



Projet ISO RHUM

Etude du comportement à l'eau des parois complexes verticales ou
combles en milieu tropical humide

Tâche 1 : Bibliographie



Rédaction : Julie BOSSU – Chargée de recherche CNRS, UMR EcoFoG
Laetitia ADELARD – Enseignante Chercheuse Laboratoire PIMENT
Jean CASTAING-LASVIGNOTTES – Enseignant Chercheur Laboratoire PIMENT

Date : Août 2025

PREAMBULE :

LE PRESENT DOCUMENT NE SE SUBSTITUE EN AUCUN CAS AUX TEXTES DE REFERENCE, QU’ILS SOIENT REGLEMENTAIRES (LOIS, DECRETS, ARRETES...), NORMATIFS (NORMES, DTU, REGLES PROFESSIONNELLES, RECOMMANDATIONS PROFESSIONNELLES RAGE ET PACTE OU REGLES DE CALCUL) OU CODIFICATIFS (AVIS TECHNIQUES, CAHIER DES PRESCRIPTIONS TECHNIQUES...) QUI DOIVENT ETRE CONSULTES.

LE CSTB DECLINE TOUTE RESPONSABILITE QUANT AUX CONSEQUENCES DIRECTES OU INDIRECTES DE TOUTE NATURE QUI POURRAIENT RESULTER DE TOUTE INTERPRETATION ERRONEE DU CONTENU DE CE DOCUMENT.

Pour entreprendre la mise en place de solutions d’isolation adaptées au climat tropical et durables pour la rénovation énergétique des bâtiments en Guyane et à La Réunion, des enseignements sur les bonnes pratiques de pose et la description des risques liés au fort taux d’humidité en Guyane ont permis de faire ressortir de nombreuses problématiques endémiques de ce territoire. A ce jour, plusieurs données spécifiques essentielles restent à rassembler pour permettre l’édition d’un guide de recommandations techniques. Ce document fait un état de l’art sur les projets déjà menés sur la thématique de la caractérisation des isolants classiques et sur le développement d’isolants biosourcés, liste les points qui restent à explorer pour combler les manques de connaissances liés au cas spécifique des zones tropicale, et finalement liste les projets en cours qui visent à apporter des réponses à ces questions essentielles. Dans ce rapport bibliographique est également réalisé un état de l’art de l’étude phénoménologique autour des transports de masse dans les parois du bâtiment, et de la modélisation de ces phénomènes physiques.

Table des matières

I.	Introduction	7
II.	Etat de l'art.....	8
II.1	Approche phénoménologique des transferts hygrothermiques dans une paroi complexe multicouche.....	8
II.1.1	Transferts de masse.....	9
II.1.2	Diffusion de la vapeur – Loi de Fick	9
II.1.3	Ecoulement liquide – Loi de Darcy	9
II.1.4	Migration par capillarité	10
II.1.5	Advection.....	10
II.1.6	Ventilation	11
II.2	Transferts de chaleur	11
II.2.1	Loi de Fourier	11
II.3	Bilan énergétique stationnaire	12
II.3.1	Approche Statique	13
II.3.2	Méthode Glaser	15
II.4	Approche dynamique – Equations de conservations	16
II.4.1	Conservation de l'énergie thermique.....	17
II.4.2	Conservation de la masse	17
II.4.3	Sorption et désorption	17
II.4.4	Modèle numérique (HAM) et validation numérique expérimentale via WUFI.....	18
III.	Etat des lieux des projets/études déjà menées sur les transferts hygrothermiques dans les matériaux.....	21
III.1	Amélioration de la modélisation des transferts température/humidité dans les parois des bâtiments	21
III.2	Développement de nouveaux isolants biosourcés pour remplacer les isolants classiques ...	22
III.3	Exemples d'études appliquées au cas des climats tropicaux	24
IV.	Synthèses des connaissances manquantes liées aux conditions environnementales uniques de la Guyane et de La Réunion.....	25
IV.1.	Identification des futures études à mener pour combler ces manques.....	26
V.	Bibliographie	29

Table des figures

Figure 1 : Paroi sandwich représentative d'une toiture rampante en milieu tropical	8
Figure 2 : Schéma condensation	8
Figure 3 : Représentation schématique du bilan énergétique local	12
Figure 4 : Digramme de l'air humide (Energie plus)	15
Figure 5 : Isothermes de sorption et désorption	17
Figure 6 : Interface WUFI 2D pour le maillage des matériaux	20
Figure 7 : Format des fichiers WAC	20
Figure 8 : Exemple de résultat de simulation pour la température de la laine de verre pendant 24h	21

Nomenclature

Symbole	Nom	Unité
a	Constante empirique (formule Magnus-Tetens)	17,625 (adimensionnée)
b	Constante empirique (formule Magnus-Tetens)	243,04 °C
c	Capacité thermique massique	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
c_v	Concentration massique de vapeur	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
D_φ	Coefficient de diffusion de vapeur en fonction de φ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
D_v	Coefficient de diffusion de vapeur	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
D_w	Coefficient de transport capillaire	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
e	Épaisseur de couche	m
J_l	Flux massique d'eau liquide	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
J_v	Flux massique de vapeur d'eau	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
$K(\theta)$	Conductivité hydraulique	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$
k	Perméabilité intrinsèque	m^2
L_v	Chaleur latente de vaporisation	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
M	Masse molaire	$\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$
P	Pression de l'eau	Pa
P_v	Pression partielle de vapeur d'eau	Pa
P_{sat}	Pression de saturation	Pa
q_{cond}	Densité de flux par conduction	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
q_{conv}	Densité de flux par convection	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
q_{IR}	Densité de flux par rayonnement infrarouge	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
q_{solaire}	Densité de flux de rayonnement solaire incident	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
R	Constante universelle des gaz parfaits	$8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
R_{th}	Résistance thermique	$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$

Symbole	Nom	Unité
R_v	Constante spécifique de la vapeur d'eau	$461,5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
S	Terme source dans conservation de masse	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
T	Température	$^{\circ}\text{C}$ ou K
T_r	Température du point de rosée	$^{\circ}\text{C}$
$\alpha(T, \varphi)$	Terme auxiliaire formule Magnus-Tetens	Adimensionné
λ	Conductivité thermique	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
μ	Viscosité dynamique de l'eau	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
μ_i	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau	Adimensionné
$\psi(\theta)$	Potentiel capillaire	Pa
ρ	Masse volumique	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
θ	Teneur en eau volumique	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
φ	Humidité relative	$\%$
δ_v	Perméabilité à la vapeur d'eau	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$
v	Vitesse de l'air à travers le matériau	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
w	Teneur en eau massique	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$
w_v	Teneur en eau sous forme vapeur	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Z	Résistance à la diffusion de vapeur	m

I. Introduction

Dans un contexte climatique tendu, le secteur du bâtiment représente une part majeure des émissions mondiales de gaz à effet de serre, atteignant 21 % des émissions globales en 2019 (IPCC, 2022, Chapitre 9). Cette pression environnementale est d'autant plus critique dans les zones tropicales humides comme La Réunion, où le dérèglement climatique entraîne une augmentation marquée des besoins en climatisation et en énergie pour assurer le confort thermique des occupants. Dans ce contexte, renforcer la performance hygrothermique des bâtiments est un levier essentiel pour concilier développement urbain, adaptation locale et atténuation des émissions. Cela passe notamment par une meilleure compréhension des phénomènes liés à l'humidité dans les parois, en particulier la condensation, processus de transformation de la vapeur d'eau en eau liquide au sein des matériaux. Des études récentes montrent l'importance de l'optimisation des propriétés naturelles du bâtiment et de son environnement dans les régions chaudes et humides pour limiter la dépendance énergétique des bâtiments (Nguyen & Reiter, 2015).

Le comportement hygrothermique des matériaux utilisés dans l'enveloppe d'un bâtiment (parois, murs, toitures) joue un rôle déterminant dans sa performance globale. Des niveaux excessifs d'humidité dans le bâti ou des infiltrations d'eau dues aux fortes pluies (Rouchier, S., 2013) peuvent engendrer des pathologies de construction. Ces niveaux d'humidité influencent également la qualité de l'air intérieur et le confort hygrothermique des occupants (Zhou et al., 2015). En effet, l'humidité favorise les phénomènes de condensation à l'intérieur même des matériaux, ce qui altère leurs performances thermiques, favorise le développement de moisissures et réduit considérablement la durée de vie du bâtiment (Berger et al., 2010). Ces moisissures, par leur activité biologique, accélèrent le vieillissement des matériaux et peuvent provoquer des dommages structuraux (Viitanen et al., 2010).

Face à ces enjeux spécifiques aux climats tropicaux humides, l'État français a mis en place dès 2010 la Réglementation Thermique, Acoustique et Aération pour les départements d'outre-mer (RTAA DOM). Cette réglementation impose des exigences minimales en matière de performance énergétique, d'isolation thermique, de qualité de l'air intérieur et de confort des occupants. Elle vise à adapter la construction aux contraintes climatiques locales, en limitant le recours à la climatisation tout en garantissant des conditions de confort acceptables. Dans ce cadre, la RTAA DOM accorde une attention particulière à la maîtrise de la température ambiante, à l'optimisation des échanges d'air par ventilation naturelle et aux protections vis à vis du rayonnement solaire. Elle encourage ainsi l'utilisation de matériaux adaptés, dont la perméabilité à la vapeur d'eau est compatible avec le climat tropical humide. Toutefois, les risques de condensation sont peu abordés dans cette réglementation (RTAA DOM, 2009).

C'est dans ce cadre réglementaire et environnemental que s'inscrit le projet de recherche ISO-RHUM (Isolation en Régions HUMides), qui vise à mieux comprendre le comportement dynamique de la condensation dans les parois de toiture soumises à des sollicitations hygrothermiques variables. L'objectif du projet est d'analyser les transferts de chaleur et d'humidité dans des configurations représentatives des constructions réunionnaises, en intégrant une approche expérimentale et de simulation numérique. Si une partie des travaux concerne des matériaux biosourcés, le projet n'y est pas exclusivement dédié : il s'agit plus largement d'identifier les solutions constructives les plus durables face aux contraintes climatiques locales, qu'elles reposent sur des matériaux classiques, biosourcés ou mixtes.

II. Etat de l'art

II.1 Approche phénoménologique des transferts hygrothermiques dans une paroi complexe multicouche.

Une paroi complexe, présentée en figure 1, composée de plusieurs couches de matériaux différents juxtaposés, voire de lames d'air, est soumise à des transferts simultanés de chaleur et de masse dans chaque matériau. Dans les climats tropicaux humides, comme à La Réunion ou la Guyane, ces transferts sont accentués par les fortes humidités relatives extérieures et les écarts de température entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments. Les matériaux constituant la paroi réagissent différemment en fonction de leur conductivité thermique, de leur perméabilité à la vapeur d'eau, et de leur porosité, influençant ainsi les échanges thermiques et hygriques. La compréhension des phénomènes physiques imposant ces transferts couplés de chaleur et d'humidité, incluant :

- la diffusion de vapeur,
- la migration de l'eau liquide,
- l'accumulation d'humidité,
- le flux thermique ;

est essentielle pour comprendre et anticiper les risques de condensation interne, en intégrant l'ensemble des mécanismes de transfert de masse et d'énergie au sein de la paroi (Hens, 2012 ; Janssen, 2011).

