Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE

CEE Les certificats D'ÉCONOMIES D'ÉNERGIE

ADEME
Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

Smart-Réno
Fiabiliser, Professionnaliser
et Valoriser

Smart-Réno

Fiabiliser, Professionnaliser, Valoriser la Rénovation Energétique

Premier Volet : Fiabiliser la Rénovation

Livrable T1.6 – Développement d'outils pratiques pour évaluer les indicateurs de risque hygrothermique

Auteurs :

Claire Roussey, François Monnet, Thierry Duforestel, Imane Oubrahim

Contributeurs :

Brice Guénégo, Julien Arnaud, Geoffrey Louis-Villemin, Monika Woloszyn, Anne-Laure Perrier, Ali Derai, Chaimae Ghrib, Florian Battezzati, Thibault Andrieu

SOMMAIRE

1. Introduction 3
2. Développement méthodes et outils d'aide au diagnostic du bâtiment existant 3
2.1. Diagnostic des données environnementales du bâtiment 4
2.2. Identification des matériaux de la paroi existante 11
2.3. Audit de l'ambiance intérieure 16
2.3.1. Etat de l'art des normes existantes 16
2.3.2. Analyse normative sur une paroi rénovée et comparaison aux usages standards résidentiels 23
2.3.3. Conclusions et perspectives 29
2.4. Diagnostic humidité de la maison à rénover 30
2.4.1. Les différentes pathologies dues à l'humidité 30
2.4.2. Méthodes de mesure in-situ des propriétés hygrothermiques 32
2.4.3. Les préconisations normatives 38
2.4.4. État de l'art sur le diagnostic humidité réalisé par les artisans 40
2.4.5. Fiabilité de la mesure par les différents appareils 43
2.4.6. Etapes pour réaliser un diagnostic humidité 52
3. Simplification du modèle de transferts couplés de masse et de chaleur 55
3.1. Contexte et objectifs 55
3.2. Méthodologie d'ensemble pour la simplification 55
3.3. Description du modèle complet et son expression compactée par une écriture par blocs . 56
3.4. Description de la séquence expérimentale à la base des analyses de sensibilité 58
3.4.1. Principaux résultats 59
3.4.2. Conséquences. Proposition d'un modèle simplifié 61
3.4.3. Eléments d'évaluation de la performance numérique du modèle simplifié 62
3.5. Simplifications d'usage espérées pour cette version simplifiée. 64
3.6. Perspectives de simplification 65
4. Retour d'expériences de l'outil numérique simplifié 67
4.1. Détail de la réalisation du cas d'étude 67
4.1.1. Création de la géométrie avec le logiciel Salomé 67
4.1.2. Suite modélisation et simulation dans le logiciel Syrthes 69
4.2. Retours d'expérience 76
4.2.1. Prise en main du logiciel 76
4.2.2. Simplification d'usage du logiciel 77
4.2.3. Perspectives de développement du logiciel 81
4.2.1. Conclusions du retour d'expériences 82

1. Introduction

Les phénomènes de transferts hygrothermiques ont été largement abordés et étudiés dans le monde scientifique du bâtiment. De nombreux outils ont été développés pour reproduire finement ces phénomènes de transferts de chaleur et d'humidité à travers l'enveloppe du bâtiment. Aujourd'hui la question du risque hygrothermique est bien connue des acteurs de la filière, mais celle-ci est souvent mise de côté et non étudiée par manque de moyens. Ceci peut causer alors des dégâts dus à l'humidité qui auraient pus être évités si des outils adaptés pour anticiper ces risques existaient.

La tâche 1.6 du projet Smart Réno a pour ambition de développer des outils pratiques dédiés à l'évaluation du risque hygrothermique d'une rénovation. Ceci passe par un développement d'outils d'aide au diagnostic de la maison avant rénovation, ainsi qu'une simplification des outils numériques existants afin de réaliser des simulations des transferts hygrothermiques au sein de la maison. Ce livrable présente alors dans un premier temps les outils de diagnostic développés lors du projet et dans un second temps, l'outil numérique simplifié durant le projet sera décrit. Pour finir, un retour d'expérience de cet outil numérique sera fait.

2. Développement méthodes et outils d'aide au diagnostic du bâtiment existant

Le diagnostic du bâti existant est une brique essentielle dans le cadre global de rénovation performante. Il permet d'obtenir un état initial sur lequel s'appuyer pour concevoir.

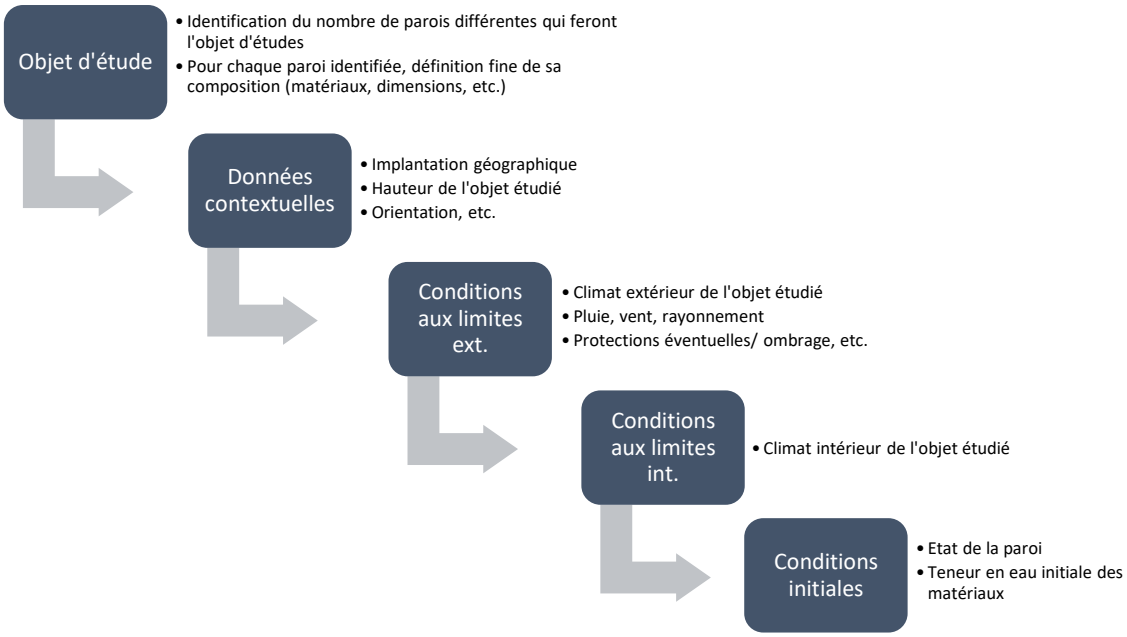
Dans le cas précis des études hygrothermiques qui permettront d'assurer la pérennité de l'acte de rénovation, le diagnostic permet d'identifier en premier lieu l'objet de base de l'étude mais également les conditions aux limites d'une part et les conditions initiales d'autre part. Il est donc essentiel de pouvoir s'appuyer sur des données fiables pour bénéficier en sortie de résultats tout aussi fiables.

Le diagnostic doit donc permettre d'apporter des éléments de précision sur :

- **L'objet d'étude** : la définition précise des parois et des matériaux
- **Les conditions aux limites** : l'environnement extérieur et intérieur de l'objet d'étude (climats aux interfaces notamment)
- **Les conditions initiales** : L'état initial de la paroi au regard de l'humidité

Toutes ces données collectées seront les données d'entrée du calcul éventuel qui sera produit par la suite.

Sur cette base, le diagnostic doit être mené de manière méthodique en suivant une trame prédéfinie sur ce modèle.



Chacune de ces étapes est associée à des outils techniques et méthodologiques qui permettent de caractériser toutes ces données in-situ.

Le diagnostic réalisé à un instant t avant rénovation représente une photographie du bâtiment amenée à disparaître : L'objet de l'étude et les conditions aux limites risquent en l'occurrence fortement d'évoluer avec les travaux de rénovation. Il est donc important également d'intégrer en vue d'une future modélisation ces actualisations de projets.

La suite du rapport parcourt les différentes étapes de ce diagnostic en proposant études et outils pour appuyer ces éléments.

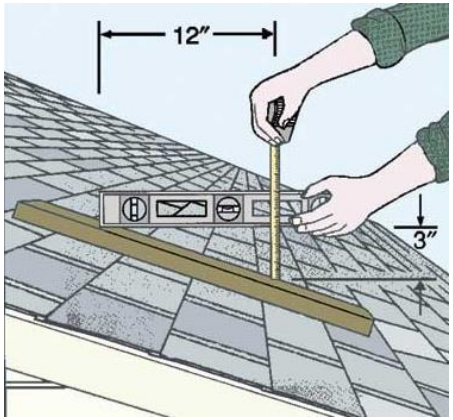
2.1. Diagnostic des données environnementales du bâtiment

Pour réaliser le diagnostic complet d'une maison individuelle, avant de s'intéresser précisément à la composition des parois, il faut récupérer les données environnementales du bâtiment. Elles sont listées dans le tableur ci-dessous, avec pour chacune d'elles, leur utilité pour le diagnostiqueur et des pistes pour les récolter et/ou mesurer.

Toutes ces informations serviront de données d'entrées pour faire des simulations des flux thermiques et d'humidité à travers l'enveloppe du bâtiment à l'échelle 1D (à travers une paroi), 2D (détail constructif : intersection murs, plancher mur…) et 3D (à l'échelle du bâtiment).

Données		Utilité	Récolter	Mesurer
Données Opération	Typologie du bâtiment	Les bâtiments sont soumis à des exigences réglementaires différentes selon leur typologie (maison, immeuble, patrimonial…).	Questionnaire client	x
	Adresse	L'adresse permet de situer la maison et d'utiliser des données climatiques appropriées lors des simulations des transferts hygrothermiques avant rénovation. Elle permet aussi d'avoir : les données topographiques, la zone géologique, les coutumes de construction de la région.	Questionnaire client	x
	Date de construction	La date de construction permet de situer le bâtiment par rapport aux normes en vigueur de l'époque (réglementation thermique notamment) et au mode constructif.	Questionnaire client Si le client ne sait pas, on peut appeler la mairie (le pôle urbanisme) pour avoir accès à l'acte de propriété. L'information est quelque fois disponible sur géoportail.	x
	Bâtiment ayant déjà subi une rénovation	Un bâtiment ayant déjà subi une rénovation a souvent déjà été diagnostiqué par une autre entreprise. Il faut prendre connaissance des anciennes recommandations et rénovations. Les plans du bâtiment peuvent donc être modifiés, ainsi que la composition des parois à certains endroits.	Questionnaire client	X

	Bâtiment occupé lors du diagnostic	Diagnostiquer un bâtiment occupé nécessite de prendre des précautions. Les conditions intérieures (humidité et température) changent avec la présence d'habitant (chauffage, ventilation etc…). Un diagnostic destructif ou non est aussi à anticiper en fonction de la demande des habitants.	Questionnaire client	X
	Type de diagnostic possible	Il en existe 3 types : Destructif / Percement discret / Non destructif. Cela permet d'adapter la méthodologie et les appareils en fonction du choix du client.	Questionnaire client	X
	Date prévue des travaux	Les conditions météorologiques changent au fil de l'année, et ceci peut impacter les conditions hygrothermiques des parois rénovées suivant la date de fin des travaux.	Questionnaire client	X
Géométrie du bâtiment, orientation et couleurs revêtements	Surface du bâtiment	Donnée essentielle pour tout bâtiment. Elle permet d'évaluer les fuites d'airs, la ventilation, la surface de plancher/toiture… Plus globalement elle permet de connaitre la dimension du projet.	Questionnaire client	Si la surface du bâtiment n'est pas connue par le client, elle se mesure à l'aide des outils : ruban / télémètre / décamètre / géoportail (web)
	Hauteur du bâtiment	La hauteur du bâtiment influe sur la vitesse du vent sur les parois, et donc sur la pluie battante sur la surface extérieure, et sur les infiltrations d'airs.	Souvent inconnue par le client	Google earth / outils de mesure : télémètre, décamètre / méthode de la croix du bucheron sur un angle du bâtiment (https://materiel-elagage.4mepro.com/content/83-comment-mesurer-un-arbre)
	Pente de toiture si besoin	Connaitre précisément la pente de toiture est nécessaire lors de sa rénovation. Elle permet de	X	Vous aurez besoin d'un niveau, d'un morceau de bois parfaitement plat et

		calculer les charges pluviales et radiatives frappant la surface.		d'un ruban à mesurer.  Ces éléments sont à positionner comme sur l'image, et la pente se calcule de la manière suivante (en %) : $\frac{hauteur\ verticale}{distance\ horizontale} * 100$ La méthodologie précise se trouve sur le lien suivant : https://www.lescouvreursdurotoit.com/calcul-pente-de-toit/
	Orientation du bâtiment	L'orientation des pans de toiture du bâtiment est nécessaire afin de connaître l'orientation de la surface du composant de construction. Cette indication est utile pour calculer les charges radiatives et pluviales frappant la surface.	X	Google map Géoportail
	Couleurs des revêtements extérieurs et de la toiture	Les couleurs des revêtements extérieurs des parois et de la toiture sont des données importantes pour déterminer la part de rayonnement solaire incident absorbée par les parois et la toiture.	X	Prise de photos, inspection visuelle pour les façades. Pour la toiture, Google map ou Géoportail peuvent être utilisés.

