

Mise au point d'un concept semi-probabiliste de maîtrise de l'humidité pour des façades élevées en bois

Stephan Ott
Technische Universität München
Chaire de construction bois et de construction
Munich, Allemagne



1. Résumé

L'usage du bois dans le domaine urbain suscite un intérêt croissant. Mais pour créer un marché à moyen terme et le préserver, les ouvrages d'aujourd'hui se doivent d'être fiables, flexibles et innovants. L'un des défis émergents concerne la maîtrise des conditions hygrométriques de l'ouvrage pendant sa durée de vie, notamment en ce qui concerne son enveloppe en matériaux à base de bois. En comparaison avec les questions de stabilité statique et de résistance au feu, les risques liés à l'humidité sont pour l'instant dramatiquement sous-estimés. D'où l'objectif présent de développer un 'concept de sécurisation semi-probabiliste' afin d'éviter des sinistres qui seraient générés par une réaction non prévue de l'ouvrage exposé aux intempéries. Ce projet de recherche vise en outre à préciser quels types de montages en façade sont requis, tout en définissant et en réalisant des solutions de détails efficaces sur le plan économique, et ce en combinant des démarches qui ont fait leurs preuves avec un concept basé sur la gestion des risques. La méthode adoptée comprend une modélisation des risques hygrothermiques, croisée avec la description de la sensibilité de l'enveloppe de construction bois et les effets des intempéries. En complément, le modèle prend en considération également les mécanismes de détérioration qui génèrent des sinistres et engendrent toutes sortes de conséquences délétères. Les process constructifs et la façon de construire se doivent de gagner en efficacité économique, d'autant plus que le nombre de points de détail par façade d'un projet. Et avant tout, il s'agit d'améliorer leur stabilité hygrothermique afin de contribuer au succès général de la construction bois.

2. Introduction

2.1. Contexte

Le recours au bois dans la construction suscite un intérêt croissant, non seulement parce qu'il s'agit d'un matériau quasiment neutre en carbone et donc bon pour la préservation de l'environnement, mais aussi du point de vue de la santé et de la qualité de fabrication, dans la mesure où la préfabrication industrielle des ouvrages y est poussée. Associés à l'usage de panneaux lamellés-croisés (CLT) grands formats constitués de lamelles rigides mais légères à collage croisé, les références déjà existantes d'ouvrages multi-étage approchant de la limite des IGH montrent tout le potentiel de ce marché pour le développement de la construction bois. Le matériau de construction bois va reprendre son ancienne place dans les villes à moyen terme, mais il s'agit d'en garantir la fiabilité à longue échéance. Dans ce contexte, la construction bois d'aujourd'hui se doit d'être à la fois innovante, flexible, à l'abri des problèmes, humidité, hautement isolée mais aussi durable et efficace en termes économiques. Des conditions que ce mode constructif remplit d'ores et déjà pour les bâtiments résidentiels ou tertiaires jusqu'à trois niveaux, sur la base de recherches qui se poursuivent déjà depuis une trentaine d'années.

Les concepts qui prévalent actuellement en termes de gestion de l'humidité ne se laissent pas transposer tels quels sur des bâtiments qui dépassent une hauteur de 10 mètres. Ces derniers se doivent de répondre à la fois à des exigences en termes formels, fonctionnels, environnementaux et techniques. En font partie également les attentes des maîtres d'ouvrage quant à l'aspect architectural de l'ouvrage dans un cadre urbain et quant à sa fonctionnalité. Il s'agit tout autant de répondre parfaitement aux attentes d'entrepreneurs qui sont censés produire des milliers de mètres carrés de façades dans le cadre de process industrialisés incluant des assemblages produits en série. Et n'oublions pas les sollicitations décuplées des façades dès lors qu'elles s'élèvent fortement en hauteur. Pour répondre à ces défis, il convient de mettre sur pied une méthodologie qui permettra de mesurer les performances d'enveloppe compétitives sur le plan économique. Au sein du consortium TallFacades, justement, des partenaires du monde de la recherche et de l'industrie issus de 4 pays européens travaillent de concert au développement d'un concept de sécurisation des impacts de l'humidité.