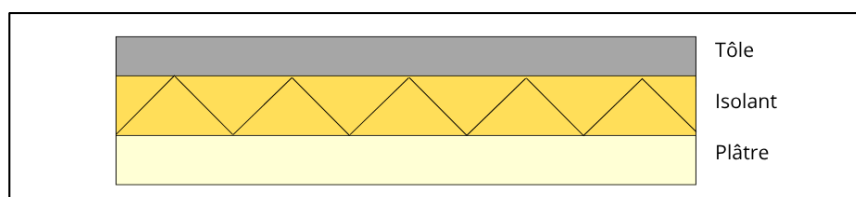


Figure 1 : Paroi sandwich représentative d'une toiture rampante en milieu tropical

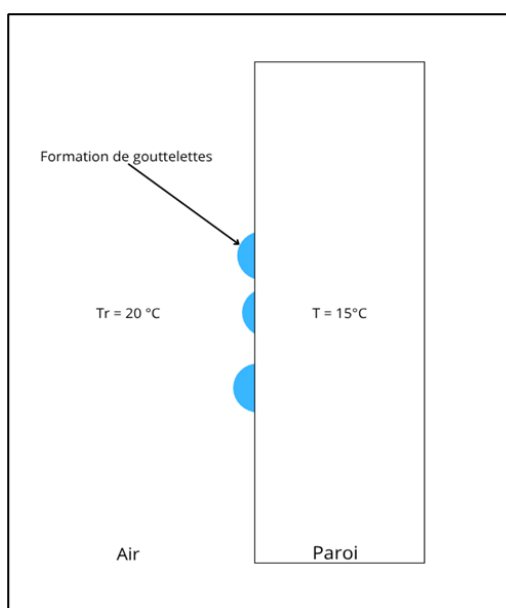


Figure 2 : Schéma condensation

Lorsque l'air humide est refroidi, sa capacité à contenir de la vapeur d'eau diminue. Si la température d'une paroi atteint le point de rosée, la vapeur condense en gouttelettes sur ses surfaces schématisées en figure 2. En climat humide, où l'humidité est naturellement élevée, la maîtrise de ce phénomène est essentielle pour éviter l'humidité piégée dans les parois, cause de leur détérioration. À titre d'exemple, l'humidité relative à Saint-Pierre, en zone littorale de La Réunion, varie en moyenne entre 75 et 83 %, contre 61 et 83 % à Lyon selon les saisons (Climate Data, s.d.).

Une étude de Zhou et al. (2015) a montré que l'interaction entre humidité relative, comportement hygroscopique des matériaux et température intérieure conditionne fortement la perception du confort dans les bâtiments. Cette régulation passive de l'humidité par des matériaux notamment biosourcés permettra de limiter les pointes d'humidité et ainsi de réduire les besoins de climatisation. De plus, TenWolde et al. (2001) insistent sur la nécessité de contrôler l'humidité dans l'enveloppe, en combinant conception des couches, ventilation, drainage et gestion des transferts hygrothermiques pour limiter les risques de condensation et de dégradation.

II.1.1 Transferts de masse

Les transferts d'humidité dans les matériaux se produisent selon plusieurs mécanismes : diffusion de vapeur d'eau (loi de Fick), par écoulement de l'eau liquide (loi de Darcy), par migration capillaire et advection par le mouvement d'air.

II.1.2 Diffusion de la vapeur – Loi de Fick

La loi de Fick décrit le transfert de matière par diffusion, c'est-à-dire le déplacement de particules à travers les matériaux poreux, selon un gradient de pression partielle de vapeur. Dans ce rapport, les flux sont exprimés en valeurs scalaires, correspondant à la norme du vecteur de flux, et considérés unidimensionnels. Sa formule générale (Crank, J. 1975) :

$$J_v = -D_v \frac{dc_v}{dx} \quad \text{eq. 1}$$

Avec D_v dans l'air = $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Cette formule peut être adaptée pour le bâtiment :

$$J_v = -\delta_v \frac{dP_v}{dx} \quad \text{eq. 2}$$

où la perméabilité à la vapeur $\delta_v = \frac{D_v \rho_{\text{air}}}{R_v T}$ (1 à $5 \cdot 10^{-11} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ pour la laine minérale et 10^{-12} à 10^{-13} pour le béton) et la constante spécifique d'un gaz $R_v = \frac{R}{M_v}$. eq. 3

II.1.3 Ecoulement liquide – Loi de Darcy

La loi de Darcy décrit l'écoulement d'un fluide à travers des milieux poreux. Il s'agit d'un phénomène macroscopique d'écoulement, dans lequel le liquide se déplace de la zone à haute pression vers la zone à plus basse pression. Comme pour les autres flux du rapport, le flux est exprimé en norme scalaire unidimensionnelle. Elle a été formulée par Henry Darcy en 1856 de la façon suivante:

$$J_l = -\frac{k}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad \text{eq. 4}$$

En fonction de la teneur en eau la formule devient (Bear, J. 1972) :

$$J_l = -K(\theta) \frac{d\Psi(\theta)}{dx} \quad \text{eq. 5}$$

Dans cette loi, la perméabilité intrinsèque k caractérise la capacité d'un matériau poreux à laisser passer un fluide. Elle dépend uniquement de la structure du matériau (taille et agencement des pores). À l'inverse, la viscosité dynamique μ est une propriété bien plus connue, qui décrit la résistance d'un fluide à l'écoulement. La viscosité est largement documentée (The Engineering Toolbox) et facile à utiliser, par exemple à 20°C : $\mu_{\text{eau}} = 10^{-3}$ et $\mu_{\text{air}} = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}^{-1}$. Tout le contraire de k (10^{-16} à 10^{-19} m^2 pour le béton), qui nécessite des mesures expérimentales spécifiques.

II.1.4 Migration par capillarité

La migration par capillarité, exprimée par un potentiel capillaire, désigne le transport d'eau liquide dans les matériaux poreux sous l'effet des forces de tension de surface entre le liquide et les parois solides des pores. Ce phénomène est particulièrement actif dans les matériaux non saturés, où l'eau est attirée vers les zones les plus sèches ou plus froides (Janssen, H. 2011). Il est négligé dans l'approche statique et s'écrit de la manière suivante en fonction de l'humidité relative à partir de la Loi de Darcy (Künzel, H. M. 1995), exprimé sous forme scalaire unidimensionnelle :

$$J_l = -D_w(\varphi) \frac{d\varphi}{dx} \quad \text{eq. 6}$$

Soit en fonction de la teneur en eau massique :

$$J_l = -D_w(w) \frac{dw}{dx} \quad \text{eq. 7}$$

Par exemple, le coefficient de transport capillaire D_w pour le bois varie de 10^{-8} à $10^{-10} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ en fonction de son humidité et la teneur en eau w varie de 0.01 à 0.3 selon le matériau (Künzel, 1995).

II.1.5 Advection

L'advection correspond au transfert de vapeur d'eau transportée par l'air en mouvement, par convection, et non par diffusion moléculaire. Ce phénomène apparaît généralement en cas d'infiltrations d'air non maîtrisées ou de fuites à travers les parois, les joints ou les défauts d'étanchéité. L'air chargé en vapeur d'eau pénètre alors dans l'enveloppe du bâtiment sous l'effet d'un gradient de pression, lié au vent, à l'effet cheminée ou à une ventilation déséquilibrée. Contrairement à la diffusion, qui est un processus lent, l'advection peut transporter rapidement de grandes quantités de vapeur vers une zone froide, où la température est inférieure au point de rosée. Cela favorise la condensation interne dans les matériaux, souvent de manière invisible, mais pouvant entraîner des pathologies importantes (moisissures, perte d'isolation, corrosion). Ce flux peut s'exprimer par la relation :

$$J_v^{adv} = v \frac{P_v}{R_v T} \quad \text{eq. 8}$$

L'advection est particulièrement critique dans les bâtiments mal ventilés, très étanches ou exposés à des écarts de pression importants. Comme le montrent Feist & Schnieders (2009), même de faibles infiltrations peuvent suffire à introduire des quantités significatives d'humidité dans les parois, en particulier dans les climats chauds et humides.

II.1.6 Ventilation

La ventilation est essentielle dans la régulation de l'humidité intérieure, en particulier en climat tropical humide où l'air ambiant est naturellement chargé en vapeur d'eau. En assurant un renouvellement d'air constant, la ventilation permet d'évacuer l'excès de vapeur produit à l'intérieur du bâtiment, que ce soit par les occupants ou les activités courantes comme la cuisine ou la douche. Elle contribue ainsi à maintenir une humidité relative maîtrisée, limitant les risques de condensation sur ou dans les parois. Il existe deux grands principes de ventilation : la ventilation naturelle et la ventilation mécanique. La première repose sur les différences de température et de pression entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment, favorisant l'écoulement de l'air à travers des ouvertures telles que les fenêtres ou les grilles d'aération. Elle est particulièrement adaptée aux zones tropicales car elle ne nécessite pas d'énergie et s'appuie sur les conditions climatiques locales. La ventilation mécanique, quant à elle, repose sur des dispositifs techniques assurant un débit d'air constant et contrôlé, comme les systèmes de ventilation mécanique contrôlée (VMC). Bien qu'efficace, elle peut présenter des difficultés dans les environnements humides, notamment en raison du risque de condensation dans les gaines. Au-delà de son rôle d'évacuation de l'humidité, la ventilation permet également de limiter les transferts par advection en réduisant les écarts de pression d'air à travers l'enveloppe. Une conception bien pensée des parcours de l'air dans le bâtiment, avec un positionnement adapté des entrées et sorties, permet d'éviter les zones de stagnation où l'humidité pourrait s'accumuler.

Ainsi, la ventilation ne se limite pas à une simple gestion de l'air intérieur, mais s'intègre pleinement dans une stratégie globale de maîtrise des transferts hygrothermiques et de prévention des pathologies liées à l'humidité. Comme le souligne TenWolde et al. (2001), la ventilation doit être pensée en cohérence avec les matériaux utilisés et les autres mécanismes de régulation. Des travaux récents (Laverge et al., 2011) montrent par ailleurs que la performance des systèmes de ventilation doit être évaluée en interaction avec les transferts d'humidité internes, en particulier dans les bâtiments à haute efficacité énergétique, où les risques de condensation peuvent être amplifiés par des enveloppes très étanches.