	Environnement proche	Identifier l'environnement proche du bâtiment tel que la présence d'un immeuble à côté ou d'un arbre, permet de connaître l'exposition au soleil de la façade.	X	Inspection visuelle ou Google map / Géoportail
	Informations sur les façades et la toiture	Il est important de détecter des brise-soleils ainsi que des casquettes de protection solaire s'il y en a. Ainsi que de déterminer les pathologies apparentes (fissures, gonflement, altération des revêtements, présence de salpêtres, etc.).	X	Inspection visuelle Prise de photo
	Photos thermique	Les photos à l'aide d'une caméra thermique permettent de facilement identifier les différents ponts thermiques dans le bâtiment. Ces ponts thermiques sont importants puisqu'ils sont des zones à risque causées par l'humidité.	X	Caméra thermique (lorsque la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est de 10°C)
	Plans	Pour connaitre précisément les dimensions de toutes les parois, la répartition des salles et des menuiseries …	Questionnaire client	A défaut, faire à la main avec les instruments de mesure.
Climat extérieur	Station météo à proximité	Cela permet aux diagnostiqueurs d'avoir des données climatologiques proches du réel. Il faut se procurer les données prises sur la station pour faire tourner les logiciels de simulation hygrothermique.	Le logiciel Météonorm 8 permet d'avoir des données climatologiques partout en France. Il est aussi possible d'obtenir les données pour une unique station via leur site internet (https://meteonorm.com/en/meteonorm-version-8).	X
	Conditions climatiques	Les mesures de surface peuvent être polluées par ces conditions météorologiques.	Météo du jour	Il est possible également de mesurer ces valeurs à l'aide d'hygromètres.

	lors du diagnostic			
Climat intérieur	Ressenti des habitants	L'état général du bâtiment peut être évalué par les habitants. Ils ont pu sentir des fuites d'air, avoir un problème de chauffage sur une pièce en particulier... Cela permet de cibler les principales améliorations à apporter pour le confort de l'usager.	Demander aux clients	Inspection visuelle à faire
	Evaluation de l'occupation	Déterminer le nombre d'occupants. Cela permet d'évaluer l'apport d'humidité interne.	Demander aux clients. Demander par exemple ces horaires de travail et le nombre d'habitant.	X
	Nombre de zones intégrant espaces humides (Salle de bain, cuisine)	Les parois des salles humides sont plus sujettes à des dégradations par leurs fortes expositions à la vapeur d'eau.	Questionnaire client Plans	X
	Eléments intérieurs apportant de l'humidité (Comme une piscine ou un hammam)	Ces éléments changent énormément les hypothèses de modélisation vis-à-vis du climat intérieur par le fort apport de vapeur d'eau.	Questionnaire client Plans	X
	Situer les zones chauffées	Les zones chauffées ont une température cadrée, importante à prendre en compte.	Questionnaire client Plans	X

	Température et humidité relative intérieures lors du diagnostic	Elles permettent de savoir le delta de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Les mesures de surfaces vont être polluées par ces conditions lors du diagnostic.	X	Il est possible de mesurer ces valeurs à l'aide d'hygromètres
	Ventilation mécanique & type de ventilation	La ventilation a un impact majeur sur le taux d'humidité intérieur, et donc sur les échanges hygrothermiques au sein des parois du bâtiment.	Questionnaire client	Inspection visuelle
	Position et nombre des bouches d'extraction et d'entrées d'air	Ces bouches ont un impact sur le taux d'humidité intérieur des parois proches, et donc sur les échanges hygrothermiques au sein de celles-ci.	X	Inspection visuelle
	Renouvellement d'air naturel	Ces renouvellements d'air naturels ont un impact majeur sur le taux d'humidité intérieur et la température intérieure. En été par exemple, les ouvertures de fenêtre en fin de journée vont fortement diminuer la température intérieure.	Demander les habitudes, notamment d'ouverture des fenêtres	Inspection visuelle

2.2. Identification des matériaux de la paroi existante

Une des étapes primordiales de ce diagnostic est la caractérisation de l'enveloppe. Une difficulté rencontrée auprès des bureaux d'études et acteurs qui réalisent les études hygrothermiques est de pouvoir :

- D'une part identifier clairement les matériaux en présence dans la paroi
- D'autre part de pouvoir y associer des propriétés sans risque de confusion avec d'autres types de matériaux.

En fonction de la possibilité ou pas de réaliser des sondages destructifs, la tâche de reconnaissance peut être rendue difficile et une simple reconnaissance par l'apparence du matériau n'est parfois pas possible. D'autres techniques doivent alors être employées.

Pour cela, nous avons développé un outil pratique à l'attention des diagnostiqueurs qui permet de répondre au moins partiellement à cette problématique.

Il s'agit d'une bibliothèque de fiches matériaux dans laquelle sont renseignées des données utiles au diagnostiqueur sur :

- La reconnaissance du matériau (par l'usage qui en fait, l'âge de la maison, sa localisation, son apparence, etc.)
- Son comportement à l'humidité (caractéristiques du matériau, pathologies liées à l'humidité, méthode de caractérisation de l'état initial, etc.)

Cette bibliothèque n'est pas exhaustive et regroupe majoritairement des techniques anciennes ou du bâti existant (l'ensemble des fiches figurent dans le livrable 1.7, consacré à la dissémination). Elle catégorise les matériaux en plusieurs grandes familles (23) selon l'arborescence ci-dessous :

Matériaux naturels primaires

- Pierre
  - Roches métamorphiques .....NP_Pierre – N°1
  - Roches magmatiques .....NP_Pierre – N°2
  - Roches sédimentaires .....NP_Pierre – N°3
- Terre
  - Terre crue – Torchis .....NP_Terre – N°1
  - Terre crue – Bauge .....NP_Terre – N°2
  - Terre crue – Pisé.....NP_Terre – N°3
  - Terre crue – Brique de terre crue.....NP_Terre – N°4
  - Enduit terre .....NP_Terre – N°5
- Bois
  - Bois feuillu – dense.....NP_Bois – N°1
  - Bois résineux – tendre.....NP_Bois – N°2

Matériaux transformés

- Enduits et mortiers
  - Enduit - Mortier de chaux .....T_Enduit – N°1
  - Enduit - Mortier ciment.....T_Enduit – N°2
  - Enduit plâtre.....T_Enduit – N°3

- Blocs de maçonnerie
    - Brique de terre cuite pleine .....T_Brique – N°1
    - Brique de terre cuite creuse.....T_Brique – N°2
    - Parpaing plein.....T_Béton – N°1
    - Parpaing creux.....T_Béton – N°2
    - Béton cellulaire .....T_Béton – N°3
- Béton
    - Béton armé.....T_Béton – N°4
    - Béton de mâchefer.....T_Béton – N°5
- Isolants
    - Isolants synthétiques.....T_Isolant – N°1
    - Isolants minéraux .....T_Isolant – N°2
    - Isolants biosourcés.....T_Isolant – N°3

Toutes les fiches sont organisées de la même manière :

Page 1 - Eléments de reconnaissance du matériau :

- **Type d'emploi/description** qui permet de comprendre dans quel cadre, pour quel usage ce matériau est susceptible d'être retrouvé

- **Période d'emploi** qui permet de savoir sur quelle période de construction ce matériau est susceptible d'être retrouvé. Ceci permet d'avoir une première appréciation en fonction de l'âge du bien.

- **Localisation géographique** qui permet de savoir s'il est possible de rencontrer raisonnablement tel ou tel matériau dans telle région.

- **Des éléments de reconnaissance par l'apparence :** couleur, grain, techniques particulières, etc., parfois pour le discerner d'un autre matériau très proche mais présentant des propriétés différentes.

Page 2 - Eléments de reconnaissance du matériau :

- **Les caractéristiques physiques / hygrothermiques** afin de savoir de quelle manière peut se comporter ce matériau à l'humidité. Chacune de ces propriétés peut être extrêmement variable au sein d'une même famille, ce qui justifie parfois l'usage de fourchettes de valeurs. On y retrouve :
    - **La densité**
    - **La porosité**
    - **La résistance à la diffusion de vapeur μ (sans unité) :** caractérise la capacité d'un matériau à s'opposer au flux de vapeur d'eau. Plus cette valeur μ est élevée et plus le matériau est dit « fermé » à la diffusion de vapeur.
    - **W_{80} Hygroscopicité (%) :** C'est la teneur en eau de référence d'un matériau, dans une ambiance avec une humidité relative de 80 %. L'hygrocopicité indique la capacité du matériau à stocker de l'eau en fonction de l'humidité de l'air.

- **Capillarité A ($kg/m^2 \cdot s^{1/2}$) :** Coefficient d'absorption d'eau liquide, représente la capacité du matériau à absorber l'eau liquide lorsqu'il est mis en contact avec un plan d'eau. Plus A est grand, plus le matériau « absorbe » l'eau.

- **Les pathologies liées à l'humidité** donne une indication au diagnostiqueur sur les pathologies qu'il peut rencontrer avec les différents matériaux, liées à l'humidité.

- **Méthode de mesure de l'humidité**. Dans le cadre du travail réalisé lors du projet, des méthodes de mesure de l'humidité pour chaque matériau ont été établies. Ces méthodes permettent d'obtenir un ordre de grandeur de l'humidité du matériau, ou une teneur en eau précise des matériaux.

- **Bibliographie :** éléments et sources bibliographiques.

Un exemple de fiche est donné ci-dessous. Les autres fiches sont présentes dans le livrable de la tâche 1.7 du projet qui est consacrée à la dissémination de ces outils.

NP_Pierre - N°1

Roches métamorphiques

Naturels primaires - Pierre

Image 1

TYPE D'EMPLOI / DESCRIPTION

Les roches métamorphiques les plus connues sont le gneiss, le schiste (l'ardoise notamment) et le marbre. Elles sont utilisées de nos jours essentiellement en couverture et en revêtement de sol, parfois en maçonnerie.

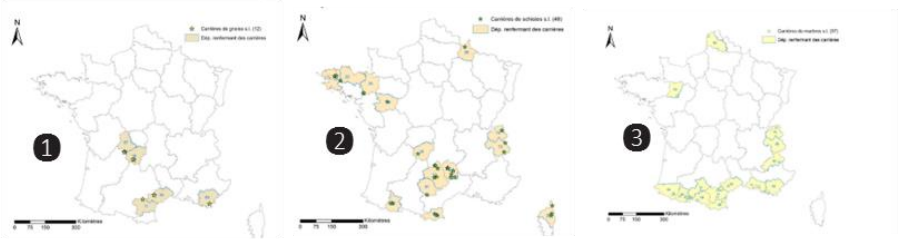
PÉRIODE D'EMPLOI

Le marbre est un matériau de construction depuis longtemps. Il a été utilisé pour construire des édifices royaux (le Panthéon au I siècle avant J.C est fait de marbre) et des sculptures. Il est majoritairement de couleur blanche.

Globalement, les roches métamorphiques sont régulièrement utilisées depuis des siècles.

LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE

Voici trois cartes représentants respectivement (données 2014) : ❶ Les carrières de gneiss en France / ❷ Les carrières de schistes en France / ❸ Les carrières des marbres en France. La catégorie «marbres» de cette carte peut désigner n'importe quelle pierre difficile à tailler et capable de prendre un beau poli (majoritairement du vrai marbre)



ELÉMENTS DE RECONNAISSANCE ET D'IDENTIFICATION

Les roches à l'apparence métallique avec une texture en écaille ou lisse sont métamorphiques (**Image 1 : marbre**). Vous pouvez les différencier des roches magmatiques, car elles ont tendance à être plus cassantes, plus légères et d'un noir plus opaque (**Image 2 : ardoise**). Les murs en gneiss peuvent avoir des tons sombres (gris ou marron) alternant avec des tons clairs (beige ou orange) (**Image 3 : mur de façade en gneiss**). Les murs en schistes ont des tons plus claires (gris, blanc, orange) (**Image 4 : mur de façade en schistes**).

En découpant une roche en deux, des bandes de couleurs différentes apparaissent. Les roches métamorphiques ont des couches de cristaux qui sont tous de la même taille, de couleurs et de motifs variés mais le blanc est plus fréquent. Si les grains contiennent des cristaux, vous pouvez vous servir de l'orientation et de la taille de ces cristaux pour identifier la roche. Elles contiennent des cristaux dont l'apparence ressemble à des feuilles ou des écailles. Ils sont généralement longs et parallèles.

CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES/ HYGROTHERMIQUES

- Densité : Très élevée ➔ 2,6 à 2,9
- Porosité : Très faible ➔ 0,1 % à 3 %
- Résistance à la diffusion de vapeur (μ) :
  Elevée ➔ environ 10000 (marbre), 800 à 1000 (schiste)
- W_{80} Hygroscopicité : Très faible ➔ environ 3 kg/m³

Comportement au sein de la paroi

Ces roches très fermées à la diffusion de vapeur d'eau et peu poreuses, sont souvent des matériaux « barrières » à la diffusion de l'humidité dans un complexe (ce sont éventuellement les liants entre éléments qui véhiculeront l'humidité). Il faut donc veiller à ce que l'humidité ne se retrouve bloquée par le matériau dans une ambiance propice à la condensation. En cas d'isolation côté intérieur, un pare-vapeur devant l'isolant (cas des parois verticales) et/ou une lame d'air ventilée en sous-face (cas de l'ardoise en toiture) permet de minimiser ce risque.

RISQUES ET PATHOLOGIES LIÉES À L'HUMIDITÉ

Ces roches sont très résistantes à l'humidité, c'est pour cela que le marbre et l'ardoise sont utilisés en paroi extérieur, au contact de la pluie. Il est possible de constater une dégradation esthétique pour le marbre (jaunissement).

Il existe toutefois quelques risques liés à l'humidité :

- Attaques d'agents biologiques : mousses, champignons et lichens, algues et bactéries. Principalement dans les zones humides, plus ou moins ombragées.
- Alvéolisations et efflorescences : migrations d'éléments minéraux via les remontées capillaires à la surface de la pierre en formant un dépôt. Lorsque l'eau s'évapore, leur cristallisation s'accompagne d'une augmentation de leur volume et font éclater les pores de la pierre.
- Corrosion des armatures : certaines maçonneries en possèdent (agrafes, tirants, goujons…)

MÉTHODE ADAPTÉE DE MESURE DE L'HUMIDITÉ

La mesure de l'humidité d'un mur en pierre peut s'effectuer avec une bombe au carbure. La mesure peut être réalisée dans le mortier entre chaque pierre lorsque la pierre est trop dure.
Certains humidimètres à pointe ou de surface, sont calibrés pour la pierre. La courbe caractéristique pour la pierre est alors à sélectionner pour la mesure. En revanche, la précision de la mesure avec les humidimètres est plus faible qu'avec la bombe au carbure.