Quand on parle de construction bois multi-étage, on est amené à distinguer différents types de bâtiments et de types de construction. Une première catégorie est constituée de constructions bois multi-étage dont des parties essentielles de la structure sont faites de

bois. Mais il existe une catégorie encore plus nombreuse de bâtiments dits mixtes. Leurs structures porteuses sont en béton armé en poteau-poutre ou en voiles porteurs, tandis que les façades de l'enveloppe sont constituées d'éléments hautement isolés en ossature bois. Cette seconde catégorie est prisée, car elle permet d'atteindre un niveau d'exigences en matière d'isolation qui est parfois de l'ordre du PassivHaus, ($U < 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$), pour une emprise réduite des murs. Une troisième catégorie d'ouvrage met en jeu des éléments de façade en ossature bois pour des opérations de rénovation où une seconde peau vient s'appliquer sur la première. Tout comme pour les ouvrages mixtes, des éléments hautement isolants sont placés en avant d'une structure porteuse de bâtiments de 4 à 8 niveaux. La méthode est encore relativement nouvelle mais elle bénéficie d'un réel engouement. Ces éléments doivent combiner une isolation efficace, l'étanchéité à l'air, une résistance durable aux intempéries et un aspect au goût du jour. Un vrai défi, mais qui n'est pas hors d'atteinte, comme le montrent déjà un grand nombre de références (Ott et al., 2013). Toutes ces applications auraient été impensables encore il y a seulement dix ans. D'une part, cela résulte des efforts accomplis sur le front de la protection contre l'incendie. Le bois y a marqué des points par la fiabilité de sa combustion. Par ailleurs, en termes environnementaux, le bois stocke des gaz à effet de serre et diminue la contribution de ce dernier aux émissions pendant toute la durée de son cycle de vie : cela plaît aux investisseurs et répond aux attentes du monde politique.

2.2. Problématique

Jusqu'à présent, la spécification du niveau de sécurité était basée sur des études menées pour différents ouvrages spécifiques exposés à des sollicitations climatiques bien précises. Les normes nationales qui en découlent s'appliquent à la plupart des bâtiments. En Allemagne, il s'agit de la norme pour la protection du bois construction, la DIN 68800 Partie 1 et Partie 2. Cette norme ne requiert une justification hygrothermique d'ordre dynamique, avec marge de sécurité pour le re-séchage de l'ouvrage, que pour des expositions critiques. Outre l'évaluation des mesures à prendre pour préserver, dans un cadre économique donné, les ouvrages de sinistres, il existe la possibilité de recourir à des démarches de probabilité pour effectuer des analyses qui se rapportent à des ouvrages innovants et non traditionnels voulus par des clients, et qui peuvent influencer sur l'évolution des normes et des politiques, comme le montre Foliente et al. (2002). S'ajoute que ces façons d'analyser, conjuguées à des prévisions relatives à l'évolution du climat, permettent d'évaluer les sollicitations auxquels les ouvrages seront soumis à l'avenir (cf. Bjarnadottir et al. (2011)).

Jusqu'à présent, il manquait la définition d'un niveau de sécurité acceptable sur le plan économique, en matière d'exposition à l'humidité, et en relation avec :

- La sollicitation dans la perspective d'une exposition donnée, en partant du contexte macro (climat & localisation, hauteur du bâtiment, environnement et orientation) jusqu'au micro-contexte (Façade, revêtement et détails),
- La résistance de l'ouvrage (quel est l'humidité stockée et quelles sont les réserves de stockage), en relation avec les
- Modèle de sinistralité (moisissure, pourrissement, perte d'humidité),
- Les conséquences en cas d'apparition de sinistres,
- Le développement de mesures économiquement viables (dimensionnement, intervalles d'inspection).

