

Simulation des transferts de chaleur et d'humidité dans l'enveloppe de bâtiment

Hartwig M. Künzel, Andreas Holm
(Fraunhofer Institut Bauphysik, Holzkirchen)

1. Introduction

L'apparition de l'humidité dans l'enveloppe des bâtiments est généralement attribuée aux phénomènes de diffusion et de condensation de l'air humide intérieur. La méthode de GLASER (calcul stationnaire de diffusion de vapeur), facile à utiliser n'est malheureusement qu'un outil simplifié qui ne permet que d'éviter les risques de condensation dans la masse. Il y a cependant d'autres sources d'humidité, comme la pluie battante, les remontées capillaires, l'humidité de construction qui peuvent aussi affecter l'ensemble du patrimoine bâti : monuments historiques et constructions récentes. Ces phénomènes ne peuvent pas être traités correctement avec la méthode de Glaser qui ne décrit que le processus de diffusion, car d'autres mécanismes apparaissent, comme la rétention d'eau et le transport en phase liquide. Il en est de même pour d'autres phénomènes comme la condensation en été, les cycles humidification-séchage, le gel-dégel, le stockage transitoire d'humidité et la perte de chaleur par évaporation, qui peuvent soit entraîner des dommages, soit augmenter la consommation d'énergie.

Pour prévoir et suivre les mouvements d'humidités dans l'enveloppe d'un bâtiment, de nombreux outils de simulation ont été développés dans le monde et validés au cours des dernières années. Pour illustrer les possibilités offertes par ces logiciels, nous présentons dans cet article, un de ces modèles, disponible commercialement et largement utilisé en Allemagne, Europe de l'Est et Etats-Unis. Ce modèle, développé par le Fraunhofer Institut Bauphysik (IBP), s'appelle WUFI.

2. Propriétés des matériaux et conditions aux limites.

La précision des résultats de simulation dépend largement de la qualité des données d'entrée, dans notre cas, les propriétés des matériaux. Le manque de données fiables a été le principal handicap pour l'application à une grande échelle des outils modernes de simulations. C'est pourquoi, une base de données contenant plus de 50 matériaux typiques du bâtiment est inclus dans le logiciel WUFI. Pour chaque matériau, les paramètres fournis sont les suivants :

- la chaleur spécifique
- la conductivité thermique,
- la masse volumique,
- la porosité totale
- le facteur de résistance à la diffusion de vapeur.

Si le caractère capillaire du matériau doit être pris en compte, la courbe de rétention de l'eau (capacité différentielle en humidité - Norme ISO 9346) et la conductivité liquide D_{ϕ} doivent être ajoutées.

Tous les composants d'enveloppe interagissent avec leur environnement. Cela signifie que les conditions ambiantes influencent les composants et vice versa. Cet effet réciproque qui est principalement limité à l'environnement intérieur doit pouvoir être pris en compte dans la formulation des conditions aux limites. Pour la plupart des applications, une onde sinusoïdale pour décrire les variations de température et d'humidité intérieures est appropriée.

La formulation des conditions climatiques extérieures est beaucoup plus complexe. Au minimum, une valeur moyenne mensuelle est demandée pour la température et l'humidité relative. Si l'ensoleillement et les précipitations doivent être considérées, des données climatiques horaires sont alors nécessaires. Ces données, malheureusement sans les précipitations, peuvent être trouvées dans l'Année de Référence Test Européenne (European Test-Reference-Year). Les données complètes (précipitations incluses) pour Holzkirchen (une localité près de Munich où est situé l'IBP) sont fournies avec le logiciel WUFI.

3. Procédure de calcul.

L'utilisation des outils de simulation hygrothermique requière un minimum de connaissance des phénomènes physiques mis en jeu ainsi que des modèles mathématiques. Pour interpréter correctement les résultats, il est aussi nécessaire de comprendre la procédure de calcul et de vérifier la validité des données d'entrée. L'architecture du modèle WUFI est illustrée par l'organigramme de la Figure 1. Les données d'entrée nécessaire comprennent :

- la composition de la structure : nature des matériaux, épaisseurs respectives,
- son orientation et son inclinaison,
- les conditions initiales : température, teneur en eau
- la période d'analyse.

Les caractéristiques des matériaux et les conditions climatiques peuvent être sélectionnées à partir des bases de données fournies ou à partir d'autres sources.