BIBLIOGRAPHIE

Ministre de l'Ecologie du Développement durable et de l'Energie. CTMNC. Mémento sur l'industrie française des roches ornementales & de construction. Rapport final. Publié en Octobre 2014
CSTB. Guide technique : transferts d'humidité à travers les parois. Septembre 2009
Pour aller plus loin, toutes les sources sont disponibles dans le livrable SMART RENO.

2.3. Audit de l'ambiance intérieure

2.3.1. Etat de l'art des normes existantes

Plusieurs normes abordent aujourd'hui les conditions hygrothermiques d'une ambiance intérieure. Nous allons voir dans ce chapitre qu'elles ne sont pas toutes équivalentes et amènent à influencer de manière plus ou moins importante le comportement hygrothermique d'un complexe.

2.3.1.1. La norme NF ISO 13788 (avril 2013)

Ci-dessous l'extrait de la norme évoquant les conditions aux limites intérieures :

4.3.1 Température d'air intérieur

Utiliser des valeurs par rapport à l'usage prévu du bâtiment.

NOTE
L'Annexe A fournit une méthode d'estimation de la température d'air intérieur à partir de la température extérieure.

4.3.2 Humidité intérieure

L'humidité de l'air intérieur peut être :

a. obtenue de l'équation

$$p_i = p_e + \Delta p \qquad (2)$$

Utiliser des valeurs de Δp par rapport à l'usage prévu du bâtiment.

Les valeurs de Δp peuvent être calculées à partir de l'excédent d'humidité intérieure, Δv, à l'aide de l'équation

$$\Delta p = \Delta v \, R_v \, T_i = \frac{G}{nV} R_v \, T_i \qquad (3)$$

Les valeurs de Δp pour une gamme de types de bâtiments peuvent être trouvées dans l'Annexe A

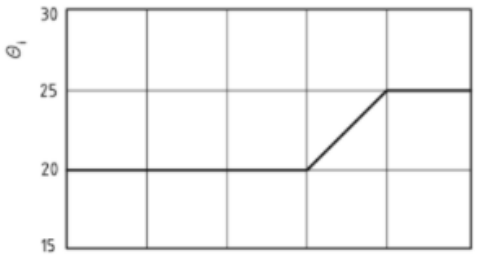
ou

b. donnée comme une valeur mensuelle moyenne φ_i donnée comme une valeur mensuelle moyenne

NOTE
L'Annexe A fournit une méthode d'estimation de l'humidité relative intérieure à partir de la température d'air extérieur.

c. donnée comme une constante φ_i quand l'humidité relative intérieure est gardée constante à l'aide d'une climatisation par exemple.

L'annexe A citée ci-dessus précise les valeurs moyennes journalières de la température et de l'humidité intérieures dans les logements et les bureaux en fonction des moyennes journalières de la température de l'air extérieur.



Légende
θ_i température intérieure exprimée en °C
φ_i humidité relative intérieure exprimée en %
θ_e température extérieure exprimée en °C
A Faible taux d'occupation
B Fort taux d'occupation

A.2 Climats maritimes

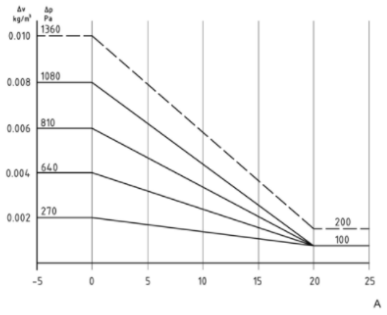
La charge hygrométrique intérieure peut s'exprimer au moyen de cinq classes d'humidité. La Figure A.2 montre les valeurs limites de Δv et Δp pour chaque classe. Pour les calculs, il est recommandé d'utiliser la valeur limite supérieure pour chaque classe à moins que le concepteur puisse démontrer que les conditions sont moins sévères. Les données de la Figure A.2 correspondent à des bâtiments situés en Europe Occidentale. Des données mesurées peuvent être utilisées pour obtenir des valeurs applicables à d'autres climats.

Le Tableau A.1 donne des indications pour le choix de la classe d'hygrométrie.

Classe d'hygrométrie	Bâtiment
1	Bâtiments inoccupés, zones de stockage pour marchandises sèches
2	Bureaux, logements à taux d'occupation et ventilation normaux
3	Bâtiments à taux d'occupation inconnu
4	Gymnases, cuisines, cantines
5	Bâtiments spéciaux, par exemple: laverie, brasserie, piscine

Tableau A.1 Classes d'hygrométries intérieures

Dans la mesure du possible, il convient d'utiliser les données mesurées, pour l'analyse des bâtiments de classe 5 à haute humidité intérieure. La ligne en pointillés de la Figure A.2 donne des valeurs suggérées qui pourraient être utilisées en l'absence d'autres données.



Légende
A température extérieure moyenne mensuelle, exprimée en °C

Figure A.2 Variation des classes d'humidité intérieure en fonction de la température extérieure

2.3.1.2. La norme EN 15026 (avril 2008)

Ci-dessous l'extrait de la norme évoquant les conditions aux limites internes :

5.1.1 Conditions d'usage

Pour évaluer la conception d'un nouveau bâtiment, il faut prendre en compte les conditions internes correspondant à l'usage le plus intensif probable du bâtiment. Par exemple, il peut arriver qu'un bâtiment qui avait une charge hygrométrique intérieure très faible (par exemple un entrepôt) devienne un bâtiment avec une charge hygrométrique élevée (par exemple une usine de transformation de produits alimentaires).

5.1.2 Paramètres

Les paramètres suivants doivent être utilisés pour spécifier le climat intérieur :

- température intérieure équivalente ;
- pression de vapeur ou tout autre paramètre d'humidité permettant de calculer la pression de vapeur.

5.1.3 Choix des données

Les données disponibles doivent être choisies dans l'ordre de préférence suivant :

- 1er choix : Valeurs mesurées pour des bâtiments similaires dans un climat similaire ou valeurs de consigne spécifiées par les systèmes d'air conditionné ;
- 2e choix : Résultats des simulations hygrothermiques ;
- 3e choix : Spécifications de la production d'humidité et des taux de renouvellement d'air, et calcul des conditions intérieures sur la base de ces spécifications.

NOTE
L'Annexe C et l'EN ISO 13788 fournissent des informations pour le calcul de l'humidité intérieure.

5.1.4 Coefficients de transfert en surface

Les coefficients de transfert en surface intérieure donnés au Tableau 2 doivent être utilisés pour le calcul du transfert de chaleur et de vapeur au niveau de la surface intérieure.

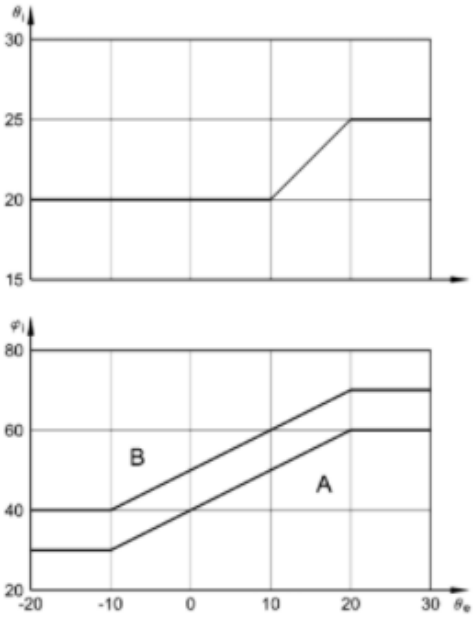
Direction du flux de chaleur	$h_{c,si}$	$h_{r,si}$	$s_{d,si}$
	W/(m² K)	W/(m² K)	m
Horizontal	2,5	5,7 ε	0,008
Ascendant	5	5,7 ε	0,004
Descendant	0,7	5,7 ε	0,03
ε est l'émissivité de grande longueur d'onde de la surface.			

Tableau 2 Coefficients de transfert de chaleur en surface intérieure et épaisseur d'air équivalente pour la diffusion de vapeur dans la couche limite

La plupart des surfaces des bâtiments ont une émissivité d'environ 0,9.

L'annexe C citée ci-dessus évoque les éléments suivants :

En l'absence de conditions d'air intérieur bien définies — contrôlées, mesurées ou simulées, il est possible d'adopter une approche simplifiée pour déterminer la température et l'humidité intérieures dans les bâtiments chauffés (logements et bureaux seulement) d'après la température de l'air extérieur. Les conditions de l'air intérieur sont obtenues à partir du graphique ci-dessous de la moyenne journalière des températures de l'air extérieur



Légende

- φ_i Humidité relative intérieure, %
- θ_i Température intérieure, °C
- θ_e Température extérieure, °C
- A Taux d'occupation normal
- B Fort taux d'occupation

2.3.1.3. Le DTU 31.2 (mai 2019)

Ci-dessous l'extrait de la norme évoquant les classifications des locaux en fonction de leur hygrométrie : Annexe B

B.1 Introduction

On définit W et n tels que :

- W la quantité de vapeur produite à l'intérieur du local par heure (g/h) ;
- n le taux horaire de renouvellement d'air (m^3/h).

On définit quatre types de locaux en fonction de leur hygrométrie en régime moyen pendant la saison froide.

- local à faible hygrométrie : $W/n \leq 2{,}5$ g/m^3 ;
- local à hygrométrie moyenne : 2,5 g/m^3 < $W/n \leq 5$ g/m^3 ;
- local à forte hygrométrie : 5 g/m^3 < $W/n \leq 7{,}5$ g/m^3 ;
- local à très forte hygrométrie: $W/n > 7{,}5$ g/m^3.

En première approximation, les locaux peuvent être classés comme suit :

B.2 Locaux à faible hygrométrie

- immeubles de bureaux non conditionnés, externats scolaires, logements équipés de ventilations mécaniques contrôlées et de systèmes propres à évacuer les pointes de production de vapeur d'eau dès qu'elles se produisent (hottes...) ;
- bâtiments industriels à usage de stockage, ateliers mécaniques, sans production de vapeur d'eau ;
- locaux sportifs sans public (sauf piscines ou patinoires).

B.3 Locaux à hygrométrie moyenne

B.3.1 Généralités

Bâtiments d'habitation, y compris les cuisines et salles d'eau, correctement chauffés et ventilés sans sur-occupation.

NOTE
Dans le cas de locaux sportifs avec public et leurs dépendances, locaux culturels et salles polyvalentes ou de culte, les Documents Particuliers du Marché définissent l'hygrométrie de ces locaux.

B.3.2 Locaux à forte hygrométrie

- bâtiments d'habitation médiocrement ventilés et sur-occupés ;
- locaux avec forte concentration humaine ou animale (bâtiments d'élevage agricole, manèges couverts de chevaux, certains ateliers, etc.) ;
- locaux à atmosphère humide contrôlée pour les besoins de la fabrication des produits (boulangeries et pâtisseries industrielles, imprimeries, tannage des cuirs, certains ateliers de peinture, de photographie, ateliers de traitement de tabacs...) ;
- locaux avec forte production de vapeur d'eau (piscines, conserveries, teintureries, papeteries, laiteries industrielles, ateliers de lavage de bouteilles, brasseries, ateliers de polissage, cuisines collectives, blanchisseries industrielles, ateliers de tissage, filatures...) ;
- locaux chauffés par panneaux radiants à combustible gaz.

B.3.3 Locaux à très forte hygrométrie

Locaux spéciaux tels que locaux industriels nécessitant le maintien d'une humidité relativement élevée, locaux sanitaires de collectivités d'utilisation très fréquente.

NOTE
Certains locaux à forte ou très forte hygrométrie peuvent être ramenés à des locaux à hygrométrie plus faible moyennant notamment une ventilation et un chauffage appropriés.

2.3.1.4. Le Guide SimHuBat : Détermination des hypothèses pour les simulations de transferts couplés Température / Humidité dans les parois de bâtiment (Oct 2021)

Ce guide sorti cette année découle du travail fourni par plusieurs acteurs français (Institutionnels, Industriels et Bureau d'études) dont WIGWAM réunis à plusieurs reprises ces 3 dernières années dans le cadre du programme pacte (Programme d'Action pour la qualité de la Construction et de la Transition Energétique). Il a pour but de proposer les hypothèses de calcul pour l'estimation des risques de pathologies liées à l'humidité dans les parois des bâtiments.

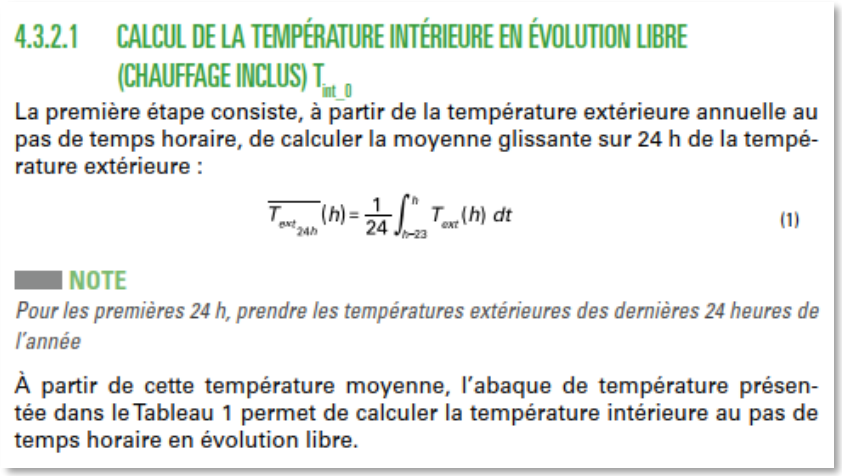
Le guide SimHuBat définit des données d'entrées fiables et maitrisées à utiliser dans les simulations hygrothermiques afin de prédire correctement le risque de pathologies liées à l'humidité, pour une application sur le territoire français.

Un chapitre porte sur la définition des conditions aux limites intérieures. Celle-ci différentie 2 configurations :

- Conditions intérieures en évolution libre (chauffage inclus)
- Conditions intérieures en présence d'un système de climatisation dans le local d'étude.

Pour chacune de ces configurations, une méthode d'évaluation de la température et de l'humidité relative est proposée.

Ci-après seule la configuration sans système de climatisation (évolution libre) est précisée. Se référer au Guide si besoin de précision sur la configuration avec climatisation.