De ces exigences conjuguées résulte la question centrale : quels dispositifs de façade, détails de conception et précautions particulières pour la protection et/ou l'inspection des ouvrages sont nécessaires pour que la construction passe le cap de 50 années d'existence, soit la période où elle répond en principe aux attentes élémentaires en matière de design ? TallFacades se démarque de modèles d'analyse semblables et de résultats comme ceux présentés par Vanier et al. (1996), Cornick et al. (2003), Pietrzyk (2015), et se concentre sur l'intégralité du feuilleté de façades hautement isolées, en prenant en compte l'effet induit du climat extérieur et intérieur. S'ajoute un ciblage des zones de risque particulier sur les façades (angles, encorbellements, baies, etc.). S'ajoute la prise en compte de l'éventualité d'erreurs humaines au moment de la fabrication. L'on ne s'en tient pas à la sollicitation courante, mais également à celle qui résulterait de situations exceptionnelles ou d'un affaiblissement de la résilience du bâtiment par des points faibles de l'ouvrage

(défaut d'entretien, détériorations, etc.). Un aspect essentiel de cette problématique va au-delà de la recherche pure et simple et prend toute son importance dans le cadre de la démarche industrielle : il s'agit de l'évaluation du risque, qui évalue les conséquences directes et indirectes ainsi que la validité économique des mesures à prendre.

Le comportement hygrothermique d'enveloppes en bois de bâtiments, réalisées en premier lieu en ossature bois, fait l'objet de discussions depuis plus de 25 ans et a donné lieu à des optimisations de l'isolation thermique et de l'étanchéité à l'air. Les premières études se concentraient surtout sur les phénomènes de convection dans les cavités, et sur les défauts résultant des couches étanches à la diffusion de la vapeur d'eau au sein du complexe de façade.

L'objectif du projet présenté ici, c'est de parvenir à mieux prendre en compte l'effet varié et répété des intempéries qui agissent sur les façades d'ouvrages multi-étages, comme le surcroît de pression du vent, la pluie battante, un rallongement de la durée des chantiers, qui exposent davantage les éléments structurels à l'humidité. N'oublions pas que des interventions ultérieures comme des inspections, et que les possibilités d'intervenir pour des réparations sur des ouvrages de grande hauteur sont limitées. La grande diversité des configurations des enveloppes et des effets provoqués par les climats extérieurs et intérieurs font qu'il est nécessaire d'accompagner les prescriptions de matériaux et de design (cf ; l'image 1).

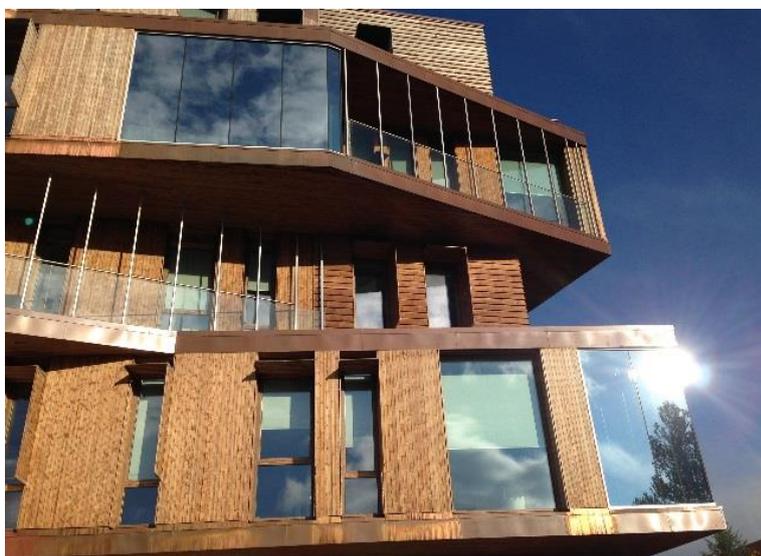


Illustration 1 : Un R+5 en CLT pour la façade et les planchers et une topographie bien animée de la façade en bois, NINA Trondheim.

