedel H.

V5 Desalination of Masonries and Monumental Sculptures by Poulticing: A Review. Freiburg, Restoration of Buildings and Monuments, vol. 11, n° 6, p. 391-408, 2005.

Vlaamse Maatschappij voor Sociaal Wonen (www.vmsw.be)

V6 Bouwtechnische beschrijving B2005. 80 Binnenschilderwerken. Bruxelles, VMSW, 2005 (disponible sur Internet).

W

Wagneur M.

W1 Murs enduits d'un mortier de plafonnage : problème au pied du mur. (Pratique). Bruxelles, CSTC, CSTC-Magazine, n° 1, 1992.

Weber H.

W2 Injektionsverfahren gegen kapillar aufsteigende Feuchtigkeit. Freiburg, Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, vol. 3, n° 5, octobre 1997.

Wittmann F.H.

W3 Kann das Prinzip der Elektrosmose zur Trockenlegung von Mauerwerk angewendet werden? Cologne, Bautenschutz und Bausanierung, n° 4, 1981.

W4 Le potentiel zêta et le transport d'humidité dans les matériaux poreux. Colloque : les remontées d'eau du sol dans les maçonneries. Diagnostic, expériences de contrôle, mise en œuvre. Paris, Section française du Conseil international des monuments et des sites, 25 janvier 1994.

Wittmann F.H. et Boekwijt W.O.

W5 Grundlage und Anwendbarkeit der Elektrosmose zum Trocknen durchfeuchteten Mauerwerks. Berlin, Bauphysik, n° 4, 1982.

Wittmann F.H., Madra S. et Ferraris C.

W6 Versuche zur Mauertrocknung durch Elektrosmose. Zürich, Bau, n° 2, 1984.

Editeur responsable : Jan Venstermans
CSTC, Rue du Lombard 42
1000 Bruxelles

Recherche • Développe • Informe

Principalement financé par les redevances de quelque 85.000 entreprises belges représentant la quasi-majorité des métiers de la construction, le CSTC incarne depuis plus de 50 ans le centre de référence en matière scientifique et technique, contribuant directement à l'amélioration de la qualité et de la productivité.

Recherche et innovation

L'introduction de techniques innovantes est vitale pour la survie d'une industrie. Orientées par les professionnels de la construction, entrepreneurs ou experts siégeant au sein des Comités techniques, les activités de recherche sont menées en parfaite symbiose avec les besoins quotidiens du secteur.

Avec l'aide de diverses instances officielles, le CSTC soutient l'innovation au sein des entreprises, en les conseillant dans des domaines en adéquation avec les enjeux actuels.

Développement, normalisation, certification et agréation

A la demande des acteurs publics ou privés, le CSTC réalise divers développements sous contrat. Collaborant activement aux travaux des instituts de normalisation, tant sur le plan national (NBN) qu'europpéen (CEN) ou international (ISO), ainsi qu'à ceux d'instances telles que l'Union belge pour l'agrément technique dans la construction (UBATc), le Centre est idéalement placé pour identifier les besoins futurs des divers corps de métier et les y préparer au mieux.

Diffusion du savoir et soutien aux entreprises

Pour mettre le fruit de ses travaux au service de toutes les entreprises du secteur, le CSTC utilise largement l'outil électronique. Son site Internet adapté à la diversité des besoins des professionnels contient les ouvrages publiés par le Centre ainsi que plus de 1.000 normes relatives au secteur.

La formation et l'assistance technique personnalisée contribuent au devoir d'information. Aux côtés de quelque 650 sessions de cours et conférences thématiques impliquant les ingénieurs du CSTC, plus de 26.000 avis sont émis chaque année par la division Avis techniques.

SIÈGE SOCIAL

Rue du Lombard 42, B-1000 Bruxelles
Tél. 02/502 66 90
Fax 02/502 81 80
E-mail : info@bbri.be
Site Internet : www.cstc.be

BUREAUX

Lozenberg 7, B-1932 Sint-Stevens-Woluwe
Tél. 02/716 42 11
Fax 02/725 32 12

- Avis techniques – Publications
- Gestion – Qualité – Techniques de l'information
- Développement – Valorisation
- Agréments techniques – Normalisation

STATION EXPÉRIMENTALE

Avenue Pierre Holoffe 21, B-1342 Limelette
Tél. 02/655 77 11
Fax 02/653 07 29

- Recherche et innovation
- Formation
- Bibliothèque

CENTRE DE DÉMONSTRATION ET D'INFORMATION

Marktplein 7 bus 1, B-3550 Heusden-Zolder
Tél. 011/22 50 65
Fax 02/725 32 12

- Centre de compétence TIC pour les professionnels de la construction (ViBo)
- Centre d'information et de documentation numérique pour le secteur de la construction et du béton (Betonica)

BRUSSELS MEETING CENTRE

Boulevard Poincaré 79, B-1060 Bruxelles
Tél. 02/529 81 29