II.2 Transferts de chaleur

Le transfert de chaleur au sein des matériaux participe au déclenchement des phénomènes de condensation. En effet, celle-ci se produit lorsque la température locale d'une paroi descend en dessous du point de rosée de l'air ambiant, entraînant la transition de la vapeur d'eau en phase liquide (Aelenei & Henriques, 2008). Cette chute de température résulte du bilan énergétique local, c'est-à-dire de la somme des flux thermiques entrants et sortants à la surface du matériau, qui dépend directement des conditions climatiques extérieures et intérieures (Qin, 2007).

II.2.1 Loi de Fourier

Le transfert de chaleur à l'intérieur des parois s'effectue en grande partie par conduction. Il est décrit par la loi de Fourier, qui relie la densité de flux thermique au gradient de température (Incropera et al. 2007) :

$$q_{cond} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad \text{eq. 9}$$

Cette loi exprime que la chaleur circule naturellement des zones chaudes vers les zones froides. La capacité d'un matériau à transmettre la chaleur dépend de sa conductivité thermique λ , dont les valeurs pour des matériaux usuels sont consultables dans un papier de Sari et al (2023). Plus celle-ci est élevée, plus le transfert est rapide. Les isolants thermiques se caractérisent donc par une faible valeur de λ . Dans les applications pratiques, on utilise la résistance thermique, découlant de la loi de Fourier pour quantifier la capacité d'un matériau ou d'une paroi à ralentir la conduction thermique (Baehr & Stephan, 2012). Pour une couche homogène de matériau est donnée par :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda} \quad \text{eq. 10}$$

Plus R_{th} est élevé, plus la paroi est résistante au passage de la chaleur. Dans une paroi multicouche, les résistances thermiques s'additionnent.

II.3 Bilan énergétique stationnaire

Dans le cas d'un régime stationnaire, il est possible d'évaluer la température atteinte par une paroi ou l'une de ses surfaces à l'aide d'un bilan énergétique. Correspondant à l'équilibre entre les différents flux thermiques échangés avec l'environnement, qui déterminent la température locale du matériau.

La surface d'une paroi est soumise à plusieurs formes de transferts de chaleur : la conduction thermique à travers les couches internes du matériau (gouverné par la loi de Fourier), les échanges convectifs avec l'air ambiant, le rayonnement solaire absorbé en surface et le rayonnement infrarouge échangé avec l'environnement (Fig. 3). Ces phénomènes sont dynamiques et fortement influencés par les conditions météorologiques telles que l'ensoleillement, la vitesse du vent, l'humidité de l'air ou encore la température extérieure.

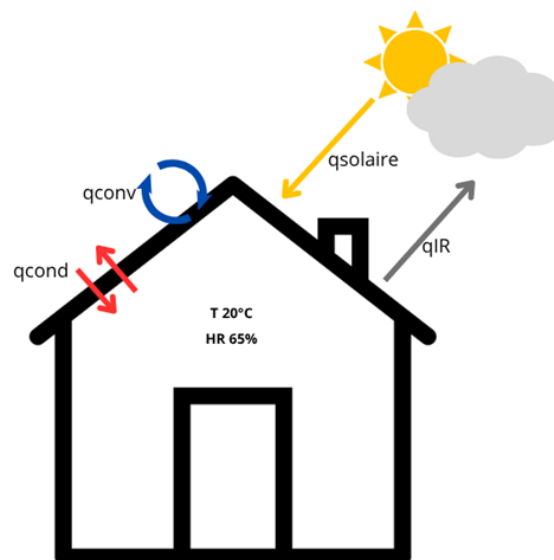


Figure 3 : Représentation schématique du bilan énergétique local

Le bilan énergétique stationnaire peut alors s'écrire sous la forme d'une équation d'équilibre :

$$q_{solaire} + q_{IR} + q_{conv} = q_{cond} \quad \text{eq. 11}$$

Ce bilan permet d'estimer la température d'équilibre de surface à un instant donné. Lorsque cette température descend en dessous du point de rosée de l'air ambiant, la vapeur d'eau se condense en eau liquide sur ou dans la paroi (Qin, 2007 ; Aelenei & Henriques, 2008). Ce risque est accru dans les zones tropicales humides, où l'humidité relative est élevée et les variations thermiques importantes, notamment journalier. Des observations expérimentales menées par Carmeliet et al. (2012) ont montré que ces bilans de surface ont un impact direct sur la migration de la vapeur d'eau à travers les parois. En soumettant plusieurs configurations murales à des cycles contrôlés de mouillage et de séchage, ils ont démontré que les gradients thermiques générés par le rayonnement solaire ou la climatisation influencent les transferts d'humidité.

Enfin, ce raisonnement repose sur une approche stationnaire pour simplifier l'analyse, la réalité est souvent transitoire. Les échanges énergétiques évoluent constamment sous l'effet des variations climatiques horaires ou saisonnières. Les travaux de Tai et al. (2022) ont ainsi mis en évidence l'importance d'une modélisation couplée et dynamique des transferts de chaleur et d'humidité, montrant que les cycles d'humidification et de séchage dépendent directement des interactions entre température, humidité relative et pression de vapeur.

II.3.1 Approche Statique

Avant d'aborder les phénomènes de condensation dans les parois du bâtiment, il est nécessaire de comprendre les propriétés de l'air humide. L'approche statique considère une situation simplifiée et stationnaire : la température et l'humidité varient uniquement dans l'espace, sans dépendance temporelle. L'air humide est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau, dont l'état est caractérisé par la température, la pression partielle de vapeur d'eau, la pression de saturation et l'humidité relative.

En considérant l'air humide comme un mélange de gaz parfaits, nous pouvons ainsi définir les relations relatives à la pression et à l'énergie interne :

$$P = P_{as} + P_v \quad \text{eq. 12}$$

$$H = H_{as} + H_v \text{ avec } H_{as} = m_{as} h_{as} \text{ et } H_v = m_v h_v \quad \text{eq. 13}$$

où P_{as} est la pression partielle d'air sec et P_v la pression partielle de vapeur d'eau. De même, H_{as} est l'enthalpie de l'air sec seul et H_v est l'enthalpie de la vapeur d'eau seule. Ces deux grandeurs sont données en fonction des enthalpies spécifiques massiques (h_v et h_{as}) des corps purs.

Appliquant la loi des gaz parfaits pour chacun des deux gaz à la même température T (Kelvin) contenus dans un seul volume V , on obtient :

$$\begin{cases} P_{as} V = m_{as} T \frac{R}{M_{as}} = n_{as} RT \\ P_v V = m_v T \frac{R}{M_v} = n_v RT \end{cases} \quad \text{eq. 14}$$

La masse d'un volume gazeux est égale à la somme des masses des deux constituants et s'exprime en fonction de l'humidité spécifique w défini comme suit :

$$m = m_{as} + m_v = m_{as} \left(1 + \frac{m_v}{m_{as}} \right) = m_{as} (1 + w) \text{ avec } w = \frac{m_v}{m_{as}} \text{ en kg d'eau/kg air sec} \quad \text{eq. 15}$$

Pour un gaz parfait, l'enthalpie ne dépend que de la température, soit :

$$dh = C_p dT$$

En outre, si l'on suppose que la capacité calorifique à pression constante C_p est indépendante de la température ($C_p = C_{te}$), on peut écrire, pour l'enthalpie de l'air sec :

$$h_{as} = C_{pas} (T - 273.15) = C_{pas} t$$

soit : $h_{as} = 1,006 t$ avec h_{as} en kJ/kg.

où l'on a pris la température de 273.15K comme température de référence à laquelle l'enthalpie de l'air sec est nulle et où l'on définit $t = T - 273.15$, c'est à dire que t représente la température en degrés Celsius.

Une démarche similaire est suivie pour la vapeur d'eau, supposée être un gaz parfait, mais une différence importante est introduite pour l'origine de l'enthalpie. Au lieu de prendre comme origine de l'enthalpie à 0°C, l'enthalpie de la vapeur d'eau c'est l'enthalpie de l'eau liquide que l'on prend comme référence. Dans ces conditions, on a, pour la vapeur d'eau, considérée comme un gaz parfait :

$$h_v = L + C_{pv} t \quad \text{eq. 16}$$

Ces grandeurs permettent de déterminer si l'air est proche de la saturation. L'approche statique permet, à partir des conditions intérieures et extérieures, de déterminer si un risque de condensation existe à l'intérieur d'une paroi multicouche. Cette méthode est utilisée dans la conception des enveloppes du bâtiment, notamment via la méthode Glaser.

II.3.1.1 Eau pure : pression de saturation

Dans une atmosphère contenant de l'eau à l'état liquide et vapeur, la pression de saturation dépend uniquement de la température. Elle représente la pression maximale de vapeur que l'air peut contenir avant condensation. Cette relation est donnée par l'équation empirique :

$$P_{sat}(T) = 10^{\frac{7,625 \times T}{241 + T} + 2,7877} \quad \text{eq. 17}$$

II.3.1.2 Humidité relative

L'humidité relative est le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air et la pression de saturation de cette vapeur d'eau à la même température (Padfield, T. 1998) :

$$\phi = \frac{P_v}{P_{sat}(T)} \quad \text{eq. 18}$$

II.3.1.3 Point de rosée

Le point de rosée est une propriété de l'air humide. Il correspond à la température à laquelle, pour une quantité de vapeur d'eau fixée dans l'air, la pression de saturation P_{sat} est égale à la pression de vapeur P_v . Autrement dit, c'est la température à laquelle l'air atteint la saturation ($\phi = 100\%$) : au-delà, la vapeur d'eau commence à se condenser pour former de la rosée (Lawrence, M. G., 2005). Le point de rosée ne dépend pas de la surface sur laquelle se forme la condensation, mais lorsque celle-ci atteint une température inférieure ou égale au point de rosée de l'air ambiant, la vapeur présente se condense à son contact sous forme de gouttelettes. Ce phénomène est facilement observable après une douche : l'humidité relative augmente progressivement, ce qui élève la température du point de rosée, jusqu'à atteindre le seuil de condensation sur les miroirs ou les vitres plus froids. Ainsi, la figure 4 illustre

le diagramme de l'air humide (psychrométrique) : graphiquement, pour un air à 20°C, 50% d'HR et 1013 hPa, la température du point de rosée est de 10°C.

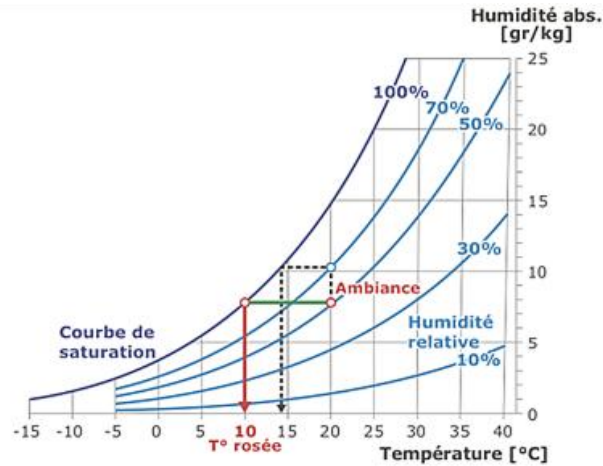


Figure 4 : Diagramme de l'air humide (Energie plus)

Par le calcul, on utilise la formule empirique de la pression de saturation (Casting-Lasvignottes, J., 2023) :

1. Définition du point de rosée :

Le point de rosée (T_r) est la température à laquelle la pression de saturation $P_{sat}(T_r)$ est égale à la pression partielle de vapeur d'eau P_v dans l'air soit :

$$P_{sat}(T_r) = P_v \quad \text{eq. 19}$$

2. Etapes de calcul pour déterminer point de rosée :

Calcul de pression partielle de vapeur d'eau (P_v) :

$$P_v = \varphi \cdot P_{sat}(T) \quad \text{eq. 20}$$

Résolution inverse pour trouver T_r :

$$T_r = \frac{241 \times (\log(P_v) - 2,7877)}{7,625 - (\log(P_v) - 2,7877)} \quad \text{eq. 21}$$

Il est également possible d'approximer ce point de rosée à partir de la formule de Mangus-Tetens ajustée à partir de l'équation empirique de Clausius-Clapeyron (Ateliers numériques en Mécanique, s.d.). Elle est valable pour des températures comprises entre 0 °C et 60 °C et des humidités relatives entre 1 % et 100 % (d'Alexis, C., 2011 ; Tetens, O., 1930) :

$$T_r = \frac{b \cdot \alpha(T, \varphi)}{a - \alpha(T, \varphi)} \quad \text{avec} \quad \alpha(T, \varphi) = \frac{a \cdot T}{b + T} + \ln(\varphi) \quad \text{eq. 22}$$

II.3.2 Méthode Glaser

La méthode Glaser est une méthode statique unidimensionnelle utilisée dans le domaine du bâtiment pour analyser le risque de condensation interstitielle dans une paroi multicouche (Exemple : toiture, mur, plancher). Elle repose sur le calcul du profil de température et la comparaison entre la pression de vapeur réelle diffusée et la pression de saturation, à chaque interface entre les couches

(Cahier du CSTB n° 2075, 1985). L'hypothèse est qu'on se trouve en régime stationnaire négligeant la diffusion de vapeur selon Fick et la migration par capillarité. Aussi, la température et l'humidité relative sont connues aux extrémités (Glaser, H. 1958).

1. Résistance thermique pour chaque couche :

$$R_{th,i} = \frac{e_i}{\lambda_i} \quad \text{eq. 23}$$

2. Résistances cumulées :

$$R_{tot} = R_{int} + \sum_{i=1}^n R_{th,i} + R_{ext} \quad \text{eq. 24}$$

3. Résistances thermiques cumulées jusqu'à chaque interface i :

$$R_{cum,i} = R_{int} + \sum_{j=1}^{i-1} R_{th,j} \quad \text{eq. 25}$$

4. Température à chaque interface i :

$$T_i = T_{int} - \frac{R_{cum,i}}{R_{tot}} \times (T_{int} - T_{ext}) \quad \text{eq. 26}$$

5. Calcul de la pression de saturation :

$$P_{sat}(T_i) = 10^{\frac{7,625 \times T_i}{241 + T_i} + 2,7877} \quad \text{eq. 27}$$

6. Calcul de la pression de vapeur réelle aux extrémités :

$$P_{v,int} = \phi_{int} \times P_{sat}(T_{int}) \quad \text{eq. 28}$$

$$P_{v,ext} = \phi_{ext} \times P_{sat}(T_{ext}) \quad \text{eq. 29}$$

7. Résistance à la diffusion de vapeur cumulée :

$$Z_i = \sum_{j=1}^i \mu_j \times e_j ; Z_{tot} = \sum_{j=1}^n \mu_j \times e_j \quad \text{eq. 30}$$

8. Pression de vapeur réelle diffusée à chaque interface :

$$P_{v,réel,i} = P_{v,int} - \left(\frac{Z_i}{Z_{tot}}\right) \times (P_{v,int} - P_{v,ext}) \quad \text{eq. 31}$$

9. Vérification du risque de condensation

$$P_{v,réel,i} > P_{sat}(T_i) \Rightarrow \text{Condensation}$$

II.4 Approche dynamique – Equations de conservations

En réalité, les transferts de chaleur et d'humidité à travers une paroi sont des phénomènes transitoires. Une modélisation dynamique repose donc sur l'application des équations de conservation de l'énergie et de la masse, couplées dans l'espace et dans le temps. La thèse de Ferroukhi (2015) souligne l'importance de cette approche dynamique couplée, en montrant que la modélisation des transferts thermo-hydro-aérauliques dans les enveloppes de bâtiments permet de mieux évaluer les

désordres liés à l'humidité, en particulier dans les contextes fortement sollicités comme les climats tropicaux humides.

II.4.1 Conservation de l'énergie thermique

L'équation de conservation de l'énergie thermique sous forme de scalaire unidimensionnelle s'écrit :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L_v \frac{\partial w_v}{\partial t} \quad \text{eq. 32}$$

Elle prend en compte l'accumulation d'énergie, la conduction (terme Fourier), et les effets de changement de phase via la chaleur latente. Carmeliet et al. (2012) ont mis en évidence par des essais en conditions réelles l'effet combiné des flux thermiques (convection, conduction, rayonnement) et des transferts hygriques sur le comportement dynamique des murs multicouches.

II.4.2 Conservation de la masse

L'équation de conservation de la masse combine diffusion de vapeur et migration capillaire exprimés ici sous forme de scalaire unidimensionnelle :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_\phi \frac{d\phi}{dx} + D_w \frac{dw}{dx} \right) + S \quad \text{eq. 33}$$

Le terme $D_\phi \frac{d\phi}{dx}$ représente la diffusion de vapeur selon la loi de Fick et $D_w \frac{dw}{dx}$ décrit la migration de l'eau liquide par capillarité, assimilable à une forme généralisée de la loi de Darcy. Tai et al. (2022) ont montré l'importance de ce couplage dynamique dans la prédiction des cycles humidification/séchage en climat tropical.

II.4.3 Sorption et désorption

Les matériaux échangent de l'eau avec l'air ambiant selon des processus de sorption (adsorption) et désorption, qui sont caractérisés par des isothermes de sorption (Fig. 5). Ces courbes relient la teneur en eau du matériau w à l'humidité relative ϕ à température constante. Ceci démontre la capacité du matériau à stocker et à libérer l'humidité en fonction de son environnement.

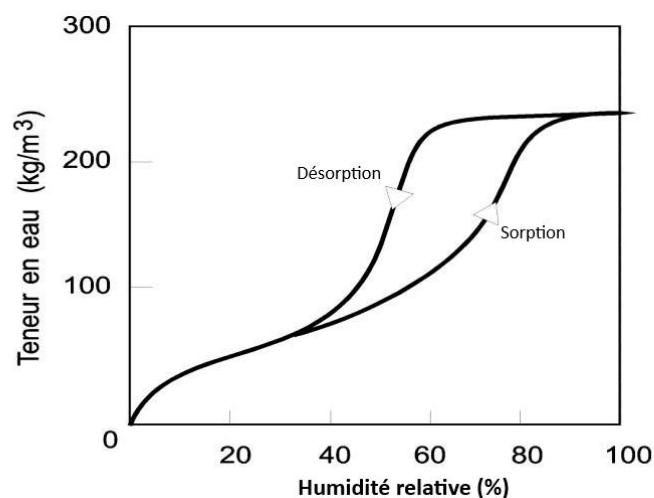


Figure 5 : Isothermes de sorption et désorption

Ces échanges, peuvent présenter un phénomène d’hystérésis entre adsorption et désorption. Lors d’un cycle humidification-séchage, la courbe d’isotherme suivie par le matériau en désorption ne correspond pas à celle de l’adsorption. En d’autres termes, un matériau contient plus d’eau à une même humidité relative en désorption qu’en adsorption. Ce comportement, observé notamment dans les matériaux poreux comme le bois ou les isolants biosourcés, peut avoir un impact sur la capacité des parois à stocker ou restituer l’humidité. De plus, certains matériaux peuvent modérer activement les variations d’humidité ambiant. Rode et al. (2005) ont montré que cette capacité à réguler passivement l’humidité contribue à améliorer le confort intérieur et à réduire les risques de condensation, notamment dans les environnements humides. Salonvaara et al. (2009) ont par ailleurs souligné que ce phénomène influence directement la stabilité du climat intérieur et peut, s’il est bien pris en compte, améliorer la précision des simulations énergétiques et hygrothermiques. Cependant, bien que l’influence exacte de cette hystérésis sur les transferts hygrothermiques reste en partie discutée, plusieurs travaux ont étudié ses effets sur la régulation de l’humidité, la modélisation dynamique et la performance des matériaux (El Hachem, 2021 ; Kwiatkowski et al., 2011 ; Rosa Latapie et al., 2023 ; Boumediene, 2022).

II.4.4 *Modèle numérique (HAM) et validation numérique expérimentale via WUFI*

La compréhension des transferts hygrothermiques dans les enveloppes du bâtiment repose aujourd’hui sur des modèles numériques couplés, regroupés sous l’appellation HAM (*Heat, Air and Moisture*). Ces modèles prennent simultanément en compte les transferts de chaleur, d’humidité (sous forme de vapeur et de liquide) et, dans certains cas, les mouvements d’air à travers les matériaux poreux. L’approche HAM s’appuie sur la résolution dynamique des équations de conservation de l’énergie et de la masse, et permet de simuler avec précision les phénomènes de conduction thermique, de diffusion de vapeur, de migration capillaire et de condensation. En climat tropical humide, où les interactions entre température, humidité relative et pression de vapeur sont particulièrement intenses, le recours à un modèle HAM est indispensable pour évaluer le comportement des parois soumises à des cycles hygrométriques et thermiques rapides. Il permet notamment de détecter les zones à risque de condensation, d’identifier les périodes critiques d’humidification ou de séchage, et d’anticiper les pathologies liées à l’accumulation d’eau au sein des matériaux. Plusieurs modèles existent, sous différentes plateformes (Comsol, Matlab, etc...).

Pour illustrer concrètement cette approche, le projet ISO-RHUM s’appuie sur le logiciel WUFI (*Wärme Und Feuchte Instationär*), développé par le Fraunhofer IBP. WUFI implémente une version unidimensionnelle ou bidimensionnelle du modèle HAM, en résolvant numériquement les équations de transfert couplé de chaleur et d’humidité dans le temps. Il intègre les caractéristiques hygrothermiques des matériaux (conductivité thermique, capacité thermique, perméabilité à la vapeur, courbes de sorption, etc.) ainsi que les conditions climatiques extérieures et intérieures (température, humidité, rayonnement, précipitations). Dans ce projet, WUFI 2D est utilisé pour simuler les toitures multicouches typiques des constructions réunionnaises. L’interface du logiciel permet de modéliser les différentes couches de la paroi, d’attribuer à chacune ses propriétés physiques, et de définir précisément les conditions aux limites à partir de fichiers climatiques horaires (format WAC ou EPW). La simulation restitue l’évolution transitoire de paramètres clés tels que la température, l’humidité relative, la teneur en eau ou le point de rosée au sein des différentes couches. Ces résultats numériques sont ensuite comparés aux données issues des expérimentations ISO-RHUM, notamment celles obtenues en enceinte climatique contrôlée ou in situ, afin de valider la fiabilité du modèle et d’ajuster les paramètres si

nécessaire. Ce va-et-vient entre modélisation HAM et données expérimentales constitue le cœur de l'approche scientifique adoptée, visant à améliorer la prédiction des performances hygrothermiques des enveloppes en climat tropical (Künzel, H. M. 1995).