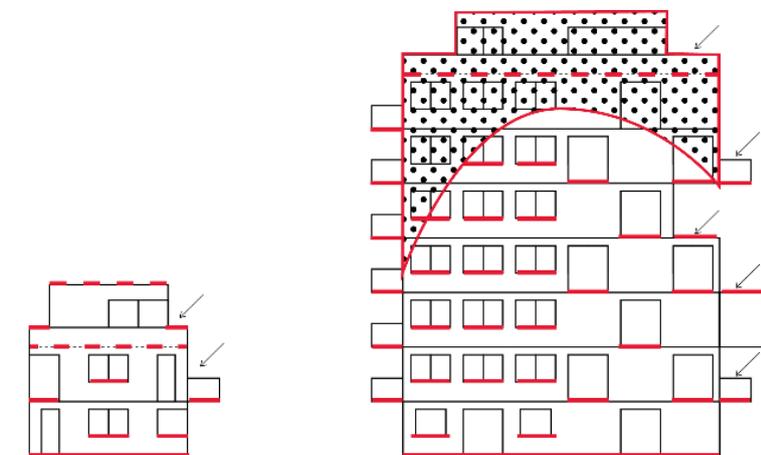
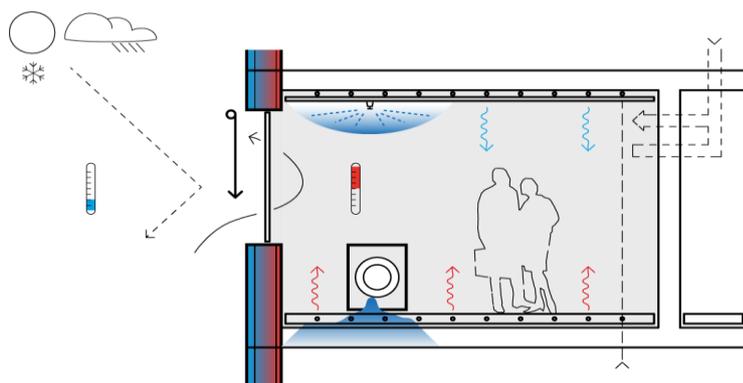


Illustration 2 : Zones de risque (rouge) de l'enveloppe de petits bâtiments (à gauche) et de bâtiment élevés (à droite), davantage sollicités en matière de pluies battantes (zones pointillées)

Characteristics of functional layers



Outdoor exposure
Exterior cladding
Rain/wind barrier

Indoor exposure
Interior cladding
Air/vapour barrier

Illustration 3 : Différents scénarios de la sollicitation hygrothermique d'une enveloppe courante d'un bâtiment résidentiel ou tertiaire multi-étages.

3. Méthodes et données

On procède à une recherche bibliographique pour pouvoir comparer les méthodologies et définir le cadre des données relatives aux matériaux et aux sollicitations ainsi qu'aux configurations de sinistres. Les parties sollicitées de l'enveloppe ainsi que les constructions sont classées en fonctions de leurs caractéristiques en plusieurs catégories (cf. image 2). De même, les données entrantes des sollicitations et les mécanismes de sinistralité sont spécifiés (cf. image 3). La ruine qui résulte du dépassement de certaines valeurs en matière d'humidité détermine la résistance de la construction en fonction de l'interaction d'un ou de plusieurs facteurs. Cela permet de déterminer les réserves propres d'un ouvrage ou de ses composants face à un surcroît d'humidité, et le degré de contribution de l'auto-séchage de l'ouvrage, sa capacité de résilience et celle des matériaux renouvelables et bio-sourcés qui le composent.

Partant des méthodes de l'analyse de risque, on dresse une évaluation semi-probabiliste qui se réfère à des mesures effectives de protection contre l'humidité (cf. image 4). Pour ce faire, on calcule les réactions de l'ouvrage confronté à un grand nombre de simulation hygrothermiques correspondant à des expositions à de nombreuses situations d'intempéries. La mesure de l'humidité au sein de l'ouvrage, confrontée à divers modèles de sinistralité, va déterminer dans quelle mesure l'ouvrage est en mesure de résister ou s'il est mis en défaut. Une analyse plus avancée des conséquences se base sur les connaissances des experts, dans la mesure où il manque des informations systématiques au sujet de l'occurrence locale et de l'incidence technique de désordres, tout comme sur les interventions pour les réparations et les coûts afférents.

