

REVUE DES STANDARDS INTERNATIONAUX POUR LE CONTROLE DE L'HUMIDITE PAR LA SIMULATION HYGROTHERMIQUE DE L'ENVELOPPE

Hartwig M. Künzels¹, Christoph Mitterer¹, Florian Antretter¹ et Amandine Piot¹

¹Fraunhofer IBP, Valley, Allemagne

Auteur correspondant (hartwig.kuenzel@ibp.fraunhofer.de)

Résumé : La durabilité des constructions modernes ou traditionnelles est étroitement liée aux conditions de température et d'humidité dans la structure. L'eau est un facteur clé dans la dégradation par corrosion, croissance de micro-organismes, pourriture ou gel. Pour prévoir l'effet du climat sur la construction, il est utile d'étudier la performance hygrothermique de l'ensemble des composants du bâtiment concerné. Ceci peut être fait soit par des mesures, soit à l'aide d'outils de simulation dynamique. Alors que les mesures ne donnent que l'état actuel, la modélisation permet de prévoir l'évolution si la construction ou l'usage est modifié. Pour ces raisons, des efforts ont été faits au niveau international pour modéliser les transferts de chaleur et d'humidité dans l'enveloppe du bâtiment et pour fournir des règles permettant d'éviter les dégradations et les problèmes d'hygiène. Un axe de développement est l'incorporation des interactions entre l'enveloppe et le volume dans des modèles de bâtiment. Outre une meilleure évaluation du confort, cela permet d'optimiser les composants de l'enveloppe pour éviter les dommages liés à l'humidité. Néanmoins, l'objectif principal de telles modélisations est l'optimisation énergétique associée au confort des occupants. Cet article traite des charges hygrothermiques (internes et externes) agissant sur la construction et les modèles nécessaires pour les prendre en compte. Les données d'entrée sont résumées et des recommandations concernant l'évaluation et l'interprétation des résultats sont données.

1. Introduction

Le contrôle de l'humidité est devenu un sujet de préoccupation mondial en raison de l'évolution des pratiques de construction et d'exploitation du bâtiment. La nécessité d'économiser l'énergie a abouti à améliorer l'isolation et l'étanchéité à l'air de l'enveloppe, ce qui la rend plus sensible à l'humidité que les constructions traditionnelles. La demande pour plus de confort a accru le nombre de systèmes de chauffage et de conditionnement d'air. Cependant, si l'enveloppe n'a pas été conçue pour supporter ces nouveaux gradients de température et de pression de vapeur, de la condensation ou des moisissures peuvent apparaître. Pour autant, les bâtiments traditionnels ne peuvent survivre que si l'on souhaite les occuper, ce qui signifie que la maintenance et l'exploitation de ces bâtiments doit conserver un coût abordable, tout en garantissant des conditions de confort et d'hygiène modernes.

Une gestion adéquate de l'humidité est un prérequis pour garantir l'absence de dommages des nouvelles constructions ou en réhabilitation. Il n'est toutefois pas possible d'établir des règles générales, en raison du nombre de paramètres impliqués dans le contrôle de l'humidité (conditions climatiques locales, types de construction) qui varient en fonction des pays. C'est pourquoi un effort scientifique important a été fourni pour développer des modèles hygrothermiques permettant de prévoir les conditions de température et d'humidité dans les parois, la toiture... Cet article décrit l'évaluation de la performance hygrothermique des bâtiments (modernes ou traditionnels) à l'aide de ces modèles en s'appuyant sur des standards internationaux.

2. Charges hygrothermiques

La fonction principale d'un bâtiment est d'assurer la protection d'un espace clos contre les intempéries. La Figure 1 représente schématiquement les charges hygrothermiques agissant sur l'enveloppe dans le cas d'un mur extérieur. Les variations journalières en surface extérieure sont souvent très importantes, mais sont peu propagées vers l'intérieur. De jour, le rayonnement solaire chauffe la surface, conduisant à une évaporation de l'humidité en surface. Au coucher du soleil, le rayonnement courte longueur d'ondes cesse, et l'émission en grande longueur d'ondes (infra-rouge) peut conduire à un sur-refroidissement (température de surface inférieure à la température d'air) pour les enveloppes bien isolées, favorisant l'apparition de condensation sur la façade. Toutefois, si la paroi est exposée à la pluie, la quantité d'eau impliquée est prédominante. De manière générale, plusieurs types de cycles se superposent, comme l'alternance hiver/été, jour/nuit, pluie/soleil. Une analyse détaillée des charges doit donc être menée avant de concevoir un nouveau bâtiment ou de rénover une construction traditionnelle.

La température et l'humidité ambiante (pression de vapeur) constituent les conditions aux limites affectant en permanence les deux côtés de l'enveloppe. Les conditions extérieures dépendent du climat dont l'effet peut être étudié en choisissant des données météorologiques représentatives pour l'emplacement du bâtiment.

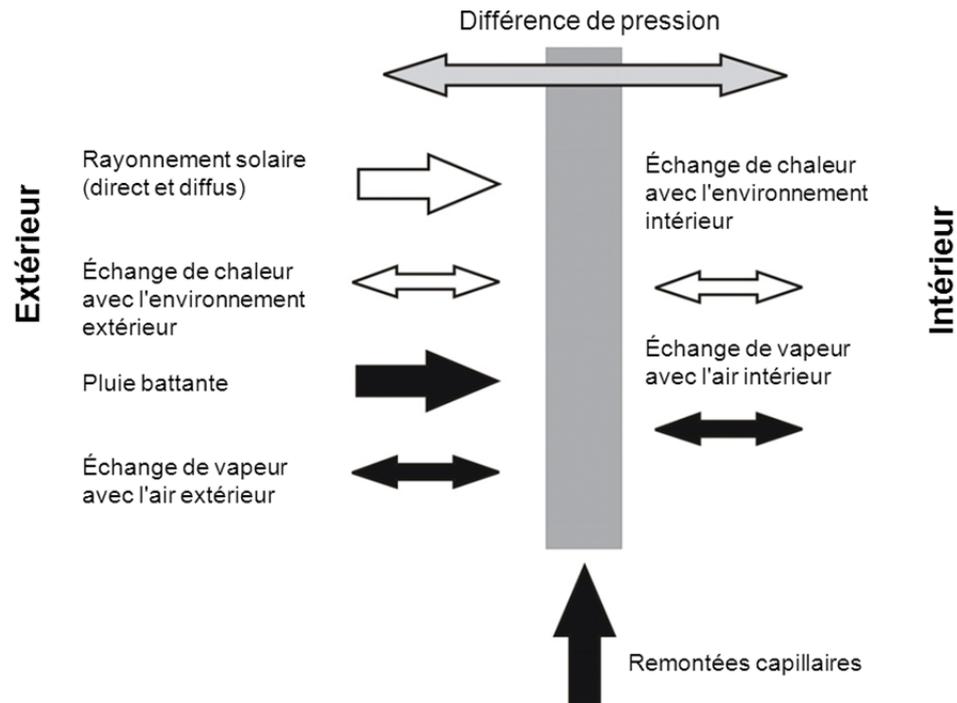


Figure 1: représentation schématique des phénomènes hygrothermiques agissant sur l'enveloppe et de leur alternance diurne ou saisonnière [1]

Le climat interne dépend de l'usage du bâtiment. Il est contrôlé pour maintenir le confort des occupants ou s'adapter au mobilier ou objets qu'il abrite. Mais il peut représenter une charge plus importante que le climat extérieur, en particulier en cas de forte production de vapeur. Pour la plupart des constructions tertiaires la température et l'humidité sont contrôlées par des systèmes de chauffage, ventilation, climatisation (CVC) dont les points de réglages sont connus. Le climat intérieur des bâtiments résidentiels est influencé par le comportement des occupants. Un ménage moyen peut générer jusqu'à 10 litres de d'eau (vaporisée) par jour. Cette humidité doit être évacuée par la ventilation ou un système de conditionnement d'air pour assurer l'hygiène et le confort. Des enquêtes sur le climat intérieur ont été menées dans plusieurs pays européens pour définir un climat intérieur représentatif, dépendant de la température extérieure (WTA 6-2 [2], EN 15026 [3]).

3. Modèles de simulation hygrothermique

La prévision du comportement hygrothermique est indispensable pour assurer une construction durable et sans dommages. Par le passé, cette prévision se faisait par l'expérimentation, l'expérience pratique ou des outils de calculs simplifiés, comme la méthode de calcul du point de rosée en régime permanent [4]. Aujourd'hui, il existe plusieurs outils de calcul dynamiques (Trechsel [5]) qui fournissent des résultats fiables s'ils respectent certaines spécifications. Celles-ci ont été inscrites dans plusieurs standards internationaux, comme le guide WTA 6-2 [2], la norme EN 15026 [3] ou l'ASHRAE Std. 160 [6].

3.1. Simulation hygrothermique dynamique de l'enveloppe

Pour satisfaire les exigences de ces standards, les modèles de calcul doivent tenir compte des phénomènes suivants :

- stockage de chaleur dans le matériau sec et dans l'humidité qu'il contient
- transport de chaleur par conduction et conductivité thermique en fonction de l'humidité
- transfert de chaleur latente par diffusion de vapeur avec changement de phase (évaporation/condensation)
- stockage d'humidité par sorption de vapeur et rétention capillaire
- transport de vapeur par diffusion
- transport d'eau liquide par diffusion surfacique et conduction capillaire

Pour illustrer l'implémentation de ces phénomènes, les équations différentielles utilisées dans le modèle bien connu WUFI® [7] sont présentées ci-dessous :

Bilan en humidité : (1)

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{\phi} \nabla \phi + \delta_p \nabla (\phi p_{sat}))$$

Bilan énergétique : (2)

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + h_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla (\phi p_{sat}))$$

Avec:

ϕ humidité relative, t temps, T température, w teneur en eau, p_{sat} pression de vapeur saturant, λ conductivité thermique, H enthalpie, D_{ϕ} coefficient de conduction liquide, δ_p perméabilité à la vapeur, h_v chaleur latente de vaporisation.

Le terme de gauche dans le bilan en humidité décrit le stockage d'humidité qui est proportionnel à la pente de la courbe de sorption ($\partial w / \partial \Phi$). Le terme de transport (à droite de l'égalité) est décrit par la divergence des flux liquide et vapeur. La pression de vapeur ($p_v = \Phi \cdot p_{sat}$), force motrice du flux de vapeur, est fortement influencée par la température ($p_{sat} \sim \exp(T)$), alors que le flux de liquide est gouverné par les forces capillaires, dépendant seulement de l'humidité relative Φ (loi de Kelvin). Le produit de la divergence du flux de vapeur par la chaleur latente de vaporisation représente le terme de chaleur latente dans le membre droit du bilan énergétique. Le terme de chaleur sensible est représenté par la divergence de la conduction de chaleur. Le terme de stockage (à gauche), décrit comme la dérivée de l'enthalpie totale, tient compte de l'enthalpie du matériau sec plus celle de l'eau absorbée, variant selon son état (solide, liquide, gazeux).

3.2. Données d'entrée et résultats

La conduite de simulations hygrothermiques, ainsi que les données d'entrée et les sorties attendues, sont présentées dans le diagramme de la Figure 2, issue du projet de norme prEN 15026 [8]. Premièrement, c'est la composition et l'exposition (orientation, inclinaison) de la paroi étudiée qui doivent être données. Ensuite, les caractéristiques des matériaux, qui peuvent provenir d'une base de données, doivent être renseignées, notamment :

- Masse volumique ρ [kg/m³], sert à convertir la chaleur spécifique massique en volumique.
- Chaleur spécifique massique c [J/(kgK)].
- Conductivité thermique λ [W/(mK)] à sec, et sa dépendance à l'humidité.
- Porosité ε [m³/m³], qui détermine la teneur en eau maximale W_{max}
- La fonction de stockage d'humidité, c'est à dire l'isotherme de sorption resp. de succion $w = f(\phi)$ [kg/m³]. Elle donne la teneur en eau à l'équilibre du matériau en fonction de l'humidité relative, dans le domaine hygroscopique et capillaire (super-hygroscopique).
- Perméabilité à la vapeur [kg/(m²sPa)], qui peut dépendre de l'humidité de l'air.
- Diffusivité liquide D_w [m²/s], pour l'absorption et la redistribution/séchage du matériau, fonction de la teneur en eau. On obtient le coefficient de conduction de l'eau liquide D_{ϕ} en multipliant D_w par la pente de la courbe de sorption.

Si un transfert d'eau liquide a lieu, il peut excéder le transfert de vapeur de plusieurs ordres de grandeur. Il faut donc le prendre en compte soigneusement quand il peut exister, par exemple en cas de pluie battante sur un mur creux ou massif en pierre naturelle. À la différence de la conduction thermique ou de la diffusion de vapeur, le transport liquide est fortement non-linéaire, car la diffusivité liquide croît en général exponentiellement avec la teneur en eau. La figure 3 présente les courbes de diffusivité liquide pour une brique silico-calcaire (CSB), typiques pour les matériaux de construction minéraux. La diffusivité utilisée pour simuler l'absorption d'eau varie d'un facteur presque 1000 entre la teneur en eau à 80% d'humidité relative (w_{80}) et la teneur en eau à saturation capillaire (w_f). On voit donc que le transport liquide peut être très important aux fortes humidités, et décroître rapidement quand le matériau sèche.