Différents modèles sont utilisés pour étudier ces phénomènes de transfert d'humidité, condensation, point de rosée et transfert de chaleur. La méthode BES (Building Energy Simulation) utilisée dans « EnergyPlus » permet la simulation énergétique globale des bâtiments, tandis que les modèles HAM (Heat, Air and Moisture) évaluent les risques de condensation à partir d'une modélisation couplée des transferts de chaleur, d'air et d'humidité à l'échelle des matériaux.

WUFI (Wärme und Feuchte instationär), basé sur un modèle HAM unidimensionnel, permet d'étudier l'évolution du taux d'humidité dans les parois et les risques de condensation dans le temps. Ce type de simulation s'inscrit dans une approche HAM (Heat, Air and Moisture), qui permet de prédire plus finement les transferts couplés dans l'enveloppe du bâtiment. Woloszyn et Rode (2008) proposent une synthèse des outils numériques capables de modéliser ces phénomènes à l'échelle du bâtiment entier, en tenant compte des interactions entre les composants et le climat intérieur.

Ces simulations sont obtenues à partir de la conductivité, de la capacité thermique et de la densité des différents matériaux.

Une base de données avec des données climatiques format ÉPW ou WAC (EnergyPlus Weather files) comme « Climate one Building » peut être utilisée spécifiquement dans « EnergyPlus ». Cependant, la qualité des résultats obtenus dépend fortement de la précision des propriétés matériaux utilisées en entrée. Hens et al. (2007) rappellent que des écarts significatifs peuvent apparaître entre les prédictions numériques et les observations si les propriétés hygrothermiques ne sont pas mesurées avec rigueur ou si leur variabilité n'est pas prise en compte dans les modèles.

Dans notre cas, on se concentrera principalement sur l'utilisation de WUFI 2D. Le logiciel WUFI (Wärme und Feuchte Instationär) est un outil de simulation numérique développé par le Fraunhofer IBP (Institut für Bauphysik) en collaboration avec le Department of Energy (DOE) des États-Unis. Il permet de modéliser les transferts transitoires de chaleur et d'humidité à travers les composants de l'enveloppe d'un bâtiment via la méthode des volumes finis.

Le logiciel WUFI 2D en particulier permet simplement la simulation bidimensionnelle (ponts thermiques, liaisons mur-toit, etc.). WUFI plus quant à lui, permet la simulation couplée de bâtiment complet (température, humidité, ventilation). WUFI repose sur la résolution des équations de conservation de la masse et de l'énergie dans les matériaux poreux, selon une approche HAM bien que l'air ne soit pas toujours pris en compte (sauf dans WUFI Plus).

L'interface WUFI 2D présenté en figure 11 permet à l'utilisateur de créer étape par étape une paroi et de déterminer les conditions de simulation (climat, orientation, radiation, pertes, caractéristique matériau).

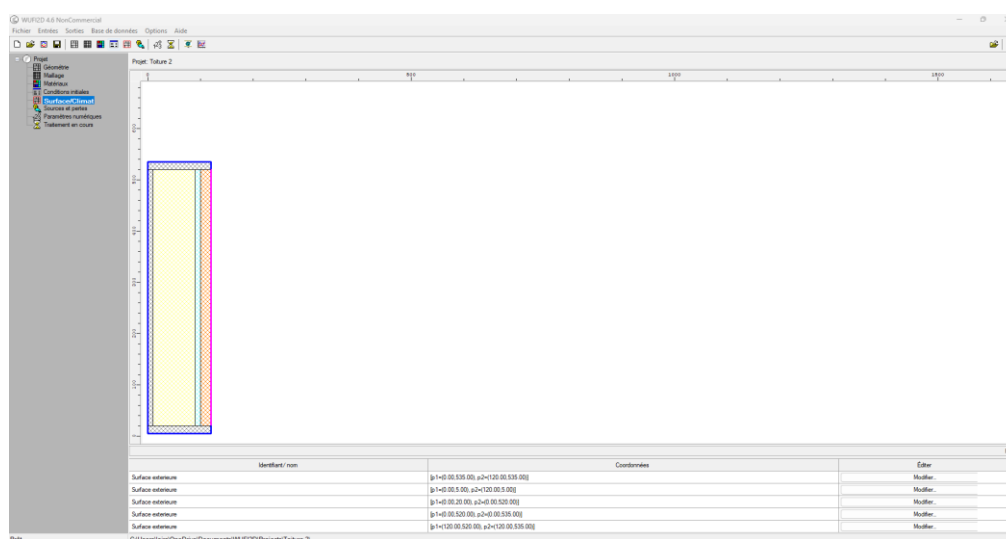


Figure 6 : Interface WUFI 2D pour le maillage des matériaux

Une fois la composition de la paroi définie, l'étape suivante consiste à attribuer les conditions limites du système. Le climat extérieur est importé sous forme de fichiers météorologiques normalisés (EPW, WAC en figure 7) contenant des données horaires de température, humidité relative, vent, ensoleillement, précipitations, etc. Ces données peuvent être modifiées à partir de résultats expérimentaux et études in-situ. Le climat intérieur peut être défini de manière fixe ou évolutive (selon les normes EN 15026 ou EN ISO 13788, ou encore selon des profils personnalisés), en fonction du type de local simulé.

					Location: saint_pierre_terre_sainte				Example.wac.wac				
					Description:				Export to .WAC file Ver.: 2,6				
					Longitude [°]: 55.48		Altitude [m]: 10		Note:				
					Latitude [°]: -21.34		Time Zone [h]: 0.0						
							First Year [yyyy]: 2025						
Year	Month	Day	Hour	cumul.	Temperature [°C]	Air Humidity	Radiation [W/m²]	Radiation [W/m²]	Radiation [W/m²]	Wind Speed [m/s]	Wind Direction [°]	Air Pressure [hPa]	Rain [Ltr/m²h]
					Air Temperature	Rel. Humidity [0..1]	Solar Global Horiz.	Solar Direct Horiz.	Solar Diffuse Horiz.	Skalar Average	north = 0, clockwise	At Station Height	Normal Rain
1	1	1	1	1	17.79	0.786	0	0	2.5	252	0.9	101745.9	0
1	1	1	2	2	18.98	0.879	0	0	2.5	282	340.2	101291.9	0
1	1	1	3	3	20.02	0.805	0	0	2.5	137	42.3	101399.5	0

Figure 7 : Format des fichiers WAC

Lorsque tous les paramètres sont saisis, la simulation peut être lancée. WUFI résout numériquement en fonction du temps, les équations de transfert de chaleur et d'humidité dans la paroi. Le logiciel génère ensuite un ensemble de résultats détaillés, visualisables sous forme de graphiques : température, humidité relative, teneur en eau, flux de chaleur ou encore différentiel de température avec le point de rosée.

Ces résultats (Fig. 8) permettent d'identifier les périodes critiques (dépassement du point de rosée, accumulation d'humidité, etc.), d'évaluer la performance hygrothermique des matériaux utilisés et de comparer différentes configurations de parois. Les résultats sont exportables au format ASCII.

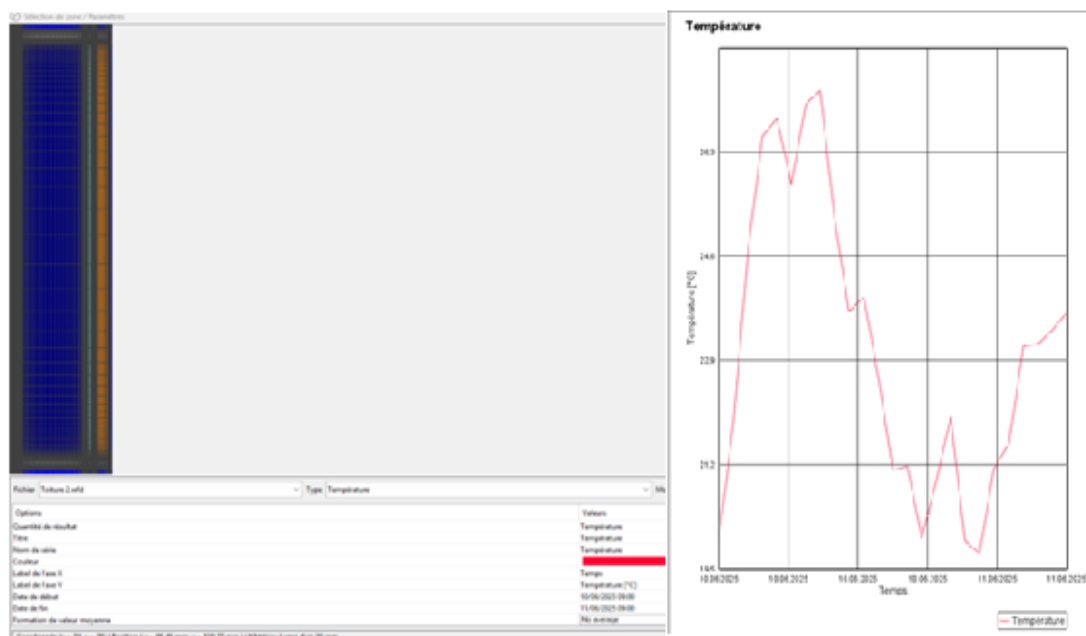


Figure 8 : Exemple de résultat de simulation pour la température de la laine de verre pendant 24h

Les valeurs obtenues via les modèles et les simulations sont ensuite comparées aux valeurs expérimentales, pour les valider, et effectuer des études à plus grande échelle (Labat et al., 2015). Ces modèles prennent en compte le couplage dynamique entre les transferts d'humidité (par diffusion et capillarité) et le gradient de température largement influencé par l'hygroscopie d'un matériau, la teneur en eau du milieu et des phénomènes comme l'hystérésis. Dans sa thèse, Thomas Busser (2016) utilise ces modèles pour comparer ses valeurs obtenues sur le bois dans le but d'évaluer les transferts hygrothermiques couplés et quantifier l'impact des transferts sur l'ambiance intérieure et la performance énergétique.

III. Etat des lieux des projets/études déjà menées sur les transferts hygrothermiques dans les matériaux

III.1 Amélioration de la modélisation des transferts température/humidité dans les parois des bâtiments

L'ensemble de ces études a été menée sur des modèles d'étude en zone tempérée, mais les méthodes déployées peuvent être transposables dans certains cas aux zones tropicales et constituent des exemples intéressants :

- Le projet **HUMIRISK** (CSTB, ADEME/DGUHC 2006) : ce projet visait à évaluer l'impact d'une réhabilitation sur les transferts de chaleur et d'humidité et prévenir les risques liés à un excès d'humidité, avec notamment l'évaluation des risques de condensation aux points singuliers par simulations numériques des transferts couplés de chaleur et d'humidité (en 2D). La variété des désordres constatés et l'impact des occupants ont néanmoins rendu difficile la généralisation des conclusions de l'étude.

- Le projet **OPTI-MOB** (CSTB, ANR 2008) et TRANSBATIBOIS (CRITT Bois Epinal, ANR 2008) avaient pour objectifs de mieux évaluer les performances et le comportement hygrothermique des différentes constructions bois. Plusieurs dispositifs expérimentaux ont été développés pour étudier les transferts dans la paroi et le volume d'air. Les résultats montrent qu'il est difficile de prédire correctement le comportement hygrothermique pour ce type de construction notamment en lien avec les propriétés spécifiques du bois.
- Le projet **HUMIBATex** (CSTB, ANR 2012) : ce projet visait l'élaboration d'un outil qui permette de prédire les désordres causés par l'humidité pour proposer des recommandations techniques pour rénover le bâti existant sous forme d'un guide technique. Une plateforme de simulation a été mise en place. Cet outil couplé avec des modèles existants permet de prédire les risques de pathologies liés à l'humidité après une rénovation. Il complète ainsi les connaissances sur les transferts couplés « chaleur-humidité-air » dans les bâtiments existants en combinant des mesures in-situ dans les bâtiments réels, des essais en laboratoires et un grand nombre de simulations.
- Le projet **SIMHUBAT** (CSTB, Projet PACTE 2021) : rédaction d'un guide qui définit la méthodologie et les données d'entrée ainsi que les règles d'interprétation des résultats, nécessaires à l'estimation des risques liés à l'humidité réalisée au moyen de simulations numériques couplant les transferts thermiques et hydriques. De ce fait, ce document constitue un complément national français de la norme NF EN 15026. Ce guide permet de justifier, par la réalisation de simulations numériques, la limitation du risque de pathologie lié à l'humidité lors de la conception de parois / composants d'enveloppe de bâtiment, destinés à être utilisés sur le territoire national (hors territoire ultra-marin). Ce guide constitue néanmoins une trame intéressante pour l'adapter au cas guyanais.

En résumé, les études scientifiques citées en exemple ont cherché à mieux comprendre et prédire le transport d'humidité et de chaleur dans les matériaux et leur impact à l'échelle du bâtiment notamment pour les matériaux fortement hygroscopiques comme les matériaux bio-sourcés. Malgré ces différentes études, il apparaît que des difficultés subsistent notamment lors de la comparaison entre mesures et simulations et lors de la formalisation du lien entre les différentes échelles d'étude. Ces difficultés seront très certainement aussi à prévoir pour le cas tropical.

III.2 Développement de nouveaux isolants biosourcés pour remplacer les isolants classiques

Aujourd'hui les nouvelles mutations du cadre réglementaire au niveau national et européen, notamment via la RE2020, visent à favoriser l'utilisation de biomatériaux et à améliorer l'isolation thermique dans la construction. On observe donc un véritable **élan vers le bio-sourcé**, avec le développement de produits qui garantissent des propriétés similaires aux matériaux synthétiques[1]. On observe plus spécifiquement une intensification des recherches sur les bio-isolants à partir des années 2010, avec l'Europe en chef de file et la France en tête des publications sur cette thématique[2]. **Il y a donc un intérêt fort à conserver cette position de leader, tout en intégrant les DOM-TOM au sein de cette dynamique.**

Au-delà de l'aspect bio-sourcé, différentes biotechnologies ont émergé pour permettre la fabrication de produits isolants aux propriétés thermiques, mécaniques et hydriques intéressantes.

- Le projet **ISOVELGE 3D** (RAYNAUD INDUSTRIES, Projet ADEME 2009) : dans le cadre d'une pré-étude entre l'IFTH et l'ESITPA-LGMA, des déchets de coton issus de l'industrie textile ont été incorporés à des

déchets de farine de blé impropres à la consommation pour réaliser des nouveaux composites textiles 100% végétal par thermoformage. Au vu des propriétés mécaniques et d'isolation intéressantes obtenues, une application s'est avérée possible dans le secteur des panneaux d'isolation thermique et phonique pour le bâtiment et notamment pour la réalisation de feutres de sous toiture destinés à l'isolation contre les infiltrations d'eau de pluie. Cet exemple démontre donc l'intérêt des isolants biosourcés pour répondre aux problématiques de conditions hygrométriques extrêmes, mais peu de données techniques ont été rendues publiques pour ce projet industriel ;

- Le projet **DEMETHER** (IRSTEA, Projet ANR 2011) : des panneaux isolants ont été développés à partir de tiges de tournesol et d'une matrice biosourcée (à base de chitosane). L'écorce des tiges de tournesol assure une fonction mécanique et la moelle confère aux panneaux isolants de bonnes propriétés thermiques. L'isolant final présentait ainsi un coefficient de diffusion thermique $\lambda=0.06 \text{ W/m.K}$ une valeur très intéressante, proche de celle des produits commerciaux (laine de verre : 0.04 W/m.K , polystyrène : 0.035 W/m.K). Cette étude a aussi permis de mettre en lumière la variabilité des propriétés mécanique et thermique selon la localisation des fibres dans la plante, et a validé l'intérêt des techniques non destructives (mesures de champ par corrélation d'image) pour étudier le comportement mécanique global des panneaux, difficile à évaluer en raison de son hétérogénéité. Finalement un calculateur ACV a aussi été publié pour permettre de comparer l'isolant aux autres matériaux d'isolation classiques, en démontrant clairement un impact environnement dérisoire face à la laine de verre ;
- le projet **ECOMATFIB** (STEICO, Projet ADEME 2013) : impliquant les industriels français producteurs d'isolants ainsi que plusieurs laboratoires français, ce projet a permis d'optimiser le procédé textile pour la mise en forme de panneaux d'isolation à partir de fibres de bois d'espèces d'arbres de forêt tempérée[3]. Leur caractérisation en compression a permis d'étudier leur propension à conserver leurs propriétés après sollicitation mécanique. Les données recueillies ont permis d'identifier les paramètres de la matière première ainsi que du procédé de fabrication ayant un impact significatif sur les propriétés de ces isolants. Une première approche de modélisation des propriétés a conduit à identifier des pistes permettant l'amélioration des propriétés thermiques et de valider leur très bonne capacité de régulation hydrique. L'isolant final présentait ainsi un coefficient de diffusion thermique $\lambda=0.06 \text{ W/m.K}$.
- Le très récent projet allemand **ORGANOPOR** (FRAUNHOFER, Projet ARM Agency for Renewable Materials 2020) : au cours de ce projet de deux ans, des matériaux résiduels tels que le liège et les épis de maïs, des résines aqueuses à base de lignine et des charges minérales comme retardateurs de flamme ont été utilisées pour mettre au point un nouveau matériau d'isolation de façade biosourcé par pressage. Les panneaux conçus ont démontré qu'ils pouvaient être compétitifs au niveau de la fabrication et de la transformation et offrir les propriétés intéressantes (coefficient de diffusion thermique très faible : $\lambda=0.04 \text{ W/m.K}$) face aux panneaux isolants en polystyrène leaders du marché. L'utilisation de procédés de fabrication simples est donc à favoriser pour développer des produits compétitifs face aux produits classiques ;
- L'autre direction prise par de nombreux laboratoires et entreprises a été le développement de blocs constructifs isolants, systèmes multicouches intégrant un isolant bio-sourcé : comme les projets. On peut citer les projets **ECO-SEE** (FP7, 2013) et **ISOBIO** (H2020, 2015) au niveau de l'Europe, ou encore les projets **ECOSTRAUV** (ADEME, 2018) et **MANTOBLOC** (ADEME, 2020) au niveau national.

Ces exemples démontrent l'intérêt technique et économique des panneaux compressés collés réalisés à partir de résidus agricoles.

Enfin de nombreux projets de grande envergure ont abordé la question des bio-isolants en intégrant les notions de bioéconomie. Le projet européen **PRO-WOOD** (FP7, 2008), qui visait à étudier de nouvelles voies de valorisation des ressources forestières roumaines, a clairement démontré que les obstacles à la mise en œuvre d'une nouvelle bioéconomie étaient liés au manque de coopération entre la recherche et l'industrie. Renforcer ces collaborations et créer des ambitions communes est un préalable essentiel

qui doit être considéré en amont du développement d'un nouveau biomatériau d'isolation. Ces dernières années, on constate une nette augmentation du nombre de projets structurants pour la filière bois au niveau européen, comme les récents projets H2020 **SUPERBIO** en Belgique (2016), ou **WOODCIRCUS** en Finlande (2018).

Néanmoins, aucun projet structurant de ce type n'a été mené sur les bio-isolants pour la filière forêt-bois française jusqu'à présent.

III.3 Exemples d'études appliquées au cas des climats tropicaux

Si la plupart des projets ont développé de nouvelles solutions d'isolation à partir de ressources forestières tempérées, très peu de projets se sont intéressés au cas spécifique des régions outre-mer. On peut néanmoins citer les projets suivants, qui constituent un point de départ intéressant pour déployer de nouvelles études en Guyane :

- Le projet **ISOBIODOM** (CIRBAT, FCBA, CSTB, Programme Pacte, 2017) a exploré le potentiel des ressources agricoles locales pour le développement de bio-isolants à la Réunion. Ce projet a étudié la performance hygrothermique et la durabilité vis-à-vis des moisissures et des termites des isolants bio-sourcés (métropolitains et prototypes locaux réalisés à partir de ressources de La Réunion). Les enseignements de cette étude visaient à accompagner les professionnels à la mise en œuvre d'isolants bio-sourcés en construction neuve et en rénovation en fonction des spécificités locales. Ce projet a permis d'identifier plusieurs panneaux de fibres bio-sourcés résistants aux moisissures après traitement fongicide.
- Le projet **ACLIBIO** (CEREMA, CSTB, ADEME 2020) : ce projet n'a pas été mené sur des ressources tropicales ou dans un contexte tropical, mais il a cherché à évaluer l'évolution dans le temps des performances de plusieurs types d'isolants biosourcés (fibres de bois, chanvre et lin), en prenant notamment en compte les prévisions de réchauffement climatique pendant les prochaines décennies (avec des cycles de chargement variant de 50% à 90%, correspondant par ailleurs aux niveaux enregistrés en Guyane). L'objectif était de fournir des préconisations sur l'utilisation d'isolants biosourcés dans la construction en conditions hygrothermiques extrêmes, que ce soit au niveau de leur formulation, de leur mise en œuvre ou de leur environnement d'usage.
- Le projet **GEPETO** (CSTB, Programme Pacte, 2017) : ce projet avait pour objectif de viser à soutenir le développement local de solutions techniques d'enveloppe du bâtiment, performantes énergétiquement et adaptées aux climats tropicaux. En s'appuyant sur une concertation avec les professionnels locaux et des études scientifiques et techniques poussées, deux guides ont été élaborés : (i) un guide aide à la décision pour les prescripteurs des procédés d'enveloppe, (ii) et un document méthodologique pour les industriels, support au développement de produits innovants adaptés aux climats ultra-marins. Ce projet constitue un exemple intéressant pour l'adapter au cas guyanais ;
- Le projet **GUYAVALOFIBRES** (UMR EcoFoG, Julie Bossu, CNRS PEPS, 2018) : ce projet a démontré le fort potentiel des fibres guyanaises pour la production de panneaux d'isolation, avec de très faibles conductivités thermiques (λ entre 0.04 et 0.06 W/m.K) obtenues pour plusieurs espèces [4]. Ces performances sont supérieures à celles obtenues dans le projet ECOMATFIB et similaires à celles des produits commerciaux STEICO, leader du marché européen.

IV. Synthèses des connaissances manquantes liées aux conditions environnementales uniques de la Guyane et de La Réunion

Le climat unique de la Guyane, la typologie spécifique des bâtiments qui y sont construits et notamment les toitures en tôle, ainsi que les potentiels risques biologiques liés à la présence d'une grande diversité de souches fongiques, termites et ravageurs sont des risques spécifiques à la région qui doivent être pris en compte lors du choix de la solution d'isolation à mettre en place et de la méthode de pose.

On peut alors lister différents freins à l'établissement de règles adaptées au cas guyanais :

a. Le cadre réglementaire pour l'isolation des bâtiments, défini pour le cas métropolitain, n'est pas adapté aux conditions climatiques tropicales

La réglementation thermique pour la rénovation des bâtiments est définie dans l'arrêté du 3 mai 2007, modifié par l'arrêté du 22 mars 2017, relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants. La résistance thermique R d'une paroi rénovée doit être supérieure ou égale au niveau minimal réglementaire, qui dépend de la zone climatique, définie selon trois cas de figure : zone climatique H1 (nord-est de la France) ; zone climatique H2 (ouest) et zone climatique H3 (sud est à moins de 800m d'altitude, ou zone H2 à plus de 800m d'altitude). Ce zonage ne couvre pas les conditions climatiques guyanaises et réunionnaises.

Pour les bâtiments neufs, La RE 2020 est la réglementation qui a remplacé la RT 2012. Cette nouvelle réglementation prend en compte, en plus de la performance énergétique, l'empreinte environnementale du bâtiment et sa capacité à générer de l'énergie. La méthode de calcul utilisée est la Th-BCE 2020 et elle intègre désormais l'aspect environnemental du bâtiment en plus de son aspect énergétique ainsi qu'un calcul de l'analyse du cycle de vie du bâtiment (ACV). Mais ici encore, les règles sont définies pour la métropole et sont difficilement transposables au cas tropical.

En outre-mer, les réglementations thermiques, acoustiques et aération des constructions de logement neufs sont guidées par la RTAA DOM. L'arrêté thermique de la RTAA 2016 s'applique uniquement en Guyane et à La Réunion. Néanmoins ces règles portent davantage sur des critères de ventilation naturelle des bâtiments que sur le type d'isolation.

Finalement, les documents techniques unifiés (DTUs) concernant la couverture et l'isolation, et notamment les recommandations techniques liées à la pose, sont ainsi inadaptés aux échanges hygrothermiques dans les bâtiments guyanais.

b. Le comportement des produits d'isolations classiques dans les conditions d'usages tropicales extrêmes n'a pas été rapporté à ce jour

Un produit d'isolation installé dans un ouvrage du bâtiment en Guyane peut subir des variations hygrothermiques allant de 25 à 35°C et de 65 à 98%, avec de fortes amplitudes au sein de la même journée. Par ailleurs, ces conditions ambiantes ne reflètent pas nécessairement les conditions locales dans le matériau et aucun suivi à ce jour ne permet de se référer à des valeurs expérimentales précises qui rendent compte des réelles conditions subies par les isolants au sein des parois.

En parallèle, l'utilisation de tôles pour la couverture entraîne un phénomène de condensation à l'aube et un risque supplémentaire de trempage des matériaux d'isolation. La résistance des matériaux d'isolation classiques (laine de verre, laine de roche, polystyrène, polyuréthane, ouate de cellulose, produits minces réfléchissants) à ces phénomènes endémiques aux zones tropicales n'est pas caractérisée à ce jour.

Sur le terrain, les entreprises de l'isolation rapportent des dégradations importantes de ces matériaux tels que (i) le trempage et l'affaissement des isolants liés à une condensation d'eau sur les fibres non

hygroscopiques des laines minérales par exemple, (ii) le décollement des couches réfléchissantes des isolants minces en raison des fortes températures qui endommagent les colles, (iii) ou encore la dilution des produits de traitements comme le borax qui modifient la durabilité initiale des produits.

Il est également attendu que les propriétés mécaniques et structurelles des panneaux d'isolation notamment, soient affectés par les variations d'humidité. Le risque de tassement

Finalement, il est également à noter que le risque biologique est plus important en Guyane, avec la présence sur le territoire d'une plus grande diversité d'espèces de termites et des conditions hygrothermiques qui favorisent le développement des champignons. On peut également noter la présence de nuisibles qui nichent dans les combles et peuvent détériorer les produits d'isolation. La résistance des matériaux à ses attaques potentielles n'est pas suffisamment documentée.

Il est donc nécessaire d'améliorer nos connaissances des phénomènes énoncés. Les températures d'usage, les quantités d'eau à gérer, soit la fréquence et l'intensité des phénomènes de migration de vapeur et de condensation, mais aussi les risques biologiques sont des éléments clés qu'il nous faut connaître pour garantir l'établissement de préconisations adaptées à chaque configuration. Sans ces éléments, aucune réponse théorique comme pratique ne peut être formulée.

IV.1. Identification des futures études à mener pour combler ces manques

a. Liste des études à programmer

Sur la base des retours terrain et des freins identifiés précédemment, mais aussi en connaissances des autres projets développés en zone tempérée, on peut établir une liste des études qu'il semble pertinent d'initier pour acquérir les connaissances nécessaires à l'établissement de réglementations pour les zones tropicales humides comme la Guyane ou La Réunion.

- Une première étape clé consisterait à caractériser avec précision les environnements tropicaux et les niveaux de température et d'humidité subis par les matériaux isolants en situation d'usage. On peut imaginer la mise en place de capteurs hygrothermiques au sein de différentes typologies d'habitation (logements béton, construction ossatures bois, constructions bioclimatiques etc..) et dans différentes localités (en zone littorale, en conditions urbaines, ou pour des logements en lisière de forêt voire en forêt). Les capteurs pourraient être installés dans les combles, sous toiture ou bien dans les isolants et il serait intéressant de réaliser des suivis longs permettant de couvrir à la fois la saison sèche et la saison des pluies. Les données relevées seront des informations cruciales pour calibrer la gamme des conditions à tester pour caractériser les différents matériaux isolants, ou à utiliser pour réaliser des simulations numériques ;
- Dans la continuité de ces études, il faudra développer des méthodes expérimentales pour caractériser les quantités d'eau concernées par les phénomènes de condensation sous tôle pour évaluer avec précision ce risque. La comparaison des systèmes utilisant ou non des pare-pluies peut être d'intérêt. Face à ce risque, l'hygroscopicité des matériaux devra être caractérisée, soit la quantité d'eau sorbée en fonction de l'humidité relative et la température ambiante. Cette mesure peut être facilement réalisée en utilisant l'outil de sorption dynamique vapeur (outil disponible sur le dispositif des sciences du bois de l'UMR EcoFoG à Kourou) ;
- A la suite de ces études préliminaires, il apparaît essentiel d'initier une campagne de caractérisation des propriétés technologiques des produits d'isolation qui prenne en compte ces conditions d'usage spécifique. Les travaux menés devront permettre d'évaluer avec précision l'évolution des performances (i) thermiques, (ii) mécaniques et (iii) de durabilité naturelle en fonction de la température et de l'humidité. Réaliser des essais cyclés présente d'ailleurs un intérêt particulier pour simuler le vieillissement des matériaux.

b. Débouchés de telles études et perspectives

Les nouvelles connaissances acquises au cours des études listées précédemment pourront permettre la mise en place des rapports et recommandations suivants :

- Les conditions hygrothermiques subies par les isolants en fonction des typologies de bâtiments, zones géographiques et période de l'année pourront permettre la classification de situations plus ou moins à risques concernant la question de la migration de vapeur d'eau et condensation ;
- Les essais technologiques menés sur différents produits d'isolation viseront à établir un nouvel indicateur qualité afin de hiérarchiser ces matériaux selon leurs réelles performances en conditions d'usage tropicales. En parallèle, un rapport pourra également être établi pour préconiser des recommandations aux fabricants sur l'adaptation des matériaux métropolitains aux conditions de la Guyane ;
- Sur la base des deux premiers points, un guide d'usage pourra ainsi être établi pour préconiser des solutions techniques et des mises en œuvre en fonction des matériaux, des situations, des configurations, des conceptions de toiture, etc... Les directives des textes réglementaires pourront par ailleurs être revus pour mettre à disposition des acteurs professionnels locaux des documents techniques fiables pour la Guyane ;
- A partir des réelles conditions d'usage relevées en premier point, il serait également pertinent d'adapter le rapport Simhubat à la Guyane ;
- Finalement, un guide finalisé de recommandations pourra être établi, pour synthétiser les résultats obtenus, lister les bonnes pratiques, détailler le cahier des charges pour la conception de nouveaux matériaux d'isolation pour la Guyane et finalement alerter sur les risques de non-respect des classes d'emploi en Guyane.

c. Projets déjà initiés ou en phase de lancement :

En Guyane, plusieurs projets de recherche et développement sont en cours, visant à répondre à certains des objectifs énoncés au paragraphe précédent :

- **Projet Biocapteurs pour la construction** (Université de Guyane – 11 500 euros, 1 an) : ce projet développé par les chercheurs de l'axe « Innovations et Technologie » de l'Université de Guyane vise à développer des biocapteurs embarqués connectés pour permettre l'identification d'un départ d'attaque fongique dans les éco-matériaux comme les panneaux isolation. Ce projet sera aussi l'occasion d'effectuer des relevés réguliers des conditions hygrothermiques subies par ces matériaux en conditions d'usage ;
- **Projet ANR PANTHER²Guyane** (UMR ECOFOG, Julie Bossu - CNRS – 830 000 euros, 4 ans) : ce projet a pour objectif général d'étudier le potentiel d'une chaîne de production de bio-isolants adaptés aux conditions hygrothermiques extrêmes de la Guyane, à partir de la valorisation de la ressource bois résiduelle locale. Techniquement, le projet repose sur l'hypothèse que les propriétés naturelles exceptionnelles des fibres des bois tropicaux (en termes de mécanique, thermique et durabilité) peuvent permettre la mise en forme de produits hautement performants. En adaptant une technique de l'industrie textile basée sur le feutrage des fibres, les chercheurs produiront des panneaux isolants semi-rigides non tissés, épais et légers, peu coûteux et avec de bonnes propriétés thermiques. L'influence du couplage température-humidité sur les performances technologiques des panneaux sera la principale cible d'étude. Finalement, des essais de démonstration de longue durée seront réalisés à partir des produits les plus prometteurs. Après avoir identifié l'itinéraire le plus prometteur pour la production de panneaux d'isolation thermique hautement performants en

milieu tropical, ce projet visera à modéliser l'impact de leur mise en œuvre sur le tissu productif local. L'interdisciplinarité des partenaires impliqués et le développement d'outils numériques innovants visant à fédérer les connaissances acquises permettront d'appréhender le potentiel de cette nouvelle chaîne de valeur dans son ensemble.

- Le projet Agropolis **ProtExWood** (CIRAD Biowooeb - UMR EcoFoG, demande de financement en cours) : ce projet vise à valoriser le haut potentiel de la biodiversité de la Guyane française en extrayant certaines plantes et espèces de bois par de nouvelles méthodes "vertes" à base d'eau (ou d'alcool naturel), pour produire des insecticides et fongicides naturels à partir de déchets de biomasses guyanaises. Il vise ainsi à développer de nouvelles formulations de préservation des produits bois, comme alternative aux biocides synthétiques hautement toxiques existants. Le projet peut contribuer à l'émergence de nouvelles voies de traitement pour améliorer la résistance des matériaux isolants aux conditions tropicales.
- Projet de thèse en cours (IUT de Kourou, Brique de Guyane) : Potentiel de valorisation des résidus agro-industriels guyanais pour la conception de panneaux de fibres - développement de méthodes de pré-traitement et de bio-adhésifs afin de substituer les liants conventionnels. Encadrants : Julie BOSSU (Chargée de recherche CNRS, UMR EcoFoG), Jérémie Damay, (chercheur CIRAD, UPR BioWooEB), Daniela Florez (chercheuse CIRAD, UMR EcoFoG)

En dehors de ces initiatives locales, on notera l'intérêt actuel pour le développement de projets plus larges couvrant l'ensemble de la zone caraïbes, pour laquelle les questions sont les mêmes. Les appels à projet tel que le récent appel ADEME « Soutien à l'innovation dans la construction matériaux bois, biosourcés et géosourcés » (SIC) représente une opportunité intéressante pour permettre de financer de futurs projets sur les thématiques précédemment listées.

V. Bibliographie

1. . Aelenei, D. & Henriques, F. Analysis of the condensation risk on exterior surface of building envelopes. *Energy and Buildings* 40, 1866–1871 (2008).
2. Baehr, H. & Stephan, K. *Heat and Mass Transfer*. (2006).
3. Berger, J., Dutykh, D., Mendes, N. & Rysbaiuly, B. A new model for simulating heat, air and moisture transport in porous building materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 134, 1041–1060 (2019).
4. Berger, J., Guernouti, S., Woloszyn, M. & Buhe, C. Factors governing the development of moisture disorders for integration into building performance simulation. *Journal of Building Engineering* 3, 1–15 (2015).
5. Boumediene, N. Comportement hygrothermique de matériaux biosourcés à l'échelle de la paroi en ambiance contrôlée et in-situ. (Université de Rennes 1, 2022).
6. Busser, T. Etude des transferts hygrothermiques dans les matériaux à base de bois et leurs contributions à l'ambiance intérieure des bâtiments (2019).
7. Carmeliet, J. & Derome, D. Temperature driven inward vapor diffusion under constant and cyclic loading in small-scale wall assemblies: Part 1 experimental investigation. *Building and Environment* 48, 48–56 (2012).
8. Cho, J., Park, S., Lim, T. & Kim, B. S. Experimental investigation on hygrothermal behaviour and the surface condensation risk of a data centre. *Indoor and Built Environment* 26, 1362–1381 (2017).
9. Crank, J. *The Mathematics of Diffusion*. (Clarendon Press, Oxford, [Eng], 1975).
10. d'Aleix, C. Mesures expérimentales dans les basses couches de l'atmosphère tropicale et insulaire (Guadeloupe) : Micro-météorologie et composition chimique des masses d'air nocturnes en zone de mangrove. (Université des Antilles et de la Guyane, 2011).
11. De Freitas, V. P., Abrantes, V. & Crausse, P. Moisture migration in building walls—Analysis of the interface phenomena. *Building and Environment* 31, 99–108 (1996).
12. Feist, W. & Schnieders, J. Energy Efficiency – a Key to Sustainable Housing. *The European Physical Journal Special Topics* 176, 141–153 (2009).
13. Ferroukhi, M. Y. Modélisation des transferts thermo-hydro-aérauliques dans les enveloppes de bâtiments : évaluation des désordres causés par l'humidité. (Université de La Rochelle ; École Royale Militaire (Bruxelles), 2015).
14. Guven, N. Dynamics of fluids in porous media. (1972).
15. Hachem, C. E. Etude expérimentale et modélisation multi-échelles du comportement hygro-mécanique des matériaux de construction : cas du bois. (Université Paris Saclay (COMUE), 2017).
16. Hens, H. *Building Physics: Heat, Air and Moisture, Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises*. (2017).
17. Hens, H., Mukhopadhyaya, P., Kumaran, M. & Dean, S. Modeling the Heat, Air, and Moisture Response of Building Envelopes: What Material Properties are Needed, How Trustful Are the Predictions? *Journal of Astm International* 4, (2007).
18. Incropera, F., DeWitt, D., Bergman, T. & Lavine, A. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. (2007).
19. Janssen, H. Thermal diffusion of water vapour in porous materials: fact or fiction? *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54, 1548–1562 (2011).
20. Janssen, H., Scheffler, G. A. & Plagge, R. Experimental study of dynamic effects in moisture transfer in building materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 98, 141–149 (2016).

21. Janssens, A., Willems, L. & Laverge, J. Performance evaluation of residential ventilation systems based on multi-zone ventilation models. Proceedings of 4th international building physics conference 833–839 (2009).
22. Kuenzel, H. Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters. Fraunhofer IBP (1995).
23. Labat, M., Woloszyn, M., Garnier, G. & Roux, J. J. Dynamic coupling between vapour and heat transfer in wall assemblies: Analysis of measurements achieved under real climate. Building and Environment 87, 129–141 (2015).
24. Latapie, S. R., Abou-Chakra, A. & Sabathier, V. Microstructure of Bio-Based Building Materials: New Insights into the Hysteresis Phenomenon and Its Consequences. Buildings 13, 1650 (2023).
25. Lawrence, M. The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications. Bulletin of the American Meteorological Society, v.86, 225–233 (2005) 86, (2005).
26. Mahdavi, A. & Doppelbauer, E.-M. A performance comparison of passive and low-energy buildings. Energy and Buildings 42, 1314–1319 (2010).
27. Nguyen, C. K., Teodosiu, C., Kuznik, F., David, D. & Rusaouën, G. Full-scale experimental study of moisture condensation on the glazing surface: condensation rate characterization. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 609, 032035 (2019).
28. Padfield, T. The Role of Absorbent Building Materials in Moderating Changes of Relative Humidity. (1998).
29. Peuhkuri, R. et al. Moisture Buffering of Building Materials. (Technical University of Denmark DTU, Denmark, 2006).
30. Peuhkuri, R., Rode, C. & Hansen, K. K. Non-isothermal moisture transport through insulation materials. Building and Environment 43, 811–822 (2008).
31. Qin, M. Étude des phénomènes de transfert hygrothermiques dans les parois des bâtiments. (La Rochelle, 2007).
32. Rouchier, S., Woloszyn, M., Foray, G. & Roux, J.-J. Influence of concrete fracture on the rain infiltration and thermal performance of building facades. International Journal of Heat and Mass Transfer 61, 340–352 (2013).
33. Saqib, M., Hasnain, S. & Mashat, D. S. Computational Solutions of Two Dimensional Convection Diffusion Equation Using Crank-Nicolson and Time Efficient ADI. AJCM 07, 208–227 (2017).
34. Sari, H., Nurjannah, I., Arsana, I. M., Dana, G. & Julianto, M. THE EFFECT OF TEMPERATURE VARIATION AND VARIOUS METAL MATERIALS ON CONDUCTION HEAT TRANSFER RATE. Media Mesin: Majalah Teknik Mesin 24, 102–108 (2023).
35. Sedlbauer, K. Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components. (2001).
36. Steeman, H.-J., Van Belleghem, M., Janssens, A. & De Paepe, M. Coupled simulation of heat and moisture transport in air and porous materials for the assessment of moisture related damage. Building and Environment 44, 2176–2184 (2009).
37. Tai, C., Tian, G. & Lei, W. Measurement of indoor environmental parameters and analysis of the condensation phenomenon in urban utility tunnels. Indoor and Built Environment 31, 1091–1106 (2022).
38. TenWolde, A. ASHRAE Standard 160P__Criteria for Moisture Control Design Analysis in Buildings. ASHRAE Transactions.
39. Viitanen, H. et al. Moisture and Bio-deterioration Risk of Building Materials and Structures. Journal of Building Physics 33, (2010).

40. Wang, W. et al. Experimental study on condensation heat transfer of horizontal enhanced tube. Kung Cheng Je Wu Li Hsueh Pao/Journal of Engineering Thermophysics 31, 2113–2116 (2010).
41. Woloszyn, M. & Rode, C. Tools for Performance Simulation of Heat, Air and Moisture Conditions of Whole Buildings. Building Simulation 1, 5–24 (2008).
42. Rojas, C., Cea, M., Iriarte, A., Valdés, G., Navia, R., Cárdenas-R, J.P.: Thermal insulation materials based on agricultural residual wheat straw and corn husk biomass, for application in sustainable buildings. Sustain. Mater. Technol. 20, e00102 (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00102>
43. Liu, L.F., Li, H.Q., Lazzaretto, A., Manente, G., Tong, C.Y., Liu, Q. Bin, Li, N.P.: The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings, (2017).
44. Delisée, C., Faessel, M., Gobbe, C., Normand, X., Castets, L., Neel, M.: Isolant thermique épais à base de bois. Rapport technique, 22, convention ADEME N° 99 01 060, 2001 (Thick wood-based insulating material. Technical report, 22, convention ADEME N° 99 06 060). (2001)
45. Bossu, J., Moreau, J., Christine, D., Beauchêne, J., Corn, S., Le Moigne, N., Sonnier, R., Clair, B.: Revealing the potential of Guianese waste fibers from timber production and clearings for the development of local and bio-based insulating fiberboards. Waste Biomass Manag.