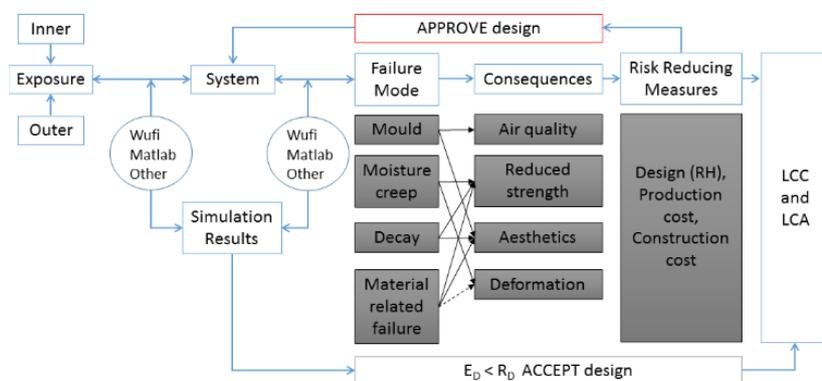


Illustration 4 : Modélisation du risque induit en fonction de la surface opérante et de la taille du bâtiment, afin d'évaluer la probabilité d'un échec. Les conséquences sont mises en relation avec les coûts de réfection et en dernière instance, les mesures envisagées pour limiter les risques sont évaluées en fonction de leur efficacité économique.

4. Résultats

4.1. Sollicitation des composants de la façade

Il n'existe que peu de publications récentes qui se penchent sur le climat extérieur et son influence sur des parois isolées. Gudum (2003) distingue l'influence de la ventilation derrière l'enveloppe extérieure, tandis que Vinha & Käkelä (1999) étudient différents types de revêtements. Nore (2009) analyse l'effet de pluies battantes sur des habillages de façades ventilés et non ventilés et les distingue comme deux concepts de gestion de l'humidité foncièrement distincts. Une structure non ventilée d'un complexe isolant sous enduit fonctionne assez bien dans un climat sec. Mais dès lors que l'humidité ambiante devient trop forte, ou que la mise en œuvre a été défectueuse, c'est la solution ventilée qui se comporte mieux. Mais il convient de prendre en compte l'exposition, le système constructif de la façade, les mesures de protection contre l'humidité et les valeurs de ventilation, comme le détaille Winter et al. (2006). Kehl & Kunzel (2009) procèdent à des simulations numériques de l'exposition de façades ventilées.

Rydock et al. (2005), Lisø et al. (2007) et Koci (2014) franchissent le pas d'une généralisation de la sollicitation maximale de façades en se basant sur les données locales relatives à l'hygrométrie au fil des années. Cornick & Lacasse (2006) élargissent le champ de ces considérations en analysant les influences spécifiques de zones de risques que constituent certains raccords et pénétrations de l'enveloppe. Sur ce point, TallFacades créent des classes de sollicitation sur la base d'une catégorisation des points de détails.

4.2. Les mécanismes de génération de sinistres

Aujourd'hui, il existe toute une série de modèles pour prédire la durée de vie de construction en bois. Les développements qui ont eu lieu dans ce domaine ont conduit à différentes tentatives de modélisation de la durée de vie, par exemple chez Scheffer l'index Scheffer (1971) pour prédire la durée de vie d'éléments constructifs en bois en usage extérieur. Des modèles d'évaluation des effets en fonction de la dose d'exposition ont été développés par Brischke & Rapp (2010) et Isaksson et al (2012) afin de parvenir à gérer les longs délais d'exposition d'ouvrages testés in situ.

L'apparition de moisissures n'est pas souhaitable, mais dans de nombreux cas, il s'agit d'un processus lent, surtout quand le bois mouillé a le temps de sécher avant d'être de nouveau aspergé. Lorsque les conditions pour l'apparition de champignons sont idéales, le processus de décomposition peut s'avérer rapide.

De manière générale, on peut dire que l'humidité optimale pour l'apparition de champignons destructeurs se situe entre 40 et 80% dans le bois, pour une température optimale située entre 25 et 32°C, sachant que ces champignons résistent à des périodes sèches assez longues. Le risque d'une décomposition biologique est réel sur tout le spectre qui va de 20 à 100% d'humidité de la masse (le tout dépendant de la température et de la durée).

L'eau agit par modification de la forme, contraction ou gonflement, ce qui influe sur la création de fissures et sur la diminution de la cohésion.