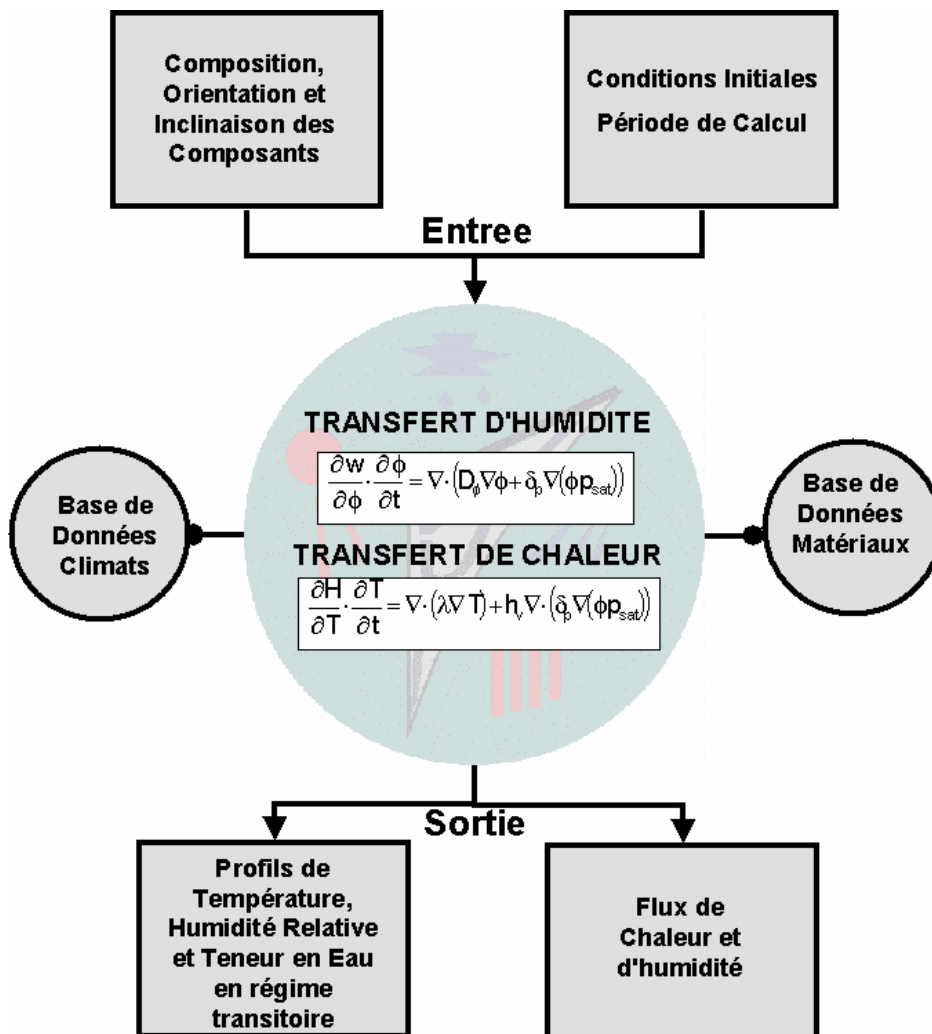


Fig. 1: Organigramme du modèle WUFI avec les équations de transfert

A partir des conditions initiales en température et des distributions initiales de teneurs en eau dans les composants, les équations d'équilibre en énergie et humidité doivent être résolues pour la période d'analyse à tous les pas de temps. Les deux équations contiennent des termes de stockage et des termes de transport. Le stockage de l'humidité est décrit par la dérivée de la courbe de rétention d'eau ou capacité différentielle d'humidité (voir article Humidité et Matériaux). Cette fonction dépend peu de la température.

Le transport en phase liquide est commandé par le gradient d'humidité relative ϕ . Le coefficient de transport D_ϕ augmente fortement avec la teneur en eau tandis que l'influence de la température est limitée à son effet sur la viscosité de l'eau. La diffusion de vapeur est gouvernée par la pression partielle de vapeur p qui dépend de l'humidité relative et de la pression de vapeur saturante. Le coefficient de diffusion α_p dépend légèrement de la température et de la teneur en eau alors que la pression de vapeur saturante augmente d'une manière exponentielle avec la température.

L'enthalpie du squelette solide du matériau et celle de l'humidité contenue dans le matériau constituent le terme de stockage de l'équation d'équilibre de la chaleur. Les flux de chaleur est composé du transfert thermique par conduction qui est fonction de la teneur en eau et du transfert par changement de phase résultant du processus d'évaporation-condensation de l'humidité.

Les effets mutuels de la température et de la teneur en eau sur les différents coefficients conduisent à un couplage fort entre les deux équations. C'est pourquoi, un algorithme adapté a été développé pour résoudre numériquement ces équations. Pour la discrétisation, un schéma de volume finie implicite a été retenu pour assurer la stabilité numérique. Les équations résultantes sont résolues directement par un algorithme matriciel tri-diagonal. Le couplage est réalisé itérativement par une résolution alternée des équations avec mise à jour des coefficients.

En sortie, le logiciel fournit les distributions calculées de la température et de l'humidité ainsi que les flux correspondants pour chaque pas de temps. Les résultats peuvent être présentés sous forme de profils animés de la température et de l'humidité à travers la section du composant ou sous la forme d'évolution temporelle en des points sélectionnés. Le suivi de l'évolution de la teneur en eau dans le composant ou dans les différentes couches, permet de savoir si une teneur en eau critique est atteinte au cours du test. Les effets de l'humidité sur les pertes de chaleur peuvent être aussi analysés.

4. Application et validation

Le logiciel WUFI est probablement l'outil de simulation qui a été le plus validé et testé par des confrontations à des études de cas in-situ. La validation d'un

modèle numérique requière des investigations expérimentales pertinentes, des conditions initiales et aux limites précises, ainsi que des propriétés de matériaux fiables.

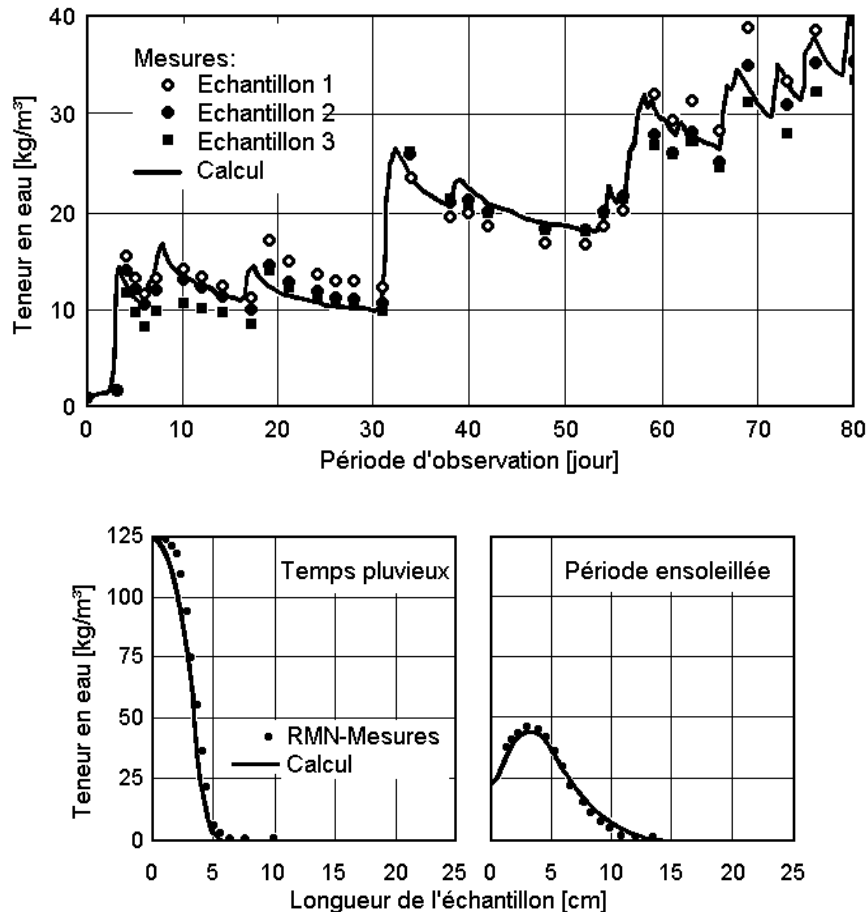


Fig. 2: Comparaison des évolutions calculées et mesurées de la teneur en eau de 3 échantillons de pierre naturelle (haut). Distribution de la teneur en eau dans l'échantillon No.2 pour deux échéances distinctes au cours de la période d'observation (bas)

4.1 Façade en pierre naturelle.

Les dommages subits par les monuments historiques ont pour principales origines des processus de vieillissement et de dégradation dus à l'humidité. Pour analyser leur comportement hygrothermique et les conséquences sur la durabilité de murs en pierre naturelle, des échantillons de grès ont été complètement caractérisés en laboratoire pour obtenir les paramètres fiables nécessaires à la simulation numérique.