4.3.2.1 CALCUL DE LA TEMPÉRATURE INTÉRIEURE EN ÉVOLUTION LIBRE (CHAUFFAGE INCLUS) T_{int_0}

La première étape consiste, à partir de la température extérieure annuelle au pas de temps horaire, de calculer la moyenne glissante sur 24 h de la température extérieure :

$$\overline{T_{ext_{24h}}}(h) = \frac{1}{24}\int_{h-23}^{h} T_{ext}(h)\,dt \qquad (1)$$

NOTE

Pour les premières 24 h, prendre les températures extérieures des dernières 24 heures de l'année

À partir de cette température moyenne, l'abaque de température présentée dans le Tableau 1 permet de calculer la température intérieure au pas de temps horaire en évolution libre.

Tableau 1 – Abaques permettant le calcul de la température et l'excès d'humidité intérieurs. Les températures en abscisses sont des valeurs moyennes glissantes sur les durées spécifiées

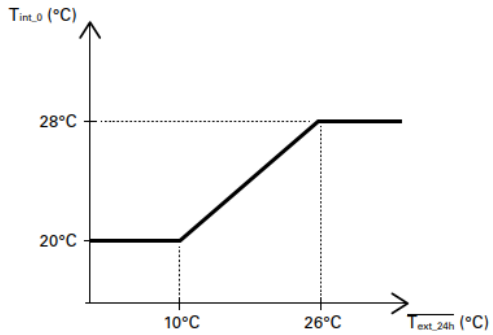
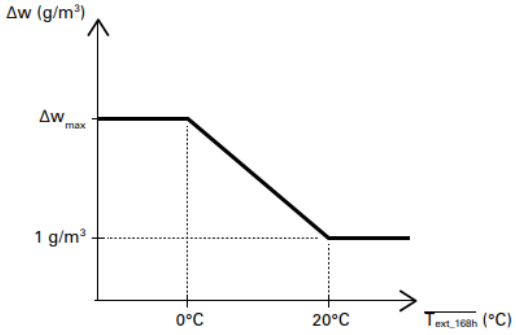
ABAQUE DE TEMPÉRATURE	ABAQUE D'EXCÈS D'HUMIDITÉ
	

Tableau 2 – Δw_{max} en fonction de la classe d'hygrométrie du local

CLASSE D'HYGROMÉTRIE	Δw_{max}
Faible	2,5 g/m³
Moyenne	5 g/m³
Forte	7,5 g/m³

4.3.2.3 CALCUL DE L'HUMIDITÉ RELATIVE INTÉRIEURE EN ÉVOLUTION LIBRE (CHAUFFAGE INCLUS) HR_{int_0}

Dans un premier temps, la moyenne glissante sur 168 h de la température extérieure est calculée à partir de la température extérieure annuelle au pas de temps horaire :

$$\overline{T_{ext}}_{168h}(h) = \frac{1}{168}\int_{h-167}^{h} T_{ext}(h)\,dt \qquad (4)$$

NOTE

Pour les premières 168 h, prendre les températures extérieures des dernières 168 heures de l'année

À partir de cette température moyenne, l'abaque présentée dans le Tableau 1 et définie au chapitre 4.3.1 permet de calculer l'excès d'humidité intérieure Δw à chaque heure.
L'humidité absolue intérieure en évolution libre (w_{int_0}) est alors calculée de la manière suivante :

$$w_{int_0}(h) = \overline{w_{ext_168}}(h) + \Delta w(h) \qquad (5)$$

Avec w_{ext_168h} la moyenne glissante sur 168 h de l'humidité absolue extérieure, calculée à partir de l'humidité relative extérieure et de la température extérieure au même pas de temps :

$$\overline{w_{ext_168h}}(h) = \frac{1}{168}\int_{h-167}^{h} w_{ext}(h)\,dt \tag{6}$$

Avec

$$w_{ext}(h) = \frac{pv_{sat}(T_{ext}(h)) \cdot HR_{ext(h)} \cdot M_{eau}}{R \cdot T_{ext}(h)} \tag{7}$$

Et

$$pv_{sat}(T_{ext}(h)) = \begin{cases} 610.5 \exp\left(21.875 \dfrac{T_{ext}(h)}{(265.5 + T_{ext}(h))}\right) & si\ T_{ext}(h) < 0°C \\ 610.5 \exp\left(17.269 \dfrac{T_{ext}(h)}{(237.3 + T_{ext}(h))}\right) & si\ T_{ext}(h) \geq 0°C \end{cases} \tag{8}$$

NOTE

Pour les premières 168 h, prendre les températures et humidités relatives extérieures des dernières 168 heures de l'année

À l'inverse, on en déduit alors l'humidité relative intérieure en évolution libre à partir de l'humidité absolue et de la température intérieure au même pas de temps calculé au chapitre 4.3.2.2 :

$$HR_{int_0}(h) = \frac{w_{int_0}(h) \cdot R \cdot T_{int}(h)}{M_{eau} \cdot pv_{sat}(T_{int}(h))} \tag{9}$$

Avec

$$pv_{sat}(T_{int}(h)) = \begin{cases} 610.5 \exp\left(21.875 \dfrac{T_{int}(h)}{(265.5 + T_{int}(h))}\right) & si\ T_{int}(h) < 0°C \\ 610.5 \exp\left(17.269 \dfrac{T_{ext}(h)}{(237.3 + T_{int}(h))}\right) & si\ T_{int}(h) \geq 0°C \end{cases} \tag{10}$$

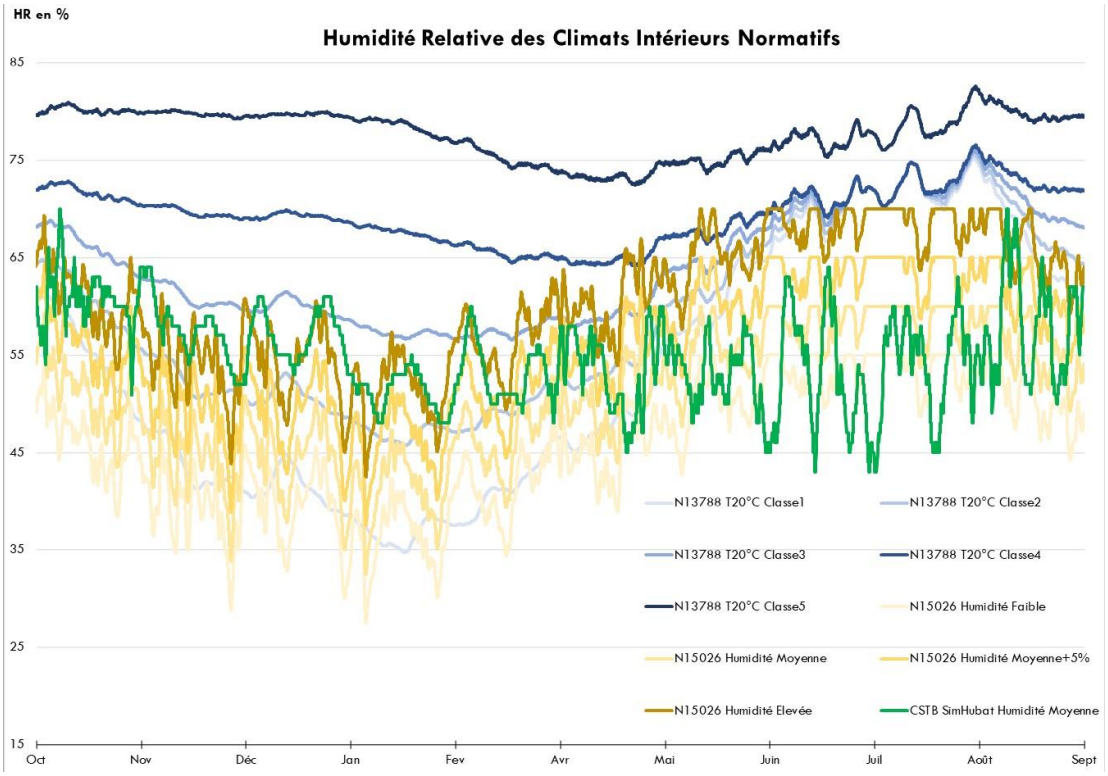
2.3.2. Analyse normative sur une paroi rénovée et comparaison aux usages standards résidentiels

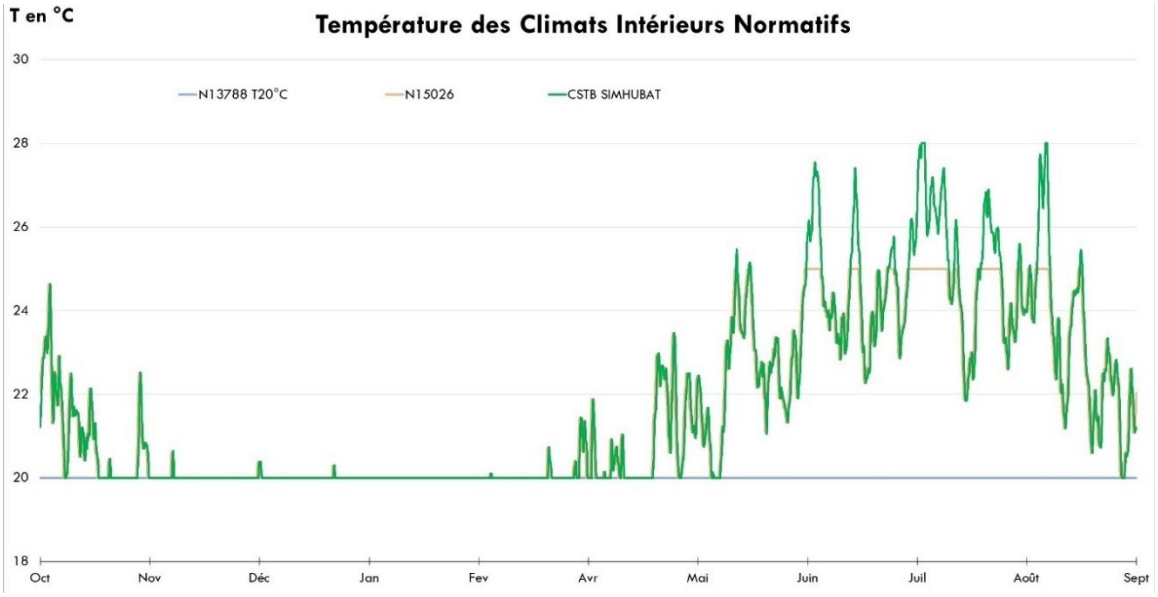
2.3.2.1. Comparaison directe des ambiances intérieures

Les ambiances se basant sur les référentiels normatifs ci avant diffèrent quant à leur température mais également leur humidité relative.

Ci-dessous sont représentées les évolutions annuelles des conditions hygrothermiques du climat intérieur (Température, Humidité relative) pour l'ensemble des normes pré citées.

A noter que dans la suite de l'analyse et dans un souci de simplification, les études se basent sur le climat extérieur de Nancy.





Au travers de ces 2 graphes, il est constaté une variabilité importante des climats suivant la norme choisie et notamment sur l'humidité relative.

Sur la période hivernale, la classe 5 de la norme NF ISO13788 oscille en humidité relative autour de 75% à 80% tandis qu'au même moment de l'année, la classe d'humidité faible de la EN15026 précise une humidité relative pouvant évoluer sous les 35%.

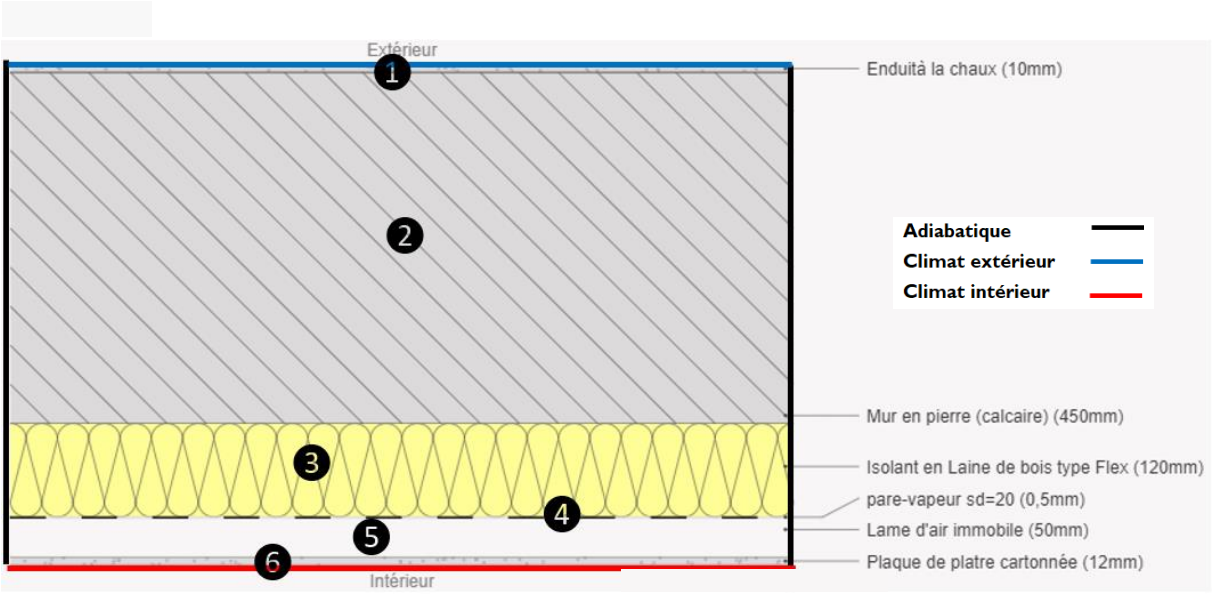
En saison estivale, les humidités relatives sont davantage proches avec tout de même un écart de plus de 25% entre la classe 5 de la norme NF ISO 13788 et le climat CSTB Simhubat humidité moyenne.

2.3.2.2. Comparaison indirecte par impact sur un complexe de paroi rénovée

En vue de comprendre et analyser les climats précisés ci avant, une étude de sensibilité a été réalisée sur une paroi existante « test ». L'idée étant de regarder l'évolution hygrothermique de ce complexe de mur soumis coté intérieur à chacun des climats pré cités.