La détérioration de la surface exposée par les effets de l'eau, du vent, des UV se manifeste sur le plan esthétique par des fissures, des fibres redressées, des décolorations et déformations. L'érosion des façades se limite à la face exposée extérieure.

Cinq modes de détériorations ont été identifiés : des modifications induites par l'humidité, le pourrissement du bois, l'apparition de moisissures et la perte des performances du matériau en rapport avec son effritement ; chute ou déformations, diminution des propriétés mécaniques, pertes des performances d'isolation ; détérioration des propriétés esthétiques, qualité de l'air et les conséquences indirectes en rapport avec les coûts induits pour le remplacement, les réparations et la valeur immobilière.

4.3. La modélisation des risques

Les paramètres présentés, qui se rapportent à des sollicitations variables de constructions spécifiques par recours à des modèles de sinistralité débouchent dans la conception d'un modèle de management de l'humidité à usage des enveloppes à base de bois. Des sollicitations passagères comme la pluie battante, des apports intérieurs (salle de bains) et des

points de détails en façade se voient attribuer un facteur spécifique. En outre, des événements inhabituels peuvent être pris en compte par des paramètres correctionnels additifs, dont les tempêtes, les incendies, (sprinklers) et les autres sinistres (machine à laver). Le processus se base sur une simulation automatisée du comportement de l'ensemble du système de façade. En complément, et afin de calibrer des paramètres instables, des tests de laboratoire sont réalisés sur les façades et les points de détail. L'erreur humaine (pré-fabrication en usine, montage in situ) est quantifiée par des experts de l'industrie et de la recherche sur une base qualitative. Afin de compléter l'approche, cette dernière intègre des mécanismes de détérioration spécifiques qui décrivent les situations limite en présence d'un degré trop élevé d'humidité, par exemple en ce qui concerne le développement de moisissures. Enfin, tous les paramètres de risque sont corrélés avec les méthodes de calcul de cycle de vie et celles de comptabilisation des impacts environnementaux. A l'attention du management de l'entretien, la prédiction du niveau d'équilibre d'humidité au sein de l'enveloppe à base de bois détermine le niveau de risque comme autant de pénalités pour le cycle de vie souhaité et validé, en se reportant aux différents modèles de sinistralité et les possibles conséquences et coûts induits.

Le modèle de gestion des risques illustré par l'image 5 représente les mécanismes physiques de l'humidité à l'œuvre sur les éléments extérieurs exposés au sein d'un modèle en corrélation avec une représentation probabiliste des détériorations et dégradations en relation avec le degré d'exposition aux intempéries ; donc en partant de la compréhension des modes de détérioration, des mécanismes de détérioration et des microclimats. Le modèle probabiliste permet d'analyser la performance des façades. Le modèle prend en compte toutes les incertitudes et formule certains objectifs sous forme de probabilités, comme explicité sur l'image 6. La répartition de l'intrusion E se doit donc d'être moindre que la résistance de l'élément de construction et de ses couches R, afin de faire en sorte qu'il ne soit pas détérioré par l'humidité.