En parallèle, des échantillons initialement secs furent exposés en extérieur. Au cours de ces essais, les conditions climatiques locales furent enregistrées et le comportement vis-à-vis de l'humidité a été déterminé par pesée et balayage RMN. Les caractéristiques du matériau et les données climatiques enregistrées (températures horaires intérieures et extérieures, humidité relative, pluie battante et radiation solaire) ont servi d'entrée au programme de calcul.

Sur la Figure 2 sont présentés les évolutions de la teneur en eau totale respectivement calculée et mesurée pour les trois échantillons et les profils d'humidité de l'échantillon 2 pour différentes échéances d'exposition. L'accord obtenu prouve la validité pratique des simulations effectuées avec le logiciel WUFI. Les profils montrent aussi que la surface extérieure sèche plus rapidement après une séquence de pluie, laissant apparaître une teneur en eau plus élevée dans une zone située quelques centimètres en dessous de la surface. Cette région est souvent plus endommagée que la couche de surface, avec pour conséquence l'effet d'écaillage de la croûte de surface.

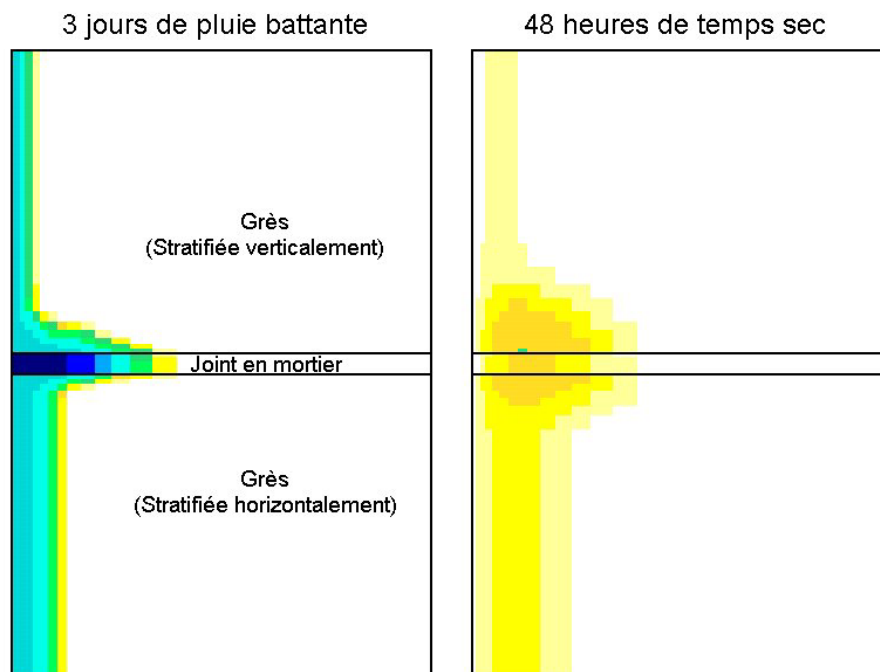


Fig. 3: *Absorption d'eau et séchage ultérieur d'un mur en pierre naturelle avec un joint en mortier.*

Comme exemple de calcul en deux dimensions, la Figure 3 montre la distribution de l'humidité dans le voisinage d'un joint de mortier entre deux grès anisotropes (la stratification a pour effet de modifier l'absorption d'eau) orientés différemment dans un mur en maçonnerie.

Les résultats montrent l'absorption rapide du mortier au cours d'une pluie battante. Cet effet résulte de la plus grande porosité du mortier par rapport au grès qui facilite l'infiltration d'eau mais aussi le séchage par diffusion de vapeur. Par conséquent, le mortier sèche plus rapidement que la pierre adjacente qui retient des amas d'humidité près du mortier et cela même après une longue période sèche. En pratique, c'est exactement à cet endroit que les dommages dus au gel ou aux sels sont constatés.

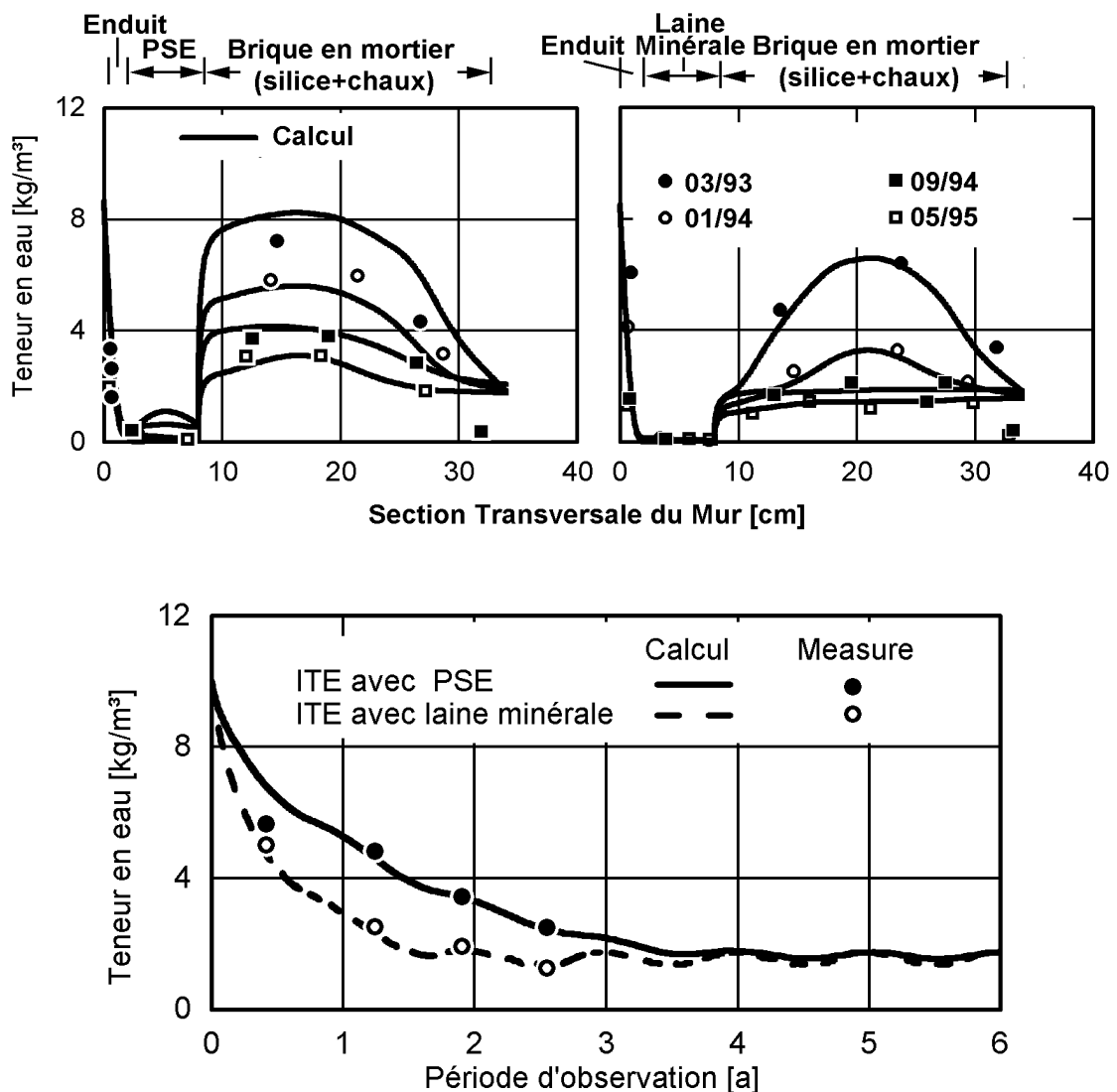


Fig. 4: Profils de teneur en eau mesurés et calculés à différentes échéances après la fin de la construction en automne 92 pour un système d'isolation thermique par l'extérieur (ITE) réalisé avec du PSE (en haut à gauche) et une laine minérale (en haut à droite).

Evolution de la teneur en eau pendant 6 ans (en bas)

4.2 Paroi avec Isolation Thermique Extérieure

Les systèmes d'isolation thermique par l'extérieur (ITE), installés sur des maçonneries peuvent allonger le temps de séchage de la paroi. Dans des conditions sévères d'humidité, l'humidité résiduelle de construction peut provoquer des dommages importants dans le parement de l'ITE si l'humidité s'accumule sous celui-ci par diffusion de la vapeur. C'est pourquoi, une maison test a été construite avec des briques de maçonneries à base de silicate de calcium et isolées avec deux isolants différents avec la même épaisseur de 80 mm : un polystyrène expansé et une laine de verre haute densité. L'isolation en fibre minérale est principalement employée pour la protection incendie et l'isolation acoustique. Le séchage de la paroi était analysé par sondage de la paroi à différentes échéances après la fin de la construction. La Figure 4 illustre les profils d'humidité à travers la paroi pour différentes échéances. Les résultats présentent un bon accord et ils mettent en évidence l'influence du matériau isolant sur le séchage du mur. A cause d'une perméance à la vapeur plutôt faible la maçonnerie sèche principalement vers l'intérieur du bâtiment (en haut à gauche – figure 4), cela a pour conséquence de prolonger le processus de séchage par rapport au processus présenté sur le graphe en haut à droite (figure 4).

La grande perméabilité à la vapeur de la laine minérale conduit à un séchage par les deux faces. Le graphe en bas de la Figure 4 met clairement en évidence le séchage plus rapide obtenu avec la laine minérale. C'est seulement après 4 ans que le système ITE avec PSE atteint la même teneur en eau.

Cependant, dans ce cas le parement doit aussi avoir une perméabilité élevée afin d'éviter toute condensation sous la surface, ce qui pourrait entraîner des dommages en cas de gel.

4.3 Toiture en BCA

Pour éviter la condensation interne dans une toiture, un pare-vapeur est généralement exigé dans les climats froids. Cependant, dans le cas d'une toiture en béton cellulaire auto clavé (BCA), le pare-vapeur limitera l'évacuation par séchage de l'humidité de construction. Afin, de savoir si une toiture non-ventilée en BCA fonctionne sans pare-vapeur, un hall test avec air conditionné a été construit et la migration de l'humidité présente dans le toit initialement humide a été mesurée par sondage.

Ce test in-situ a été réalisé dans les années soixante et malheureusement à cette époque les données climatiques n'avaient pas été enregistrées. Pour la simulation, des données plus récentes, relevées au même endroit, ont donc été utilisées. Des études paramétriques avec les données de différentes années ont justifié ce choix. La Figure 5 fournit les points expérimentaux et la distribution calculée à la fin du premier été et durant l'hiver suivant.

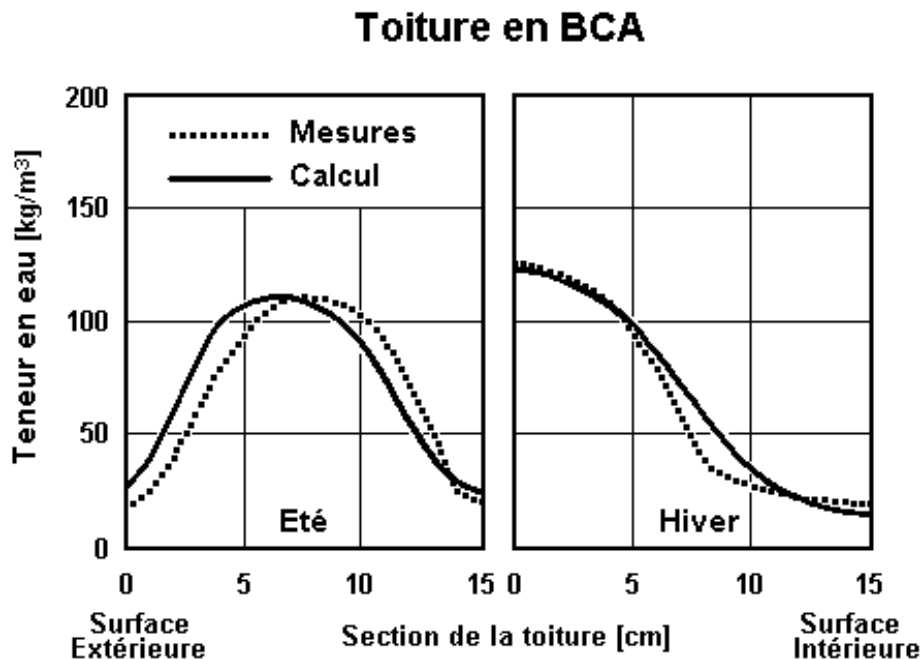


Fig. 5: Distribution de la teneur en eau calculée et mesurée à la fin du premier été et de l'hiver suivant, pour une toiture

En été, l'ensoleillement conduit à des températures en surface élevées et par conséquent des pressions de vapeur élevées sous le revêtement bitumineux imperméable. L'humidité migre principalement par diffusion, vers les régions froides de la toiture et condense quelque part dans le matériau ou sèche vers l'intérieur. En hiver, le gradient de température est inversé et l'humidité s'accumule sous la membrane.

Si un pare-vapeur avait été installé en sous face de la toiture, ce transfert d'humidité saisonnier se prolongerait indéfiniment. Sans pare-vapeur, le processus de séchage est très efficace. On peut en conclure, en observant la Figure 6 (bas), qu'en moins de deux ans et demi, le BCA a perdu la plupart de son eau de construction et qu'il a atteint un quasi-équilibre hygroscopique. A cause du bon accord entre les valeurs mesurées et calculées, l'influence du climat intérieur peut être estimée en réalisant une étude paramétrique avec WUFI. Celle-ci montre qu'une telle toiture en BCA fonctionnera d'une manière satisfaisante avec une humidité relative inférieure à 60 % pendant la période de chauffage.

Toiture en BCA

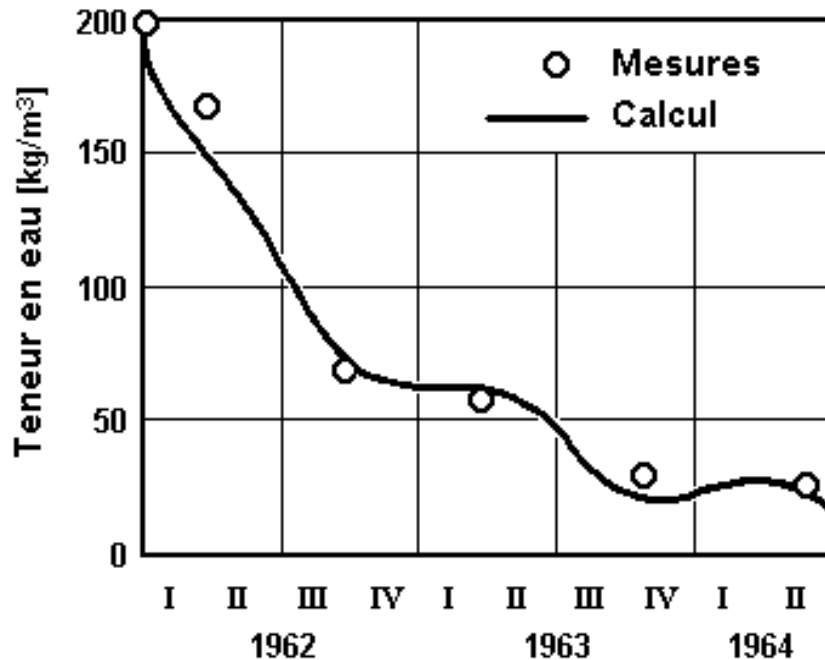


Fig. 6: Performance vis à vis de l'humidité d'une toiture en Béton Cellulaire Autoclavé (BCA).

5. Conclusions

Les faiblesses de la méthode de Glaser et les avantages de la simulation hygrothermique ont été reconnus par le comité CEN TC 89. C'est pourquoi un nouveau groupe de travail a été constitué pour pallier l'absence de guide officiel pour les outils modernes de simulation. Puisque beaucoup de fabricants sont prêts à faire tester leurs produits plus complètement afin de fournir les données "matériau", une utilisation plus importante des outils de simulations sera possible dans le futur. Parallèlement, pour convaincre un plus grand nombre de praticiens d'utiliser les outils de simulation, l'interface utilisateur doit devenir plus simple d'utilisation et plus fiable.

Les résultats obtenus par simulation sont une aide précieuse pour comprendre les processus hygrothermiques dans les parois de bâtiment. Cependant, l'interprétation de ces résultats exige une expérience pratique importante. En effet, pour quantifier les effets de l'humidité, tels que la moisissure ou la croissance des algues, la corrosion, le gel ou les dommages provoqués par le sel, des modèles d'analyse des données résultant des calculs doivent être développés afin de prévoir les risques de dégradation qui peuvent en résulter.