Dans ces conditions, une étude dynamique sur le logiciel WUFI Pro 6.2 a été réalisée pour analyser le comportement hygrothermique du complexe et notamment au niveau de l'interface Isolant/Pierre qui se trouve être la zone critique du modèle.

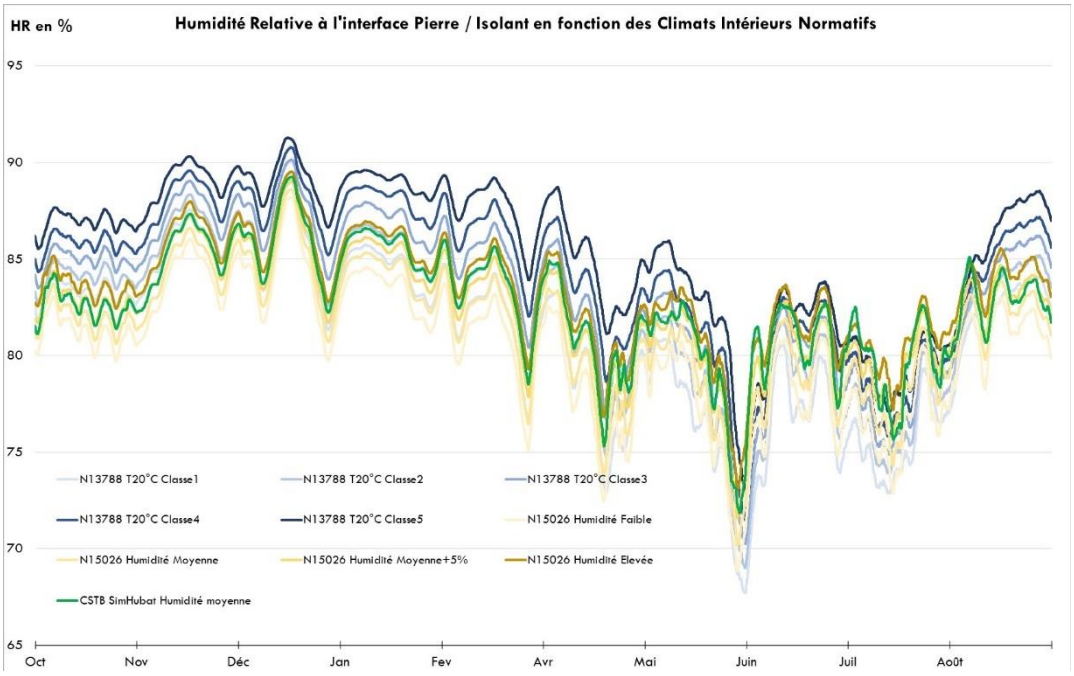
Voici ci-dessous la paroi choisie comme représentative d'une réhabilitation standard.



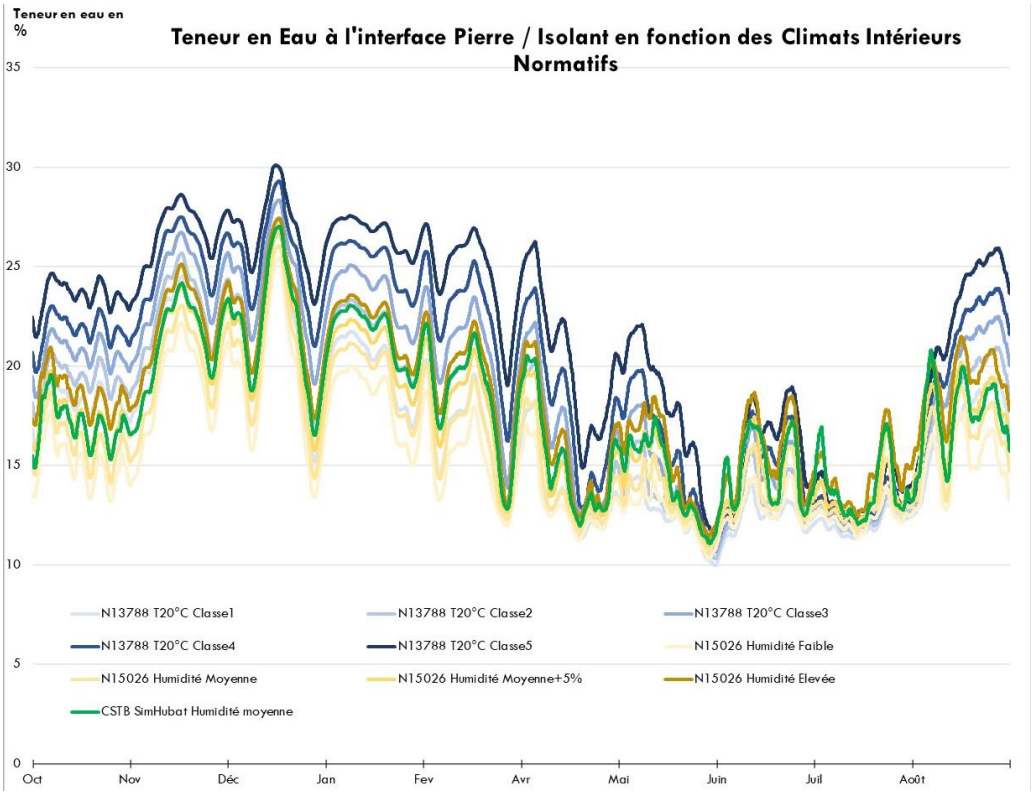
		Source des données techniques	Epaisseur (mm)	Densité (kg/m3)	Porosité (m3/m3)	Chaleur spécifique (J/KgK)	Conduct. therm (W/mK)	Diffusion de vapeur (µ)
1	**Enduit ordinaire à la chaux**	Bibliothèque WUFI North America Database	10	1769	0,274	840	0,34	310
2	**Pierre de taille**	Bibliothèque WUFI Fraunhofer - "Bloc silico-calcaire"	450	1900	0,29	850	1,00	28
2	**Isolant Laine de bois**	Données bibliothèque IBP Fraunhofer : "PAVAFLEX"	120	53	0,96	2100	0,039	1,35
3	**Membrane pare vapeur (SD20m)**	Données bibliothèque IBP Fraunhofer : "freinvapeur (SD20m)	-	130	0,001	2300	2,30	20 000
4	**Lame d'air immobile (vide technique)**	Données bibliothèque IBP Fraunhofer : "Lame d'air 50mm sans sorption d'humidité supplémentaire"	50	1,3	0,999	1000	0,28	0,32
5	**Plaque de platre cartonnée**	Données bibliothèque IBP Fraunhofer : "plaque de plâtre cartonnée"	12	850	0,65	850	0,20	8

Les 5mm de l'isolant Laine de bois en contact avec la pierre ont été regardés en humidité relative mais également en teneur en eau massique.

Le calcul hygrothermique a été réalisé sur 3 ans, durée nécessaire pour constater la stabilisation du modèle. Seule la dernière année est présentée sur les graphes ci-dessous :



L'humidité relative de cette interface soumis aux différents climats intérieurs évolue de manière similaire avec tout de même une différence de 5 à 10% suivant le climat intérieur ce qui n'est pas neutre. En l'état aucun risque de condensation n'est noté à cette interface sensible. Au maximum, l'humidité relative reste inférieure à 92%.



Le constat sur la teneur en eau de l'isolant biosourcé à proximité du mur existant en pierre est plus critique avec une évolution au-dessus de 23%M plus de 8 semaines par an dès lors que ce complexe est soumis coté intérieur aux climats les plus défavorables. Le seuil des 8 semaines par an étant dépassé dans la plupart des climats modélisés, ce complexe rénové peut être analysé comme risqué.

Au travers de cette étude comparative, a été étudié également les différences en termes d'orientation du flux de vapeur traversant la paroi. Le tableau ci-après précise la part mensuelle d'humidité cheminant de l'intérieur vers l'extérieur. A noter que le pourcentage restant est donc la part de flux inverse cheminant de l'extérieur vers l'intérieur.

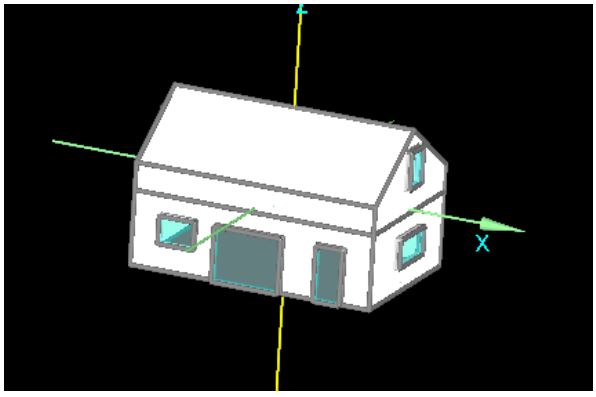
Part du flux d'humidité de l'intérieur vers l'extérieur par mois (%)	*Janvier*	*Février*	*Mars*	*Avril*	*Mai*	*Juin*	*Juillet*	*Août*	*Septembre*	*Octobre*	*Novembre*	*Décembre*
SimHuBat Moyenne	73%	82%	64%	50%	46%	39%	47%	46%	59%	53%	72%	74%
15026 basse	62%	59%	49%	48%	52%	40%	39%	43%	46%	44%	43%	45%
15026 moyenne	63%	61%	49%	49%	52%	45%	46%	51%	48%	46%	45%	45%
15026 moyenne +5%	63%	62%	49%	49%	53%	49%	53%	55%	49%	46%	46%	46%
15029 élevée	63%	63%	50%	49%	55%	53%	62%	59%	50%	47%	46%	46%
13788 Classe1	44%	76%	94%	53%	82%	40%	56%	35%	20%	24%	34%	68%
13788 Classe2	79%	95%	94%	60%	82%	34%	54%	35%	28%	36%	48%	80%
13788 Classe3	90%	94%	93%	64%	75%	32%	49%	36%	41%	60%	75%	95%
13789 Classe4	100%	100%	96%	72%	68%	32%	45%	38%	58%	85%	96%	100%
13789 Classe5	70%	63%	98%	81%	71%	39%	51%	47%	53%	66%	80%	76%

2.3.2.3. Modélisation d'une ambiance tendant à se rapprocher de la réalité

Ce chapitre tend à comparer les climats normatifs analysés précédemment à une modélisation de climat intérieur se rapprochant d'un usage standard.

Pour cela, une modélisation sur WUFI Plus (V3.2.0.1) a été réalisée en se basant sur les hypothèses ci-dessous :

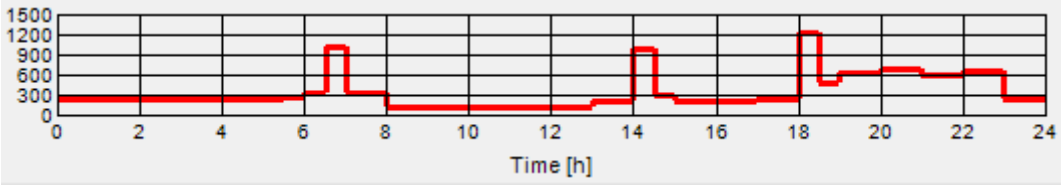
- Une maison individuelle de 100m² sur 2 niveaux (combles aménagés).
- Une enveloppe rénovée avec une niveau de performance thermique similaire sur l'ensemble des différentes parois extérieur opaques. Les murs ont été modélisés conformément à la paroi test précédemment décrite. Les autres parois sont donc du même niveau de performance.
- La surface de menuiseries extérieures de la maison est égale à 1/6 de la surface habitable comme le préconise la Réglementation actuelle (50% orienté au Sud, 20% à l'Est et à l'Ouest et 10% au Nord)



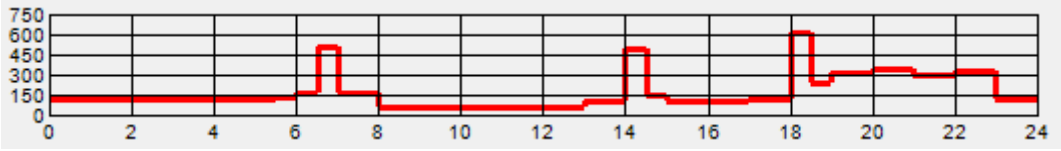
Ces hypothèses restent relativement cohérentes au regard du parc immobilier de maisons individuelles métropolitain.

Du point de vue de l'usage (charge interne et occupation), il a été considéré le scénario suivant issus de la base de données scénarios du Fraunhofer et basés sur une famille de 4 personnes en usage standard.

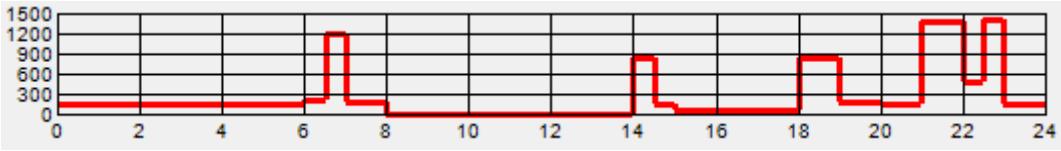
Heat Gain convective [W] :



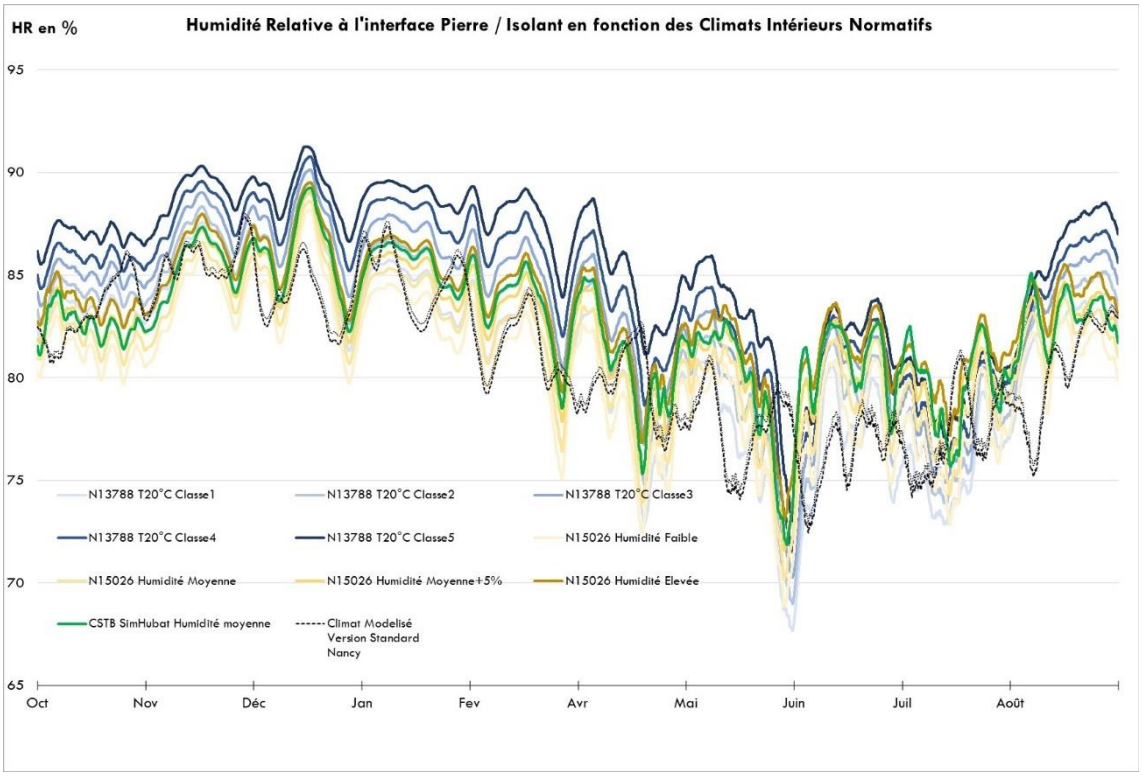
Heat Gain Radiant [W]

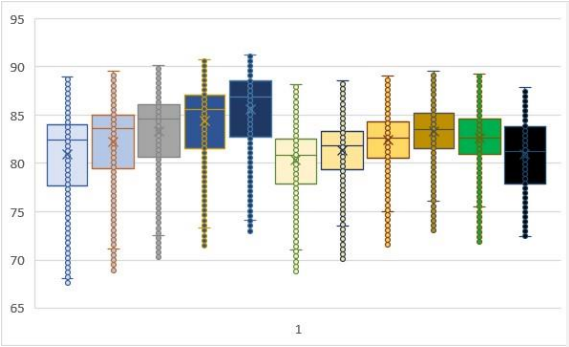


Moisture source [g/h]



Dans ces conditions, la calcul hygrothermique/climatique a été effectuée et a abouti aux résultats ci-après :





La représentation en boîte à moustache des données permet d'analyser plusieurs paramètres :

• La moyenne est représentée par une croix

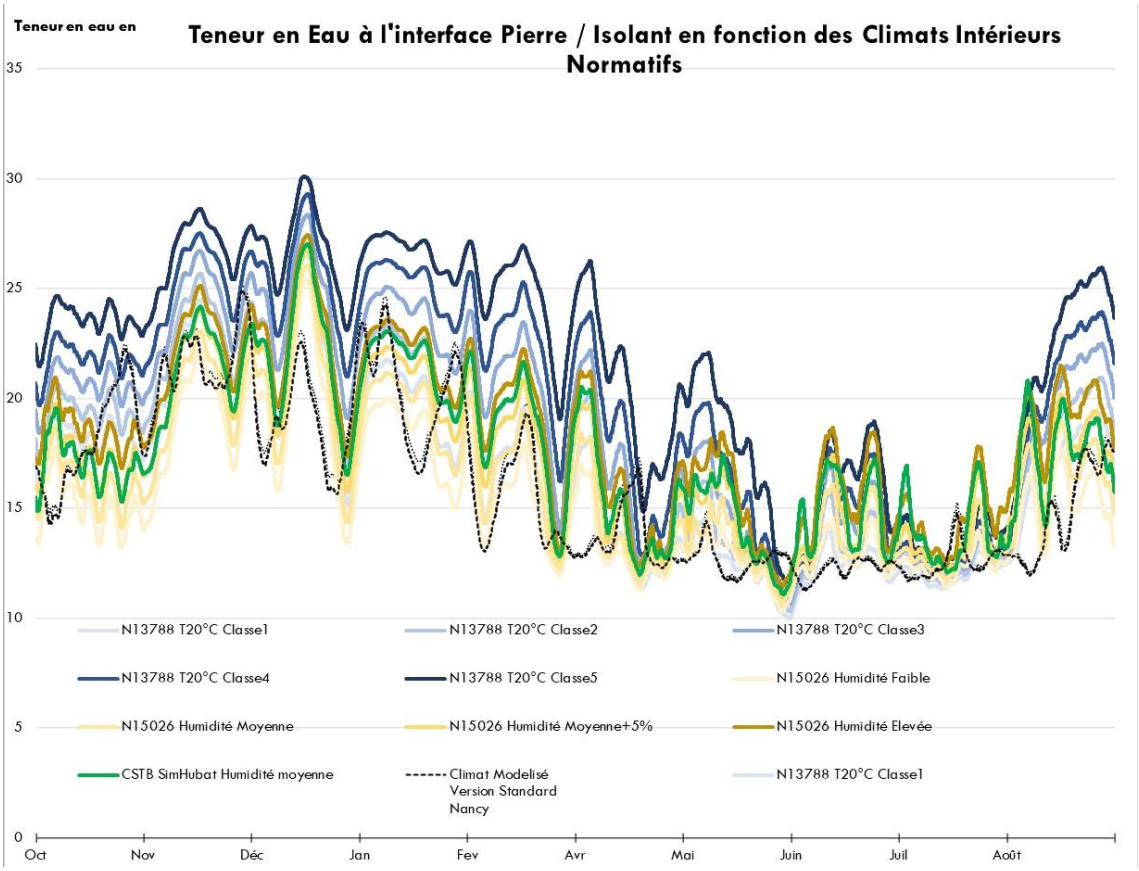
• La médiane est représentée par le trait épais horizontal.

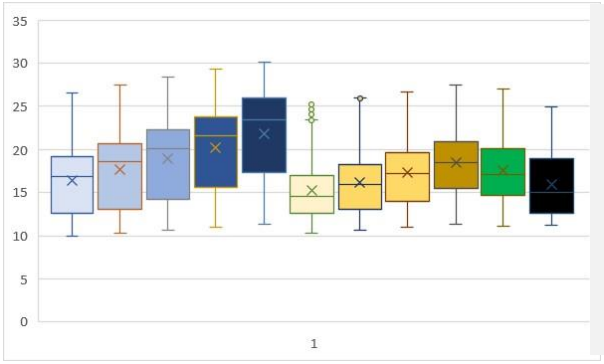
• Le rectangle comprend les données du deuxième quartile au troisième quartile, soit 50 % des données mesurées.

• Enfin, les segments inférieurs et supérieurs comprennent respectivement le premier et le quatrième quartile.

Concernant l'humidité relative à l'interface Pierre / Isolant qui reste dans notre cas la zone sensible du modèle d'étude, il en résulte une évolution plus favorable (courbe pointillée Noire) que la plupart

des climats normatifs avec notamment un maximum atteint en hiver plus faible que les autres climats (85%HR alors que les autres valeurs maximales varient entre 87 et 92%HR). Le graphique boites à moustache montre bien cela.





La représentation en boîte à moustache des données permet d'analyser plusieurs paramètres :

• La moyenne est représentée par une croix

• La médiane est représentée par le trait épais horizontal.

• Le rectangle comprend les données du deuxième quartile au troisième quartile, soit 50 % des données mesurées.

• Enfin, les segments inférieurs et supérieurs comprennent respectivement le premier et le quatrième quartile.

Concernant la teneur en eau de l'isolant Laine de bois, il en découle un constat relativement similaire avec des valeurs maximales se rapprochant des climats normatifs les plus favorables (15026 classe d'humidité faible, 13788 classe 2). A noter que dans ces conditions la laine de bois évolue dans des conditions de teneur en eau plus favorables et respectant les recommandations du guide Simhubat (seulement 8 semaines par an max > 23%M).

2.3.3. Conclusions et perspectives

Les études réalisées dans le cadre de ces analyses climatiques mettent en lumière globalement des niveaux d'humidité moins élevés en réalité que ce qui émanent des climats normatifs.

Cette analyse parait logique compte tenu de l'ambition des normes qui reste de sécuriser les techniques de construction avec naturellement un caractère sécuritaire à garantir.

A noter que le climat qui a été modélisé et qui se veut proche de la réalité, se base sur les postulats suivants qui comme précisé ci-après seraient à requestionner pour chaque cas :

- **Le renouvellement d'air mécanique en place permet un brassage homogène du volume du local étudié** et donc une température et une humidité relative constante dans l'ensemble du volume d'étude. Ceci est loin d'être toujours le cas au regard des sujétions architecturales du local (technique de diffusion mécanique ou naturelle de l'air, complexité aéraulique du volume, impact du mobilier se positionnant régulièrement le long des parois extérieures et donc de fait influençant les mouvements convectifs et donc in fine la propension de l'air à venir « lécher » l'ensemble de la finition intérieure de manière homogène).
- **L'occupation nominale d'une maison individuelle est prise à 4 personnes** ce qui n'est pas toujours le cas avec potentiellement des périodes non seulement ponctuelles de suroccupation du local et donc une production de vapeur plus importante. Il en est de même pour les habitudes spécifiques d'une famille (fréquence des lessives, toilettes & Cuisines).
- **Le système de ventilation est mis en œuvre et maintenu en vue de garantir un brassage conforme à la règlementation et pérenne dans le temps**. L'observatoire de la qualité de l'air intérieur a montré par plusieurs campagnes de mesure depuis les années 2000 que le débit total de ventilation est inférieur au débit de référence dans plus de la moitié du parc de logements.

Ceci montre bien le caractère favorable du climat modélisé dans le cadre de cette étude qui de par les 3 postulats ci avant est susceptible de dériver vers une ambiance hygrothermique plus critique. La liste n'étant bien évidement non exhaustive.

Dans l'optique de répondre au besoin et de statuer sur le climat à prendre en considération, il conviendra au préalable de clarifier l'objectif de l'étude :

- Est-ce pour supprimer le risque de création de pathologies susceptibles d'engendrer des désordres impactant la performance et la pérennité du complexe rénové.
- Est-ce pour approcher le comportement réel de la paroi rénovée dans son environnement et ainsi l'optimiser pour la recherche de performance hygrothermique (Confort, résistance thermique,…)

Pour ce qui est du premier objectif de supprimer le risque hygrothermique, les études récentes encadrées par le programme Pacte et découlant sur la parution du guide SimHuBat en octobre 2021 mettent en avant une nécessaire hypothèse défavorable de climat qu'il convient de prendre comme base de départ pour ce type d'étude hygrothermique.

En vu de répondre au 2^{e} objectif, notre avis est plus nuancé et nécessitera certainement des compléments d'étude de sensibilité qu'il conviendra d'entreprendre pour affiner le modelé climatique à considérer en fonction du diagnostic sur site réalisé. En effet, au regard de cette première analyse, il

en découle une tendance à s'orienter vers les modèles normatifs les plus favorables. Néanmoins certains paramètres influant fortement l'ambiance hygrothermique intérieure se doivent d'être affinés :

- Influence de la ventilation mécanique contrôlée sur la teneur en eau des matériaux du complexe rénové et l'humidité relative aux interfaces (Absence de VMC, VMC très dégradé ne garantissant pas les débits réglementaire, VMC autoréglable, Hygroréglable, Double flux avec récupération de chaleur…).
- Influence de la perméabilité à l'air (très dégradé VS conforme au réglementations actuelles des bâtiments neufs)
- Influence du système d'émission de chauffage, et de la température de consigne
- Impact de la climatisation en maison individuelle
- …

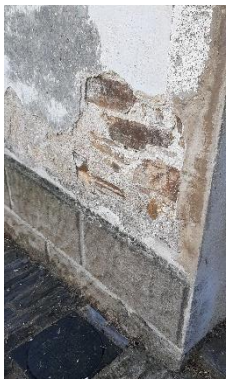
2.4. Diagnostic humidité de la maison à rénover

2.4.1. Les différentes pathologies dues à l'humidité

De nombreuses pathologies peuvent apparaître dans une maison dû à un fort taux d'humidité :

- Gonflement, fissuration, altération des revêtements,
- Présence d'efflorescences salines, ou salpêtres, sur les murs,
- Développement de moisissures et de champignons lignivores,
- Pourrissement du bois et des matériaux à base de bois,
- Perte de la performance thermique des parois, et structurelle des matériaux de structure,
- Mauvaise qualité de l'air intérieur ce qui impact directement la santé des occupants,
- Sensation de froid …

Certaines de ces pathologies sont illustrées sur les images suivantes :



Il est important de comprendre l'origine de ces pathologies pour réaliser une rénovation efficace et pérenne des maisons. La présence d'un fort taux d'humidité peut être le résultat de plusieurs phénomènes physiques.

L'humidité existe principalement sous deux formes dans l'environnement de la maison : sous forme de vapeur d'eau et sous forme liquide.

La vapeur d'eau peut subir un changement d'état et finir sous forme liquide lorsque l'humidité relative arrive à saturation dans certaines zones, c'est la condensation. Cette condensation est le résultat d'une forte présence de vapeur d'eau et d'une faible température. Elle peut apparaître au sein d'un matériau de construction, au niveau des interfaces entre matériaux, et des surfaces internes ou externes. De l'humidité sous forme liquide peut également être apportée au sein des parois de la maison par des phénomènes de capillarité, appelés aussi remontées capillaires. L'eau du sol remonte par la porosité ouverte des murs jusqu'à 1m, 1m50 de hauteur si aucune barrière entre le sol et les murs n'est appliquée. Des phénomènes d'infiltration d'eau peuvent également se créer au niveau d'une fissure dans un mur, d'une fuite dans les canalisations, d'un problème d'étanchéité de la toiture, des murs ou des menuiseries.