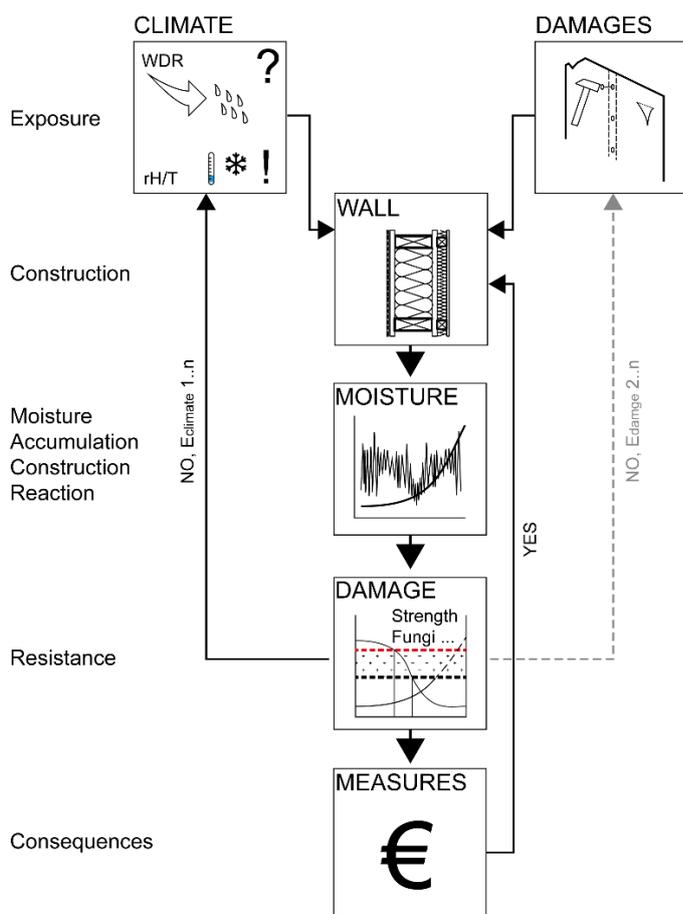


Illustration 5 : L'algorithme des risques montre le cheminement en partant de la sollicitation pour aller jusqu'aux conséquences et répétitions dans le cas où l'on en arrive à des conditions de rupture.

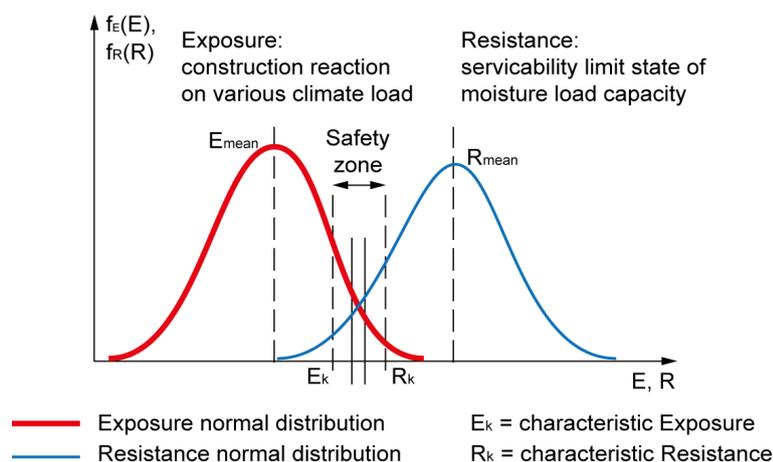


Illustration 6 : Modèle probabiliste avec une répartition normale de la sollicitation et de la résistance en matière de sollicitation hygrothermique d'une façade avec caractérisation des états limite pour une plage de sécurité définie.

5. Débat et conclusions

Dans un premier temps, en partant d'un simple modèle causal, on élabore une modélisation assez complexe des risques, qui permet de différencier de façon plus précise les conséquences des phénomènes. Pour ce faire, les phénomènes physiques sont spécifiés en interaction avec les conséquences directes et indirectes. Dans un second temps, le projet de recherche TallFacades exploitera les résultats des tests de laboratoire et des données d'essai pour analyser les niveaux de risque par catégorie de construction et en classifiant les désordres par gravité. Comme dans le domaine de l'ingénierie en général, ce cas précis gagne à se baser sur la théorie des risques et une approche probabiliste et proche du cadre réel pour avancer vers de vraies solutions. Les risques possibles sont inclus dans les contextes systémiques et les variables qui opèrent sur eux. En outre, la théorie de la fiabilité offre un cadre au management de la qualité, au choix des matériaux et à leur optimisation dans la perspective d'une amélioration de la robustesse de la protection contre l'humidité des constructions.

6. Remerciements

Le Project TallFacades, qui a fourni le cadre de cet conférence, bénéficie du soutien du ministère fédéral allemand de l'alimentation et de l'agriculture, représenté par l'agence des matériaux renouvelables (FNR), et de l'appui de l'UE via ERA-Net Woodwisdom-Net. Ce projet sera clôturé en été 2017.