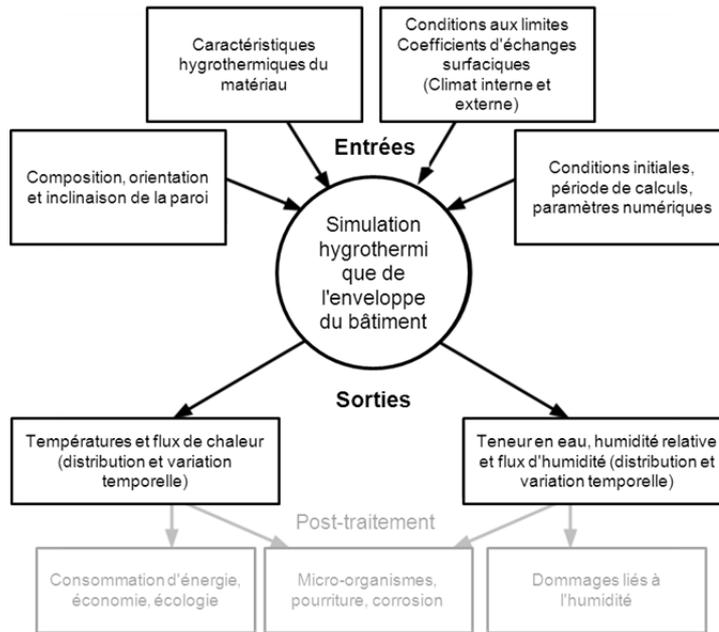


Figure 2 : Diagramme de flux pour les simulations hygrothermiques, d'après le projet de norme prEN 15026 [8]. Ce diagramme ne figure pas dans la norme finale car les diagrammes sont déconseillés dans les normes européennes en raison des difficultés de traduction qu'ils posent.

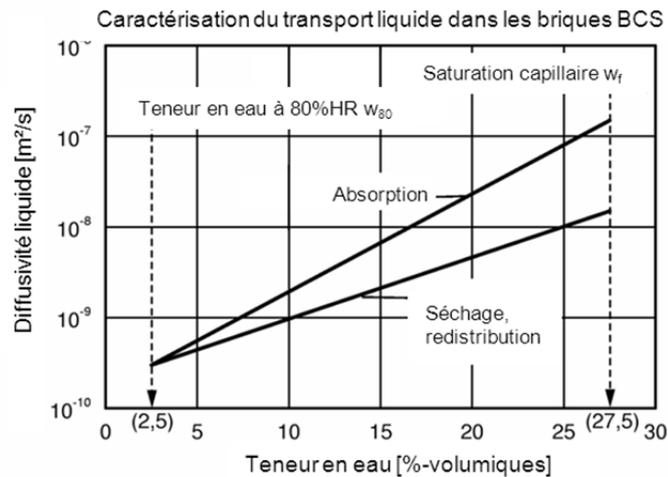


Figure 3 : Courbes approximées à partir de mesures par RMN, tests d'absorption et de redistribution d'eau, pour une brique silico-calcaire (CBS), utilisée en parement ou en maçonnerie. Deux valeurs de diffusivité différentes sont utilisées pour l'absorption et le séchage. Ces valeurs varient exponentiellement avec la teneur en eau du matériau (échelle des ordonnées logarithmique).

Après les matériaux et leurs caractéristiques, ce sont les conditions aux limites qu'il faut choisir. Pour pouvoir effectuer une simulation réaliste du comportement hygrothermique de paroi exposées au climat extérieur, les paramètres suivants doivent être fournis :

- Température d'air extérieure
- Humidité relative extérieure
- Rayonnement courtes longueurs d'ondes (solaire direct et diffus)
- Rayonnement grandes longueurs d'ondes (voûte céleste)
- Précipitations
- Vitesse et direction du vent
- Température d'air intérieure
- Humidité relative intérieure

En raison de variations potentiellement rapides, les données météorologiques doivent généralement être fournies au pas de temps horaire. Selon l'objectif poursuivi, il peut être judicieux de choisir une année extrême plutôt qu'une année moyenne (par exemple une « Test Reference Year ») habituellement utilisée pour les calculs énergétiques. Le climat intérieur présente des variations habituellement moins rapides, on peut donc souvent utiliser des valeurs moyennes journalières voire mensuelles.

Le dernier bloc d'entrées dans la figure 2 contient les conditions initiales et les paramètres du calcul (durée, précision numérique...) La distribution de température dans le composant s'adapte normalement très vite aux conditions aux limites, une température homogène dans l'ensemble du composant proche de la moyenne attendue est donc un bon point de départ. En revanche, les transferts d'humidité sont bien plus lents, une distribution initiale réaliste des teneurs en eau peut être nécessaire. Si une humidité de construction existe, elle doit être prise en compte. Pour des matériaux « normalement secs », un point de départ raisonnable est la teneur en eau pour une humidité relative de 80% (moyenne du climat extérieur dans de nombreuses régions).

La figure 2 présente deux blocs de résultats, comprenant les flux de chaleur et d'humidité, ainsi que les distributions spatiale et temporelle de la température, de l'humidité relative et du taux d'humidité. Ils peuvent être tracés comme un profil (« en coupe ») à un instant donné, ou bien comme variation en fonction du temps à un point donné (voir Figure 4). On peut également les présenter sous forme d'une animation présentant pas par pas les valeurs au sein de la paroi. Il convient ensuite d'interpréter les résultats, ce qui requiert en général une certaine expertise.

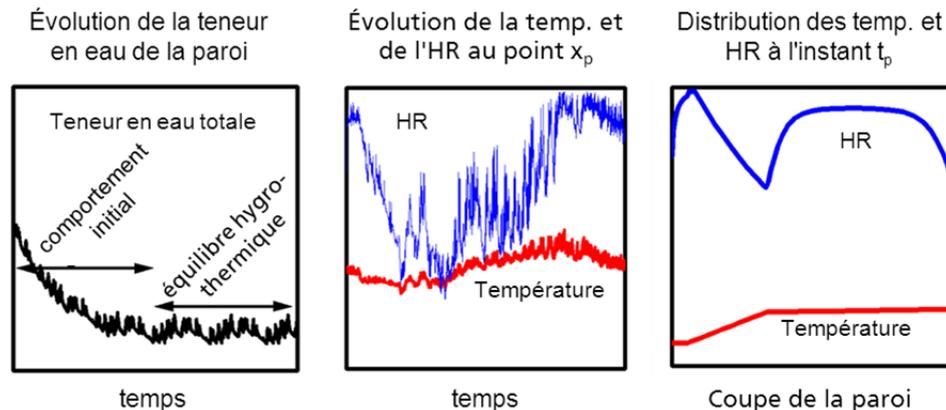


Figure 4: Exemples de résultats typiques. Variation en fonction du temps du taux d'humidité global de la paroi (à gauche), et de la température et de l'humidité relative en un point (milieu). Les mêmes grandeurs sont tracées pour une coupe de la paroi à un instant donné (à droite).

3.3. Combinaison des simulations thermiques de bâtiment et des calculs hygrothermiques dans l'enveloppe

Le comportement hygrothermique de l'enveloppe d'un bâtiment influe sur toute la performance du bâtiment. Les flux de chaleur et d'humidité au travers de l'enveloppe sont ajoutés au modèle zonal, prenant en compte les charges internes et le système CVC. La combinaison des modèles de simulation thermique de bâtiment et de calculs hygrothermiques des parois peut améliorer les simulations énergétiques, car les charges latentes, et leur répartition temporelle, peuvent être déterminées plus précisément. L'impact de l'humidité sur la consommation d'énergie, comme par exemple l'effet de l'humidité de construction, peut être mis en évidence. L'effet de tampon hygroscopique des matériaux sur les conditions climatiques internes peut être évalué, par exemple pour la stabilisation passive du climat dans des bâtiments historiques. L'humidité influence également le confort ressenti par les usagers. Seule une modélisation précise de ces phénomènes permet une amélioration globale du confort thermique. Enfin, il est toujours nécessaire d'éviter les dommages liés à l'humidité, comme la pourriture des matériaux, la corrosion ou les moisissures. Une approche combinant la modélisation du bâtiment et l'évaluation de ses composants couvre l'ensemble de ces champs et permet d'assurer une qualité globale y compris dès la phase de conception. La Figure 5 présente le principe d'une telle combinaison où les équations pour le volume intérieur et les éléments de l'enveloppe doivent être résolues simultanément.

Plusieurs modèles ont été développés ces dernières années, avec des exemples de validations encore limités [16]. Le modèle employé dans cet article est dénommé WUFI@Plus [14], et est basé sur le modèle WUFI [7].

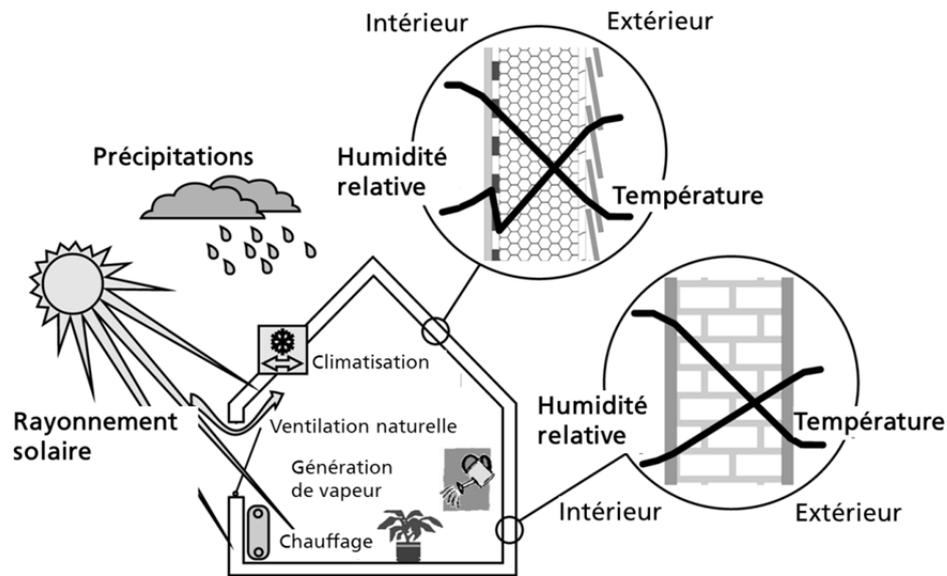


Fig. 5 : Principe du couplage pour la prise en compte simultanée des effets des charges internes, du climat extérieur et du comportement dynamique de l'enveloppe.

Pour chaque composant de l'enveloppe, les température et humidité de surface (ou resp. flux de chaleur et d'humidité) sont déterminées à l'aide des équations (1) et (2). Les conditions climatiques intérieures nécessaires peuvent être établies à partir des équations (3) et (4). En raison du fort couplage entre les deux jeux d'équations ceux-ci sont résolus itérativement.

Les outils de simulation thermique étant largement répandus, l'équation ne sera pas expliquée en détails. La température intérieure θ_i est fonction des flux de chaleur entrant, c'est à dire non seulement les flux au travers l'enveloppe (transmission, rayonnement solaire), mais aussi les charges internes, les échanges d'air par la ventilation (naturelle ou liée aux systèmes). Le bilan énergétique est donné par l'équation suivante :

Bilan énergétique du volume :

$$\rho \cdot c \cdot V \cdot \frac{d\theta_i}{dt} = \sum_j A_j \alpha_j (\theta_j - \theta_i) + \dot{Q}_{sol} + \dot{Q}_{il} + n \cdot V \cdot \rho \cdot c \cdot (\theta_a - \theta_i) + \dot{Q}_{vent} \quad (3)$$

Avec :

ρ : masse volumique de l'air [kg/m^3], α_j : coefficient d'échange convectif [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$], θ_a : température d'air extérieur [K], θ_j : température de surface de la paroi j [K], θ_i : température d'air intérieur [K], t : temps [s], A_j : surface de la paroi j [m^2], c : chaleur spécifique de l'air [J/kgK], n : taux de renouvellement d'air [h^{-1}], Q_{sol} : rayonnement solaire échauffant directement l'air intérieur ou l'ameublement [W], Q_{il} : charges internes (occupants, éclairage, équipement) [W], Q_{vent} : flux de chaleur lié à la ventilation [W], V : volume [m^3]

L'humidité dans le volume résulte des flux d'humidité au travers des parois, de l'humidité générée par l'occupation, et des échanges par ventilation (infiltration, ventilation naturelle ou mécanique).

Bilan en humidité du volume :

$$V \cdot \frac{dc_i}{dt} = \sum_j A_j \dot{g}_{w,j} + n \cdot V (c_a - c_i) + \dot{W}_{imp} + \dot{W}_{vent} + \dot{W}_{HVAC} \quad (4)$$

Avec :

c_a : humidité absolue dans l'air extérieur [kg/m^3], c_i : humidité absolue dans l'air intérieur [kg/m^3], $g_{w,j}$: flux d'humidité en surface de la paroi j [$\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m}^2$], W_{imp} : production de vapeur [kg/h], W_{vent} : flux d'humidité lié à la ventilation [kg/h], W_{HVAC} : flux d'humidité lié au système CVC [kg/h]

Pour modéliser l'ensemble du bâtiment, les composants (parois, etc.) sont connectés à un modèle zonal du bâtiment complet. Des paramètres complémentaires sont nécessaires, comme par exemple le rayonnement

solaires au travers des vitrages, la performance des systèmes ou la régulation de la ventilation. De plus, les charges internes liées aux occupants et équipements sont prises en compte dans le bilan, ce qui permet d'évaluer la qualité de l'air. Le climat interne étant le résultat de ces simulations, il faut définir précisément aussi bien les charges internes que les points de réglage des systèmes. On peut supposer un système CVC idéal ou réel, à partir duquel le climat interne est calculé.

À partir de l'ensemble de ces paramètres, les résultats de simulation permettent d'évaluer l'environnement intérieur du bâtiment, le confort, mais aussi la consommation d'énergie, ou de déterminer le meilleur mode de pilotage des systèmes CVC.

3.4. Évaluation et interprétation des résultats

Avant l'interprétation, la plausibilité des résultats doit être vérifiée. Les données d'entrée, ainsi que les résultats, doivent être tracés pour détecter les incohérences. Lorsque cela est possible, les résultats doivent être comparés à des données expérimentales. Si les résultats de calcul ne correspondent pas à l'expérience pratique, on doit répéter les calculs en modifiant, par exemple, le maillage, le pas de temps, ou d'autres paramètres clés. Si les résultats paraissent vraisemblables, l'interprétation peut commencer.

Premièrement, on vérifie si les variations de température et d'humidité en fonction du temps excèdent les limites spécifiées pour chacun des matériaux. Ensuite, on analyse les variations annuelles d'humidité du composant. Si la paroi est initialement humide, elle doit sécher. L'accumulation continue d'humidité est habituellement un signe de défaillance et implique de revoir la conception de la paroi. Ces critères sont parfois insuffisants pour garantir la pérennité du bâti. Des modèles de traitement des résultats (post-processus) peuvent être nécessaires pour l'évaluation. La figure 2 présente (blocs en gris) des exemples de tels modèles utilisant les résultats de simulation hygrothermique pour évaluer différents critères de performance comme la consommation d'énergie, le risque de corrosion, de moisissure etc. Un autre aspect important est le vieillissement des matériaux, qui peut altérer les performances d'ensemble. À ce jour, peu de modèles de ce type ont été développés et validés expérimentalement. On peut citer le modèle bio-hygrothermique de Sedlbauer [9] qui évalue le risque de croissance de moisissure en tenant compte du comportement dynamique d'un spore en fonction de l'humidité en surface du matériau.

4. Validation des modèles de simulation hygrothermique

4.1. Exemple de validation pour une paroi : Simulation d'une paroi en maçonnerie

Pour valider les outils de simulation, des données expérimentales fiables sont nécessaires, si possible obtenues dans des conditions climatiques naturelles. La mesure en continu des conditions aux limites (climats intérieur et extérieur) est indispensable, de même que la détermination des caractéristiques des matériaux. L'essai présenté ici a été mené en respectant ces règles, dans le cadre d'un projet sur la préservation des monuments historiques. Pour étudier l'évolution de l'humidité dans les murs en pierre naturelle, des échantillons de grès ont été exposés d'un côté au climat extérieur, de l'autre à un climat intérieur contrôlé. Les paramètres météorologiques ont été mesurés toutes les heures, en plus de la pluie battante mesurée directement sur le mur à l'aide de pluviomètres intégrés. Ces échantillons ont été régulièrement extraits de leur mur support pour être pesés afin d'en déterminer la teneur en eau. À plusieurs reprises, un balayage par scanner à résonance magnétique nucléaire a été effectué pour visualiser la distribution de l'humidité dans le matériau.

La figure 6 présente la comparaison entre les mesures et les résultats de calcul. Le graphe du haut montre l'évolution du taux d'humidité total pour 3 échantillons du même matériau (grès « Sander ») et pour la simulation. Les augmentations brusques d'humidité sont liées à l'absorption de pluie, suivie d'un séchage plus lent. Le graphe du bas présente la distribution de l'humidité dans la profondeur du matériau, mesurée et calculée, à deux dates distinctes. Les courbes montrant la variation en fonction du temps, autant que celles présentant la distribution spatiale, présentent des résultats en accord avec les mesures, et montrent que les résultats du modèle sont fiables. On peut remarquer cependant que ces résultats ont été obtenus dans un cas où les propriétés du matériau sont connues avec exactitude, et les conditions climatiques mesurées sur place. De plus, le grès, de part son mode de formation, est un matériau idéal en terme d'homogénéité et de variabilité, ce qui signifie que ses propriétés hygrothermiques en particulier ne varient que peu au sein du matériau.

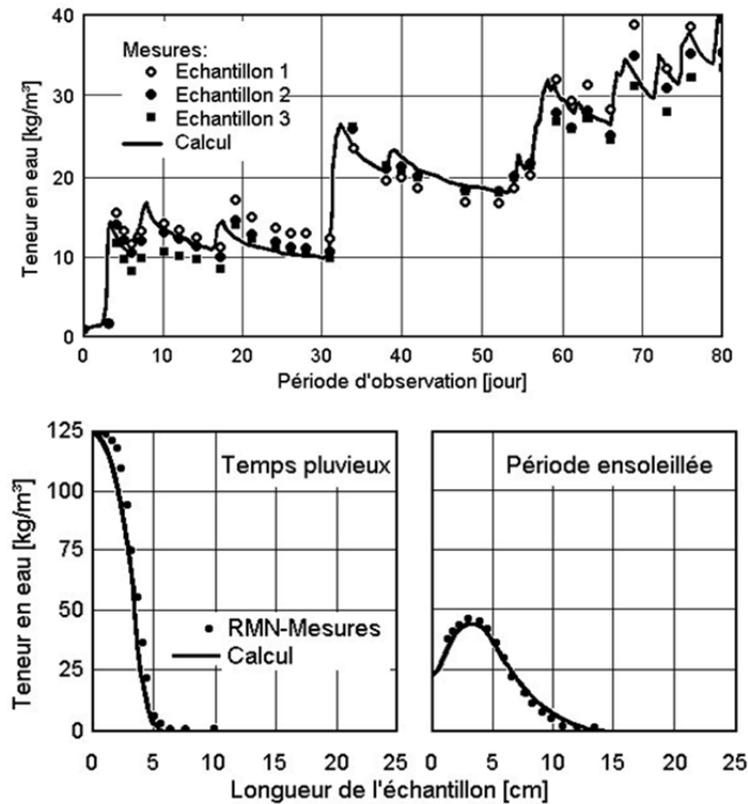


Figure 6 : Haut : variation en fonction du temps de la teneur en eau totale des échantillons (déterminée par pesée) et calculée. Bas : distribution de l'humidité dans les échantillons (déterminée par RMN) et calculée, à deux dates.

Les résultats étant positifs, le modèle peut être utilisé pour étudier les cas de murs plus épais (les tests ont été réalisés sur des échantillons de 25cm d'épaisseur), comme c'est la cas habituellement des murs en grès. Des simulations pour un mur en grès de 60cm d'épaisseur ont donc été faites. L'objectif était de déterminer le profil moyen de température et d'humidité dans une telle paroi, pour appuyer ensuite des analyses de processus de dégradation et des mesures de restauration. Les calculs ont donc été effectués en répétant les données climatiques annuelles jusqu'à ce qu'un équilibre dynamique soit atteint. Les principaux problèmes étant liés à la pluie, c'est une orientation ouest qui a été choisie. La figure 7 présente le profil moyen et l'enveloppe de la variation, au cours de l'année, de la température et de la teneur en eau. La température en surface dépasse parfois 40°C en raison de la couleur beige sombre du matériau. La plus faible température correspond aux jours les plus froids d'hiver. La variation de température est atténuée en allant vers l'intérieur. La température moyenne (ligne continue épaisse) forme une ligne droite entre les températures moyennes extérieure et intérieure, les transferts de chaleur étant décrits par une équation différentielle linéaire.

Il est est autrement de la courbe du bas de la figure 7. Tout d'abord, les variations de la teneur en eau n'atteignent pas le côté intérieur du mur, l'influence du climat ne pénètre en fait que jusqu'à environ un tiers du mur. La forme de la courbe moyenne annuelle n'est pas une ligne droite. Comme pour la température, les variations sont les plus importantes en surface, en raison des alternances pluie/soleil. Mais la moyenne reste inférieure à 3%-volumiques, similaire à ce qu'on observe en face interne. Quelques millimètres derrière la surface extérieure, la teneur en eau moyenne augmente fortement, jusqu'à atteindre environ 7%-volumiques à 5cm de la surface. Ce phénomène est dû à la dépendance forte et non linéaire du transport d'eau liquide à la teneur en eau (voir la diffusivité liquide présentée figure 3).

Les conséquences de ce comportement pour un matériau poreux sont variées. Les dommages sont souvent dus à des dilatations dans la micro-structure des matériaux liées à l'expansion de l'eau en cas de gel ou à la cristallisation de sels. Le risque de gel, en particulier, s'accroît avec la teneur en eau. Ceci peut expliquer pourquoi c'est souvent sous la surface, et non en surface directement, que les dommages sont les plus importants, ce qui conduit à des décollements ou une délamination du matériau. À l'inverse, cet effet peut être positif. L'eau de pluie atteignant la surface est ainsi conduite vers l'intérieur du matériau, où les micro-organismes ne peuvent se développer, contrairement à la surface. Le développement d'algues et de micro-

organismes en surface des parois extérieures isolées est un problème de plus en plus prégnant, lié directement aux mesures d'économie d'énergie [10].

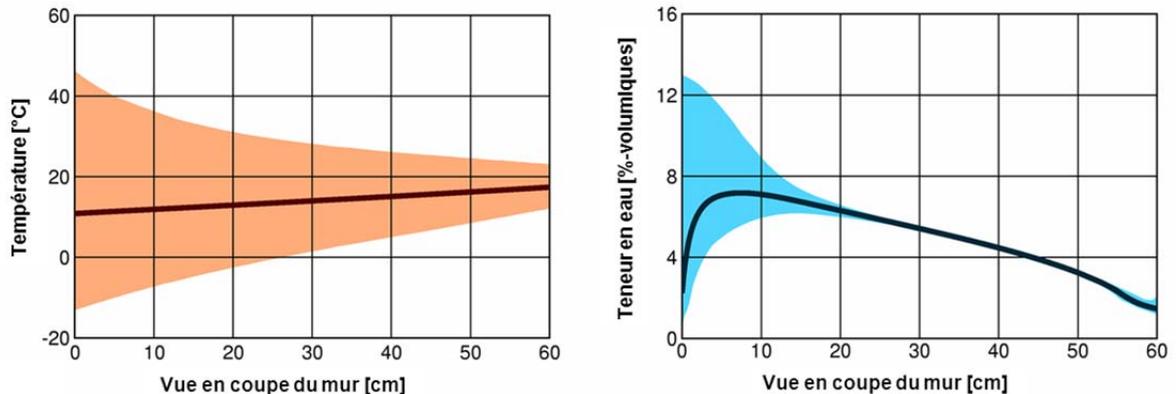


Figure 7 : Enveloppe de variation annuelle (zone colorée) et valeur moyenne (ligne épaisse) de la température et de la teneur en eau dans un mur en grès Sander. Ces résultats sont obtenus en effectuant cycliquement les calculs avec les mêmes données climatiques jusqu'à ce qu'un équilibre dynamique soit atteint, c'est à dire que la moyenne annuelle ne varie plus d'une année sur l'autre.

4.2. Exemple de validation d'un modèle global de bâtiment : effet de tampon hygroscopique

Il n'existe pas de norme concernant la validation d'un modèle hygrothermique global de bâtiment. Les performances de différents modèles ont été comparées lors de l'annexe 41 de l'AIE, dont WUFI®Plus [16]. L'exercice de comparaison incluait des modèles détaillant les transferts couplés chaleur/humidité, et d'autres utilisant un simple modèle de tampon hygroscopique. Une validation rigoureuse est documentée dans [17].

Nous présentons dans cet article une validation expérimentale de WUFI®Plus, sur un cas de chambre climatique tapissée de revêtements hygroscopiques. La modélisation de cette expérimentation permet de valider la partie hygrique du modèle. Dans un premier temps, les résultats de modélisation ont été comparés aux mesures effectuées dans la chambre climatique sans revêtement hygroscopique. Cela permet de valider le modèle de zone, puisqu'il n'y a pas d'échange d'humidité avec les parois. La figure 8 (à gauche) présente les résultats de mesures et de calcul de l'humidité relative. Les deux courbes sont très proches, seul le premier pic d'humidité relative est légèrement sous-estimé par le modèle.

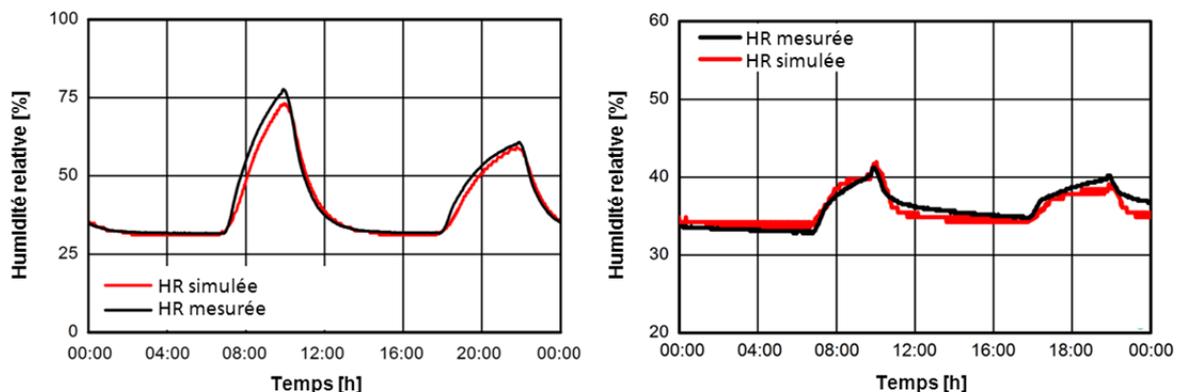


Figure 8 : Gauche: modélisation de la chambre climatique vide et mesures; droite: modélisation de la chambre climatique avec revêtement hygroscopique.

Les résultats du modèle sont également très proches des mesures dans le cas où les parois de la chambre climatique sont revêtues d'un parement hygroscopique (figure 8, droite). L'atténuation des variations de l'humidité relative est bien rendue par le modèle. Ce résultat n'est possible que si les conditions aux limites sont très précisément entrées dans le modèle.

5. Exemple d'utilisation

L'exemple d'utilisation suivant dérive directement des résultats de validation précédemment décrit. Une fois la validation réalisée, on peut analyser les résultats et généraliser l'usage du modèle au cas de scénarios d'occupation réels. On obtient ainsi l'évaluation de la consommation d'énergie et le niveau de confort attendu, ainsi que le comportement hygrothermique détaillé des composants de l'enveloppe.

L'analyse s'effectue pour huit zones climatiques aux États-Unis. Le même modèle d'une pièce (une fois équipée de revêtements hygroscopiques sur un mur et le plafond, une fois seulement de plaques de plâtre peintes) est simulé pour les conditions climatiques de Anchorage, Atlanta, Baltimore, Chicago, Fargo, Miami, Minneapolis et Phoenix, conformément aux recommandations de l'ASHRAE [15]. Le local modélisé comporte une zone de 230 m³ de volume, et une surface au sol de 97 m². La paroi nord comporte 5,4 m² de vitrage, la paroi sud 9 m². Le taux de renouvellement d'air est de 0,5 vol/h, pour un taux de production de vapeur de 7,5 kg, réparti sur la journée selon un scénario d'occupation de logement. On évalue la durée pendant laquelle l'humidité relative est comprise entre 35% et 75%, puis la consommation annuelle pour l'humidification/déshumidification qui serait nécessaire pour maintenir ce climat.

L'efficacité du revêtement hygroscopique dépend du climat extérieur, de l'usage du local et du système CVC. La figure 9 montre qu'on observe un effet positif dans les 8 zones climatiques, c'est à dire un accroissement de la durée où l'humidité relative est comprise entre 35% et 75%.

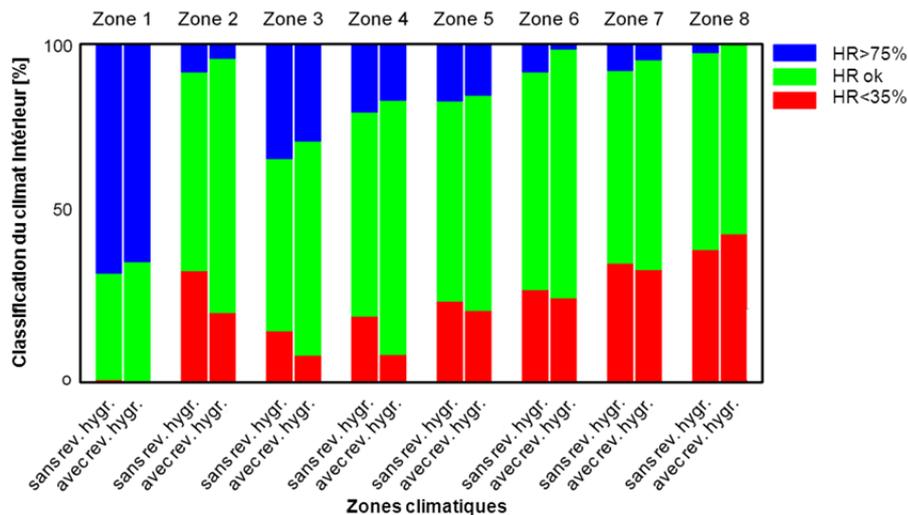


Figure 9 : Évaluation du climat intérieur pour huit zones climatiques aux États-Unis, avec et sans revêtement hygroscopique

Il en est de même pour les charges d'humidification/déshumidification) : la présence d'un revêtement hygroscopique réduit la consommation. La figure 10 présente les charges d'humidification/déshumidification nécessaires pour maintenir l'humidité relative entre 35% et 75%.

L'utilisation d'un revêtement hygroscopique permet de maintenir un climat interne plus stable sans système actif. Cela réduit les risques d'apparition de moisissures et améliore le confort des occupants. De plus, les consommations énergétiques liées à l'humidification/déshumidification peuvent être réduites significativement. Il reste à déterminer plus précisément quelle surface couvrir avec de tels matériaux, selon l'emplacement et l'utilisation du bâtiment. Ceci permettra d'optimiser la consommation d'énergie, y compris d'un point de vue économique.

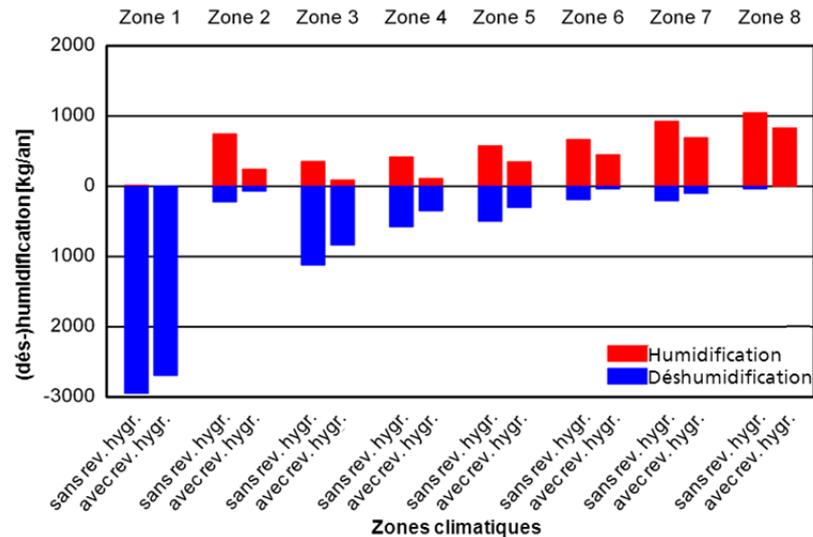


Figure 10 : Charges d'humidification et de déshumidification pour 8 zones climatiques aux états-Unis, avec et sans revêtement hygroscopique

6. Conclusion et perspectives

Ces dernières années, les modèles de simulations hygrothermiques sont devenus des outils pratiques pour concevoir l'enveloppe des bâtiments, anciens et nouveaux, en prévenant les dommages liés à l'humidité. Ceci inclus les analyses à effectuer avant d'entreprendre la réhabilitation de bâtiments historiques. Ces outils sont utilisés pour prévoir la performance hygrothermique des matériaux et composants de bâtiment sous différentes conditions climatiques, pour différents usages. On peut citer [11] où la modélisation hygrothermique a mené au développement de solutions technologiques innovantes, ici un pare-vapeur variable en fonction de l'humidité, préconisé pour les murs à ossature bois et les toitures.

L'humidité peut pénétrer dans l'enveloppe du bâtiment de multiples manières. La condensation interne, due à la diffusion de vapeur (le phénomène principalement pris en compte de par le passé) est rarement la principale cause. Les dommages les plus importants et inattendus ces dernières années ont été principalement le fait de l'infiltration d'eau de pluie couplée à une faible capacité de séchage, comme par exemples dans les cas d'isolation thermique par l'extérieur en Amérique du nord [12] ou en Scandinavie [13]. Le maintien d'un potentiel de séchage suffisant aussi bien vers l'intérieur que vers l'extérieur de la paroi peut donc être très bénéfique. Les outils de modélisation hygrothermiques offrent une bonne possibilité de définir le meilleurs compromis entre deux impératifs : limiter l'entrée d'humidité dans l'enveloppe du bâtiment, et permettre à l'humidité qui a pu pénétrer de s'évacuer le plus rapidement possible. La norme européenne EN15026 [3] et plus encore le standard de l'ASHRAE 160 [6] encouragent le développement d'enveloppe conçues pour présenter une certaine tolérance à l'humidité. Un groupe de travail de l'ASTM travaille actuellement à la publication d'un nouveau standard sur les simulations hygrothermiques.

D'un point de vue plus pratique, il manque encore aujourd'hui des outils de post-processus, traduisant les résultats des simulations hygrothermiques en critères de réussite ou d'échec ou en prédiction de durée de vie. C'est un défi scientifique pour tous ceux qui sont impliqués dans la prévention des dommages. La plupart des processus de dégradation dans la construction sont reliés aux conditions de température et d'humidité :

- réactions chimiques comme la corrosion ou l'hydratation
- processus biologiques (moisissures, pourrissement, algues en façade)
- dommages mécaniques dans la microstructure dus au gel ou à la cristallisation de sels
- déformations par dilatations hygrothermiques

Cette liste est loin d'être exhaustive et pourtant on dispose de peu de critères pour quantifier les relations entre comportement hygrothermique et durabilité des composants et matériaux. La durabilité elle-même est difficile à définir. Dans notre contexte, elle signifie avoir un risque de dommage faible, et une progression lente des dégradations jusqu'à un état limite où des mesures de réparation ou de remplacement sont nécessaires. Il manque également des connaissances sur les mécanismes de dégradation spécifiques aux processus hygrothermiques. Toutefois, réaliser des simulations hygrothermiques reste la première étape pour améliorer l'enveloppe du bâtiment.

Ceci est vrai non seulement pour la prévention des dommages et la durabilité, mais aussi pour la consommation d'énergie et le confort dans l'ensemble du bâtiment. On a pu ici le démontrer à l'aide d'un exemple sur l'utilité d'un revêtement hygroscopique. Les possibilités d'utilisation des outils de simulations hygrothermiques de bâtiment sont bien plus vaste encore. Ils peuvent être utilisés pour affiner les stratégies de pilotage de bâtiment, afin de ne maintenir des conditions de confort qu'en présence des usagers, et de laisser fonctionner les équipements en mode « économie » le reste du temps. Un tel pilotage permet d'économiser beaucoup d'énergie sans nécessiter un investissement important. Il est néanmoins important de pouvoir évaluer si une telle stratégie n'entraîne pas de conséquence négative liée à l'humidité, comme par exemple des problèmes de gel ou de moisissure. Les systèmes CVC ne doivent donc pas être complètement arrêtés, ils doivent à l'inverse maintenir le climat interne dans un domaine non problématique. De plus, on orientera peut-être à l'avenir le pilotage non plus seulement en fonction des besoins, mais aussi en fonction de l'offre d'énergie électrique, par exemple en chauffant/refroidissant ou ventilant plus quand la production d'électricité est importante, et moins quand la production est réduite. De telles stratégies de pilotage et leurs conséquences ne peuvent être évaluées correctement qu'à l'aide d'outils de simulation qui prennent en compte de manière réaliste les transferts d'humidité dans le bâtiment.

Références

- [1] ASHRAE Handbook of Fundamentals 2009, Ch. 25.
- [2] WTA 2002/04: Merkblatt 6-2-01/D & E: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse / Simulation of Heat and Moisture Transfer. Mai 2002 / English version Oct. 2004. WTA-Publications, www.wta.de.
- [3] EN 15026 (2007): Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation. April 2007.
- [4] ASHRAE Handbook of Fundamentals 2009, Ch. 27.
- [5] Trechsel, H.R. (2001): Moisture Analysis and Condensation Control in Building Envelopes. American Society for Testing and Materials (ASTM) Manual 40.
- [6] ANSI/ASHRAE Standard 160 (2009). Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings.
- [7] Künzel H.M. (1995): Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. - One- and two-dimensional calculation using simple parameters. Diss. University of Stuttgart 1994; <http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn:nbn:de:0011-px-566563.pdf>.
- [8] prEn 15026 (2004): Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation. August 2004.
- [9] Sedlbauer, K. (2001): Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components. Diss. University of Stuttgart 2001; http://www.ibp.fraunhofer.de/Images/ks_dissertation_e_tcm45-30729.pdf
- [10] Künzel, H.M. et Sedlbauer, K.: Biological Growth on Stucco. Buildings VIII-Proceedings Dec. 2001, ASHRAE Publications, Atlanta.
- [11] Künzel, H.M. (1998): The Smart Vapor Retarder: An Innovation Inspired by Computer Simulations. ASHRAE Transactions 1998, Vol. 104/2, pp. 903-907.
- [12] Cheple, M., Huelman, P. (2000): Literature Review of Exterior Insulation Finish Systems and Stucco Finishes. Report MNDC/RP B80-0130, University of Minnesota.
- [13] Samuelson, I., Mjörnell, K., Jansson, A. (2008): Moisture damage in rendered, undrained, well insulated stud walls. Proc. 8th Symposium of Building Physics in the Nordic Countries, Copenhagen, pp. 1253-1260.
- [14] Holm A., Künzel H.M., Sedlbauer K. (2003): The hygrothermal behaviour of rooms: Combining thermal building simulation and hygrothermal envelope calculation, In proceeding of Eighth International IBPSA Conference, pp. 499 – 505, Eindhoven, Netherlands.
- [15] ASHRAE (2007): ASHRAE Standard 90.1-2007, Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [16] Woloszyn et Rode, 2008, Tools for Performance Simulation of Heat, Air and Moisture Conditions of Whole Buildings, Building Simulation (2008) 1, pp. 5 –24
- [17] Antretter F., Sauer F, Schöpfer T., Holm A. (2011) : Validation of hygrothermal whole buidling simulation software, In proceedings of Building Simulation 2011, Sydney, Australia.