L'ensemble de ces phénomènes entraînent les différentes pathologies énumérées plus haut. Un premier diagnostic visuel peut alors être effectué lors d'un diagnostic humidité. Plusieurs caractéristiques entraînées par une trop forte humidité sont à vérifier :

- Tâches noires ou vertes sur les murs générées par de la moisissure,
- Présence de champignons,
- Efflorescences salines se traduisant par de la poudre blanchâtre en surface des murs,
- Papiers-peints qui se décollent et sont détériorés,
- Cloques présentes sur les parois,
- Plâtres et enduits sui s'effritent,
- Gonflement des revêtements,
- Pourrissement des revêtements de sol,

- Pourrissement du bois

Au-delà du diagnostic visuel, il existe plusieurs méthodes pour analyser l'humidité de la paroi, et déterminer la teneur en eau des matériaux constitutifs de la paroi. La teneur en eau des matériaux de construction fait référence à la quantité d'eau présente dans le matériau. Caractériser la teneur en eau des matériaux de construction du bâtiment existant est une étape importante à réaliser avant travaux de rénovation. Cette mesure donne des indications sur la performance thermique et mécanique des parois existantes, sur la dégradation possible des matériaux existants, ainsi que sur un problème sanitaire qui peut impacter la santé des occupants. Mesurer la teneur en eau des matériaux avant travaux est également recommandée afin de s'assurer de la bonne réalisation et tenue des travaux de rénovation.

La teneur en eau des matériaux est généralement renseignée en % et se calcule de la manière suivante :

$$X = \frac{m_{humide} - m_{sec}}{m_{sec}} \cdot 100$$

Avec *X*, la teneur en eau (%), m_{humide} la masse du matériau à l'état humide et m_{sec} la masse du matériau à l'état anhydre. Une méthode de mesure très précise de la teneur en eau des matériaux peut être effectuée en laboratoire, c'est la **méthode de la pesée**. Elle consiste à prendre la masse de l'échantillon à l'état humide, puis de faire sécher l'échantillon en enceinte pendant un certain temps jusqu'à ce que la masse de l'échantillon varie moins de 0,04 kg. Une fois l'échantillon anhydre, sa masse peut être mesurée la teneur en eau de l'échantillon peut être calculée.

Cette méthode est difficilement applicable sur terrain. Il existe d'autres méthodes pour mesurer la teneur en eau des matériaux de construction in-situ, ainsi que d'autres propriétés liées à l'humidité.

2.4.2. Méthodes de mesure in-situ des propriétés hygrothermiques

2.4.2.1. Les humidimètres

Les humidimètres permettent de mesurer la teneur en eau des matériaux. Ces appareils de mesure ne doivent pas être confondus avec les hygromètres qui mesurent le taux d'humidité de l'air ambiant. Différentes propriétés des matériaux peuvent être mesurées par les humidimètres, qui dépendent de leur teneur en eau :

- La résistance électrique d'un matériau, c'est la méthode résistive,
- La permittivité diélectrique d'un matériau, c'est la méthode capacitive.

METHODE RESISTIVE, HUMIDIMETRES A POINTE

Les humidimètres permettant de mesurer la résistance électrique d'un matériau sont appelés humidimètres à pointe.

Les deux pointes métalliques sont à enfoncer dans le matériau, et la résistance électrique du matériau est mesurée entre les deux pointes. La profondeur de mesure dépend alors de la longueur des pointes, et peut varier entre 4 et 12 mm d'un humidimètre à l'autre. Dans certains cas, des longues pointes peuvent être insérées à l'aide d'une sonde marteau, et la profondeur de mesure peut alors atteindre plusieurs dizaines de millimètres.

La résistance électrique d'un matériau varie entre autres en fonction de sa teneur en eau. Plus le matériau est humide, plus sa résistance électrique est faible. À partir de courbes de calibration effectuées en laboratoire, il est possible alors de déduire la teneur en eau des matériaux (en %) par une mesure de la résistance électrique. Suivant les humidimètres, différentes courbes de calibration sont renseignées. Dans la majorité des cas, les humidimètres à pointes sont calibrés pour le matériau bois, et donneront une mesure assez précise de la teneur en eau des bois. D'autres courbes de calibration peuvent être renseignées pour le plâtre ou le béton par exemple. Les humidimètres à pointe peuvent également mesurer pour les matériaux de construction autre que le bois, une teneur en eau « Wood Moisture Equivalent (%) », et donnent alors une indication sur l'humidité du matériau et non une mesure précise de leur teneur en eau. Au-delà d'une certaine mesure, qui avoisine les 20 %, le matériau de construction est considéré comme humide.

Suivant les humidimètres, une correction automatique de la température peut être apportée à la mesure si une sonde de température est associée.

METHODE CAPACITIVE, HUMIDIMETRES DE SURFACE

Les humidimètres permettant de mesurer la permittivité diélectrique d'un matériau sont également appelés humidimètres de surface.

Cet humidimètre ne nécessite pas l'enfoncement des deux sondes métalliques dans le matériau, mais de positionner la surface de l'humidimètre sur le matériau à tester. Cette mesure est ainsi non destructive. La surface à positionner sur le matériau est composée de deux électrodes, une émettrice d'une onde électromagnétique et l'autre réceptrice. La fréquence de l'onde dépend alors de la teneur en eau du matériau entre autres, et permet ainsi à partir de courbes de calibration de déduire la teneur en eau des matériaux.

La zone de mesure est plus grande que dans le cas d'un humidimètre à pointe. La mesure peut aller jusqu'à 40 mm de profondeur suivant la densité du matériau. Au vu de la profondeur de mesure, il se peut que la teneur en eau mesurée soit le résultat de la teneur en eau de plusieurs matériaux. La mesure par l'humidimètre de surface non destructif, permet de tester plusieurs endroits de la paroi, et d'avoir ainsi une indication globale sur l'humidité de la paroi. La zone la plus humide peut alors être déduite. Ensuite, une mesure plus précise de la teneur en eau des matériaux peut être effectuée au niveau de la zone la plus humide avec un humidimètre à pointe.

Il existe également les humidimètres à sonde comme nous pouvons le voir sur la dernière photo. Les capteurs se trouvent dans ce cas-là à l'extrémité de la sonde. Ces appareils sont très utiles lorsqu'il s'agit de mesurer la teneur en eau à l'intérieur d'un isolant paille ou fibreux par exemple.

AUTRES METHODES

Il existe d'autres technologies de mesure de la teneur en eau à partir d'humidimètres. Il existe notamment la technique à micro-onde, qui s'emploie de la même manière que l'humidimètre de surface. L'humidimètre à micro-onde se plaque sur la paroi à mesurer, il est possible ainsi de réaliser une cartographie de l'humidité de la paroi, et de façon relative déterminer où se trouvent les zones les plus humides. Cette méthode a l'avantage de réaliser une mesure beaucoup plus en profondeur que la méthode capacitive, car celle-ci s'effectue jusqu'à 30 cm de profondeur. En revanche, une mesure moyenne sur l'ensemble des matériaux présents jusque 30 cm de profondeur est réalisée, et il est impossible de décorréler une mesure par matériau de construction. Cette méthode est ainsi adaptée pour effectuer une cartographie de l'humidité de la paroi, déterminer la zone la plus humide. Si une mesure précise de la teneur en eau des matériaux de construction est à effectuer, un diagnostic avec l'humidimètre à pointe ou autre est à effectuer dans cette zone.

2.4.2.2. Bombe au carbure

La bombe au carbure est un moyen de déterminer la teneur en eau d'un matériau à partir d'une réaction chimique qui s'effectue entre le carbure de calcium et l'eau.

Le principe de mesure est le suivant. Un prélèvement du matériau est effectué. Suivant la teneur en eau supposée du matériau, le prélèvement peut varier entre 3 et 100 g. Le matériau est mis en contact avec du carbure de calcium, et une réaction chimique s'effectue entre l'eau contenu dans le matériau et le carbure de calcium. De l'acétylène gazeux et de l'hydroxyde de calcium solide se forment, et une surpression est créée dans le flacon. En fonction de la surpression générée, et de la masse de l'échantillon introduite, la teneur en eau de l'échantillon peut être déterminée. Cette méthode a l'avantage d'être très précise, mais n'est pas adaptée pour l'ensemble des matériaux de construction. Elle est principalement utilisée pour les supports mortier ou béton et les chapes fluides.

2.4.2.3. Caméra thermique

La caméra thermique mesure l'intensité du rayonnement infrarouge. Cet appareil ne permet donc pas de quantifier la quantité d'eau présente dans le matériau, mais de diagnostiquer des zones humides par changement de température de la surface de la paroi. Combiné avec un appareil permettant d'effectuer une mesure précise de la quantité d'eau, la caméra thermique est un bon moyen pour balayer l'ensemble du bâtiment, et d'identifier les zones humides, les ponts thermiques, et l'hétérogénéité de la paroi.

Ces caméras sont utiles aussi pour détecter les rails métalliques, auxquels il faut faire attention lors de l'utilisation des humidimètres capacitifs, ou à micro-onde qui verront leurs résultats faussés par la présence du métal.

2.4.2.4. Pipette de Karsten

La pipette de Karsten permet de déterminer le coefficient d'absorption A (kg/m^2·sec^{0,5}) d'un matériau. Elle permet d'analyser l'absorption d'un revêtement extérieur et donne ainsi une indication sur la protection à la pluie battante du bâtiment. Cette méthode permet également d'utiliser la valeur mesurée lors d'une simulation des transferts hygrothermiques.

Pour déterminer le coefficient *A*, la pipette doit dans un premier temps être fixée au mur à l'aide d'un joint d'étanchéité, comme indiqué sur la Figure. De l'eau est ensuite introduite jusqu'en haut de la pipette. La colonne d'eau ainsi créée, de 98 mm de haut la plupart du temps, génère une pression au niveau de la paroi équivalente à un pression générée par un vent de 142,5 km/h. Cette pression diminue au fur et à mesure de l'absorption de l'eau dans le revêtement, jusqu'à atteindre une pression équivalente à un vent de 70 km/h.

Le coefficient *A* se calcule de la manière suivante :

$$A = \frac{W}{\sqrt{T \cdot 60}}$$

Avec :

A : le coefficient d'absorption (kg/m^2·sec^{0,5})

W : l'absorption d'eau mesurée à la pipette de Karsten (kg/m^2)

T : durée de l'essai en minutes.

Toutes les 5 minutes, le niveau de l'eau lu sur la pipe de Karsten est enregistré. Ainsi, entre la 5ème et la 15ème minute d'essai, la quantité d'eau absorbée peut être déterminée (ml) sur ce laps de temps de 10min.

L'absorption de l'eau *W* se calcule alors comme suit :

$$W = \frac{Q_{eau}}{1000} \cdot \frac{1}{S}$$

Avec :

Q_{eau} la quantité d'eau absorbée durant le laps de temps de 10 minutes entre la 5ème et la 15ème minute.

S la surface de contact entre la pipette de Karsten et la paroi testée. Cette surface est généralement égale à 5,9 cm^2.

Et *T* la durée de l'essai vaut alors 10 minutes.

2.4.2.5. Bandelettes réactives aux sels de nitrate

Les salpêtres peuvent être visibles en formant une sorte de mousse blanche en surface de la paroi, mais aussi invisibles. Dans ce cas des bandelettes, réactives aux sels de nitrate contenues dans le salpêtre peuvent être utilisées. Ces sels peuvent être présents dans les plâtres, les sols et les maçonneries.

Dans le cadre du projet Smart Réno, une veille sur la mesure de la teneur en eau avant travaux, a été réalisée sur l'ensemble des documents techniques de la filière.

Les DTU et CPT indiquent à plusieurs reprises des mesures obligatoires de teneur en eau à effectuer sur chantier. Les méthodes de mesure préconisées dépendent du matériau à analyser, et les seuils de

teneur en eau à ne pas dépasser changent suivant les travaux à réaliser. Ces seuils de teneur en eau sont toujours indiqués en %. La synthèse proposée est rédigée en deux temps : par méthode de mesure et par métier.

2.4.3. Les préconisations normatives

2.4.3.1. Préconisations par méthodes de mesure

HUMIDIMETRE A POINTE

Cet appareil est utilisé principalement pour mesurer la teneur en eau du matériau bois et ses dérivés. Il est demandé dans les textes que l'humidimètre à pointe soit étalonné. Les seuils de teneurs en eau à ne pas dépasser sont indiqués dans l'ensemble des textes en % masse.

Les teneurs en eau suivantes sont attendues suivant le contexte :

- Lambris en lames, panneaux et menuisés avant fixation : de 8 à 14 % en masse.
- Supports de couverture dérivés du bois : panneaux de contreplaqué 18 %, panneaux de contreplaqué ignifugés 22 %, panneaux de particules 16 %, panneaux de particules ignifugés 20 %.
- Lames de bardage : Feuillus 17 %, Résineux 19 %.
- Supports bois pour parquets à coller : 12 %.
- Supports bois pour peinture et papier-peint : bois massifs exposés aux intempéries 18 %, panneaux extérieur support d'un revêtement adhérent 12 % ± 2 %, bois massifs type lambris 12 % ± 3 %, bois ou panneaux utilisés en intérieur 10 % à 12 %, locaux chauffés 10 %.

Il est aussi recommandé dans les textes de mettre en œuvre les bois dont l'humidité est la plus proche possible de l'humidité d'équilibre du site.

L'humidimètre à pointe revient à trois reprises pour des matériaux autres que le bois et ses dérivés :

- Support pour collage des lambris en lame : < 5 %.
- Support mortier ou béton pour sols plastiques : < 3 %
- Maçonneries en bloc, plâtres pour peinture et papier-peint : < 5 % (humidimètre correctement étalonné donne valeurs approchée).

HUMIDIMETRE DE SURFACE

L'humidimètre capacitif revient moins régulièrement que les deux méthodes précédentes. Celui-ci est recommandé dans les cas suivants :

- Enduits plâtres et mortiers pour les plafonds tendus : < 5 %
- Maçonneries en bloc, plâtres pour peinture et papier-peint : < 5 %

BOMBE AU CARBURE

La mesure de la teneur en eau par la bombe au carbure revient à plusieurs reprises dans plusieurs normes. La mesure de profondeur est souvent indiquée. Cette mesure est demandée dans les cas suivants :

- Support mortier ou béton pour parquet à clouer ou coller : < 3 % mesurée à 2 cm de profondeur
- Support mortier ou béton pour pose flottante des parquets contrecollés et revêtements de sol à placage bois : < 4,5 % mesurée à 4 cm de profondeur
- Chape fluide à base de sulfate de calcium : < 0,5 %
- Support pour revêtement de sols textiles : < 4,5 %
- Support à base de liants hydrauliques pour revêtement de sols souples : < 4 % mesurée à 4 cm de profondeur minimum
- Support mortier ou béton pour sols plastiques : < 3 %

METHODE DE LA PESEE

Cette méthode est préconisée à une seule reprise pour mesurer la teneur en eau du support en mortier ou en béton pour le revêtement de sols plastiques : < 3 %

L'humidimètre à pointe ainsi que la bombe au carbure sont également préconisés.

2.4.3.2. Préconisations par métiers

PEINTRES EN BATIMENT

Les DTU concernant ces métiers sont les suivants : DTU 59.1, DTU 59.3 et DTU 59.4.

La teneur en eau du support doit être vérifiée avant pose de peinture ou de papier-peint. Le seuil de teneur en eau dépend du matériau de support. Maçonneries en bloc, plâtres < 5 %, béton cellulaire < 10 %, pierres < 8 %, fibres-ciments < 15 %, bois de 18 à 10 % suivant environnement humide ou sec.

Les méthodes de mesure sont l'humidimètre à pointes pour le bois, et les deux types d'humidimètre pour les maçonneries en bloc, plâtres. Les autres matériaux n'ont pas de matériels préconisés.

Les peintres en bâtiment peuvent également être amenés à effectuer des ravalements de façade. Un DTU est consacré à ces travaux : le DTU 42.1. Il est préconisé dans ce DTU d'avoir une humidité du support < 5 % en masse et d'avoir un produit de surfaçage avec une humidité < 5 % en masse. La méthode de mesure n'est pas indiquée. Il faut également que le mastic et le produit de calfeutrement soit sec au toucher.

CARRELEURS

Un DTU concerne les carreleurs, le DTU 52.2 sur la pose collée des revêtements en céramique. Il est indiqué que le support plâtre doit être ≤ 5 % en masse. La méthode de mesure n'est pas indiquée.

POSEURS REVETEMENTS DE SOL INTERIEURS

De nombreux DTU concernent les revêtements de sol intérieurs.

Parquets : DTU 51.1 ; 51.2 : 51.11 ; 51.3

Le taux d'humidité du support est à mesurer et varie suivant le type de parquet. La méthode de mesure est toujours spécifiée.

Pour les chapes fluides à base de sulfate de calcium ainsi que les supports mortiers ou bétons, la bombe à carbure doit être utilisée. Pour les chapes, la teneur en eau doit être ≤ 0,5 % en masse. La profondeur de mesure est de l'épaisseur de la chape. Pour les supports mortiers ou bétons pour les parquets à clouer, la teneur en eau doit être ≤ 3 % en masse et la profondeur de mesure est de 2 cm de

profondeur. Pour les supports bétons pour les parquets à coller, la teneur en eau doit également être ≤ 3 % en masse, mais cette fois-ci la profondeur de mesure est de 4 cm de profondeur.

Pour les supports en bois pour les parquets à coller, la teneur en eau doit être de 12 % et est estimée avec un humidimètre à pointe.

Revêtements de sols : DTU 53.1 ; DTU 53.2 ; CPT 3635 V2 ; CPT 3642 V2 ; CPT 3774 V3 ; CPT 3703 ; CPT 3716 ; CPT 3788 ; CPT 3527

La teneur en eau du support est à mesurer avant la pose. La méthode utilisée est la bombe à carbure. Pour les supports à base de liants ciments, la teneur en eau doit être ≤ 4,5 %. Pour les supports mortiers ou bétons pour les sols plastiques, la teneur en eau doit être ≤ 3 %. Enfin, pour les chapes fluides à base de sulfate de calcium, la teneur en eau doit être ≤ 0,5 %.

PLATRIERS-PLAQUISTES

Les DTU concernant ces métiers sont les suivants : DTU 25.1 ; DTU 58.2

Des recommandations sont données pour

- Les enduits intérieurs en plaques de plâtre qui ne doivent pas dépasser 10 % en masse.
- Les enduits plâtres et mortiers pour les plafonds tendus qui ne doivent pas dépasser 5 % en masse. La méthode à utiliser est l'humidimètre de surface.

ÉTANCHEISTES / COUVREURS ETANCHEURS

Le DTU concernant ces métiers est le suivant : DTU 40.14 qui concerne les supports de couverture en panneaux dérivés du bois. Les humidimètres à pointe sont à utiliser et les teneurs en eau maximales à avoir sont les suivantes : 18 % pour les panneaux de contreplaqué, 22 % pour les panneaux de contreplaqué ignifugés de classement M.1 ou M.2 de réaction au feu, 16 % pour les panneaux de particules, 20 % pour les panneaux de particules ignifugés de classement M.1 ou M.2 de réaction au feu

MENUISIERS

Le DTU concernant ce métier est le suivant : DTU 36.2 qui concerne la fixation des lambris en lames, en panneaux et menuisés. La teneur en eau doit être comprise entre 8 et 14 % et doit être mesurée par un humidimètre à pointe étalonné.

2.4.4. État de l'art sur le diagnostic humidité réalisé par les artisans

Afin de savoir si les artisans concernés sont familiers avec les effets de la teneur en eau des matériaux, les différentes méthodes de mesure et les seuils à ne pas dépasser avant chantier, un entretien a été effectué avec plusieurs artisans. L'entretien réalisé est le suivant :

2.4.4.1. Guide d'entretien

1. Avez-vous connaissance de mesures d'humidité obligatoires à réaliser sur les supports de vos ouvrages, et encadrées par des textes de référence (DTU, CPT, etc.) ?

2. Réalisez-vous systématiquement ces relevés d'humidité pré intervention ?

3. Effectuez-vous systématiquement ces relevés de manière quantitative ou vous basez-vous sur votre expérience ?
    - Toujours basé sur l'expérience
    - Souvent basé sur l'expérience, parfois par mesure
    - Souvent basé sur la mesure, parfois sur l'expérience
    - Toujours réalisé par mesure

4. Savez-vous avec quel type d'appareil vous réalisez vos mesures ?
    - Humidimètre capacitif de surface
    - Humidimètre résistif à pointe
    - Humidimètre à micro-ondes (Trotec T610, autre ?)
    - Bombe à carbure
    - Autre : …

5. Sinon, quelle est la marque et le modèle de l'appareil ?

6. Votre matériel est-il étalonné régulièrement ?
    - Jamais
    - Tous les 5 ans minimum
    - Tous les 2 ans minimum

7. Réalisez-vous un échantillonnage sur plusieurs points ?

8. Réalisez-vous en même temps une mesure de l'humidité et de la température intérieure ?

9. Connaissez-vous les impacts que peut avoir un excès d'humidité sur vos ouvrages ?

10. Utiliser vous un logiciel de calcul d'humidité ou d'hydrothermie ?
    - OUI → Lequel ? ……
    - NON

11. Dans le cas contraire seriez-vous intéressé par l'utilisation d'un logiciel ?

2.4.4.1. Restitution des entretiens

Entreprise	Connaissance des mesures d'humidité obligatoires encadrées par des textes de référence	Réalisation systématique de relevés d'humidité pré-intervention	Relevés de matière quantitative systématiquement ou basés sur l'expérience	Type d'appareil de mesure utilisé	Marque de l'appareil	Étalonnage de l'appareil	Echantillonnage sur plusieurs points	Mesure de HR et T intérieures	Connaissance des impacts d'un excès d'humidité sur ouvrage
Peintre									
1	Oui	Non	Souvent basé sur la mesure, parfois par l'expérience	Humidimètre		Jamais	Oui	Oui	Oui
2	Oui	Non	Souvent basé sur l'expérience, parfois par la mesure	Humidimètre résistif à pointe		Tous les 5 ans	Oui	Oui	Oui
3	Oui	Oui	Souvent basé sur la mesure, parfois par l'expérience	Humidimètre résistif à pointe		Tous les 5 ans minimum	Oui	Non	Oui
Carreleur									
1	Oui	Non	Souvent basé sur l'expérience, parfois par mesure	Humidimètre résistif à pointe		Jamais	Oui	Oui	Oui
2	Oui	Oui	Souvent basé sur l'expérience, parfois par mesure	Humidimètre capacitif de surface			Oui	Non	Oui
3	Oui	Oui	Souvent basé sur l'expérience, parfois par mesure	Humidimètre résistif à pointe	Stanley	Tous les 5 ans	Non	Oui	Oui
4	Oui	Non	Toujours réalisé par mesure	Humidimètre résistif à pointe	Stanley	Tous les 5 ans minimum	Oui	Non	Oui
Poseur revêtement sol									
1	Oui	Oui	Toujours basé sur l'expérience	Humidimètre capacitif de surface	Romus VI-D4	Jamais	Oui	Non	Oui
2	Oui	Oui	Toujours réalisé par mesure	Bombe à carbure		Tous les 2 ans minimum	Oui	Oui	Oui
Plâtrier - plaquiste									
1	Oui	Non	Souvent basé sur l'expérience, parfois par mesure	Humidimètre résistif à pointe		Jamais	Oui	Non	Oui
2	Oui	Non	Toujours basé sur l'expérience				Non	Non	Oui
3	Non	Non	Toujours basé sur l'expérience (intéressé pour utiliser humidimètre pour pour être tenu au courant des textes)					Non	Oui
Menuisiers									
1	Oui	Non	Souvent basé sur l'expérience, parfois par mesure	Humidimètre résistif à pointe		Jamais	Oui	Non	Oui
2	Oui	Non	Toujours basé sur l'expérience						Oui
3	Non	Non	Toujours basé sur l'expérience						Non

2.4.4.2. Enseignements à retenir

La grande majorité des artisans questionnés ont connaissance des mesures d'humidité obligatoires ainsi que des impacts possibles sur un ouvrage dû à un excès d'humidité. Les textes de références remplissent donc leur fonction en ce sens. Cependant, un relevé d'humidité n'est pas systématiquement effectué avant une intervention, même pour ceux dont les textes l'exigent.

Sur chantier, les artisans se basent à la fois sur leur expérience et sur la mesure. Il est à noter que les métiers pour ceux dont un relevé est exigé : peintre, poseur de sol, carreleur... un relevé quantitatif est dans 25 % des cas utilisé. Sinon, dans 40 % des cas, le relevé de l'humidité est souvent basé sur l'expérience et quelque fois sur la mesure. Et dans 33 % des cas, le relevé d'humidité est seulement basé sur l'expérience.

L'humidimètre résistif à pointe est l'appareil de mesure le plus représenté lors de ce questionnaire, même si les textes de références indiquent l'utilisation de l'humidimètre principalement pour le bois et ses dérivés. La bombe à carbure, bien que souvent indiquée dans les normes, a été énoncée à une seule reprise lors des entretiens. Pour ce qui est de la précision des mesures, l'étalonnage des appareils est fait tous les 5 ans, voire jamais pour certains. La précision des mesures et l'incertitude devra être prise en compte. Toutefois, ils sont 80 % à faire un échantillonnage de points, et ne se limitent pas à une seule mesure.

Les données d'entrées (humidité intérieure et température) sont très peu relevées sur site. Ces données n'ont pas l'obligation d'être relevé et certains artisans n'y voit pas trop l'intérêt.

2.4.5. Fiabilité de la mesure par les différents appareils

De nombreux appareils peuvent être utilisés in-situ pour mesurer la teneur en eau des matériaux, et il n'est pas aisé de choisir l'appareil approprié et d'interpréter la donnée qui est mesurée. Dans le cadre du projet Smart Réno, une comparaison de différents appareils de mesure de la teneur en eau des matériaux a été effectuée. Le choix des appareils testés a été fait afin de comparer différentes méthodes de mesure et différentes gammes de prix d'appareils.

2.4.5.1. Matériel et méthode de mesure

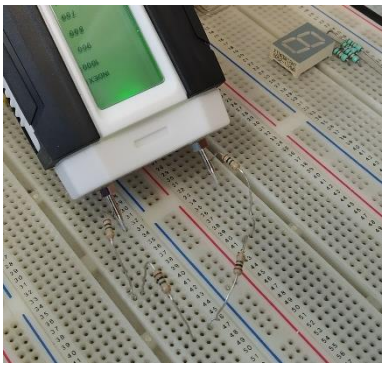
Les appareils qui ont été testés dans le cadre du projet sont recensés dans le tableur suivant :

Appareil	Méthode	Marque / Modèle	Photo
Humidimètre	Résistive Capacitive	Protimeter MMS2	
Humidimètre	Résistive Capacitive	Protimeter SurveyMaster BLD5365	

Humidimètre	Résistive Capacitive	Dr Meter MKL-W01	
Humidimètre	Résistive	Testo 606-2	
Humidimètre	Résistive	LaserLiner DampFinder Compact	
Humidimètre	Capacitive	Voltcraft MF-100	
Humidimètre	Capacitive	Blet Measurement HUMA7-MH00AAA	
Bombe à carbure	Réaction chimique carbure de calcium et eau	Trotec coffret bombe à carbure CM classic	

Deux méthodes ont été utilisées pour comparer les appareils de mesure.

La première méthode concerne seulement les humidimètres à pointe. Des mesures ont été effectuées en plaçant entre les deux pointes des humidimètres, des résistances électriques connues. Il est possible alors, en fonction de la résistance électrique imposée entre les deux pointes d'enregistrer la teneur en eau qui est donnée par l'appareil. Les courbes de calibration peuvent ainsi être déterminées, et comparées suivant les humidimètres et les modes de mesure.



La deuxième méthode concerne l'ensemble des appareils de mesure. Des mesures sont effectuées sur différents échantillons mis en équilibre dans des solutions salines. Les matériaux utilisés pour