7. Références bibliographiques

- [1] Bjarnadottir, S., Li, Y., and Stewart, M.G., 2011. A probabilistic-based framework for impact and adaptation assessment of climate change on hurricane damage risks and costs. *Structural Safety*, 33 (3), 173–185.
- [2] Brischke, C. and Rapp, A.O., 2010. Service life prediction of wooden components - Part 1: Determination of dose-response functions for above ground decay. In: *Proc. 41st Annual Meeting of the International Research Group on Wood Protection*. Stockholm, Sweden: IRG Secretariat.
- [3] Cornick, S., Djebbar, R., and Alan Dalglish, W., 2003. Selecting moisture reference years using a Moisture Index approach. *Building and Environment*, 38 (12), 1367–1379.
- [4] Cornick, S.M. and Lacasse, M.A., 2006. A Review of Climate Loads Relevant to Assessing the Watertightness Performance of Walls, Windows, and Wall-Window Interfaces. In: B.G. Hardman, C.R. Wagus, and T.A. Weston, eds. *Performance and Durability of the Window-Wall Interface*. ASTM International, 153-153-15.
- [5] DIN 68800-1 Holzschutz - Teil 1: Allgemeines: Wood preservation - Part 1: General = Préservation du bois - Partie 1: Généralités. Berlin: Beuth.
- [6] DIN 68800-2 Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Massnahmen im Hochbau: Wood preservation - Part 2: Preventive constructional measures in buildings = Préservation du bois - Partie 2: Mesures de construction préventives en bâtiments. Berlin: Beuth.
- [7] Foliente, G.C., et al., 2002. Durability design for wood construction. *Forest products journal*, 52 (1), 10–20.
- [8] 2003. *Moisture transport and convection in building envelopes*. PhD thesis. Technical University of Denmark (DTU).
- [9] Isaksson, T., Brischke, C., and Thelandersson, S., 2013. Development of decay performance models for outdoor timber structures. *Materials and Structures*, 46 (7), 1209–1225.
- [10] Kehl, D. Künzel, H., 2009. Ventilation of facades – a necessity? (german: Hinterlüftung von Fassaden – ein Muss?) *Holzbau-DNQ*, 2, 13-17.
- [11] Kočí, J., Maděra, J., and Černý, R., 2014. Generation of a critical weather year for hygrothermal simulations using partial weather data sets. *Building and Environment*, 76, 54–61.
- [12] Lisø, K.R., et al., 2007. A frost decay exposure index for porous, mineral building materials. *Building and Environment*, 42 (10), 3547–3555.
- [13] Nore, C., 2009. *Hygrothermal performance of ventilated wooden cladding*. PhD Thesis: Trondheim Norwegian University of Science and Technology Faculty of Engineering Science and Technology Department of Civil and Transport Engineering (NTNU).
- [14] Ott, S., Loebus, S., and Winter, S., 2013. Prefabricated timber-based façade elements in energy efficiency retrofit (german: Vorgefertigte Holzfassadenelemente in der energetischen Modernisierung). *Bautechnik*, 90 (1), 26–33.
- [15] Pietrzyk, K., 2015. A systemic approach to moisture problems in buildings for mould safety modelling. *Building and Environment*. 86, 50-60.
- [16] Rydock, J.P., et al., 2005. A driving rain exposure index for Norway. *Building and Environment*, 40 (11), 1450–1458.
- [17] Scheffer, T.C., 1971. A climate index for estimating potential for decay in wood structures above ground. *Forest products journal*, 21 (10), 25–31.
- [18] Vanier, D.J. and Lacasse, M.A., 1996. BELCAM project: service life, durability, and asset management research. In: C. Sjostrom, ed. 7th Conf. on Durability of Building Materials and Components. Stockholm, Sweden: Routledge, 848–856.
- [19] Vinha, J. and Käkelä, P., 1999. *Water vapour transmission in wall structures due to diffusion and convection*. Tampere: Tampere University of Technology.
- [20] Winter, S., Bauer, P., and Kehl, D., 2006. *Weathering tests on timber-framed walls with brickwork rainscreen without additional breather membrane on wall elements and with small-scale wooden claddings* (german: Freilandbewitterungsversuche von Holztafelbauwänden mit Mauerwerksvorsatzschale ohne zusätzliche Feuchteschutzschicht auf der Aussenbekleidung der Holztafelelemente und mit hinterlüfteten, kleinformatischen Holzbekleidungen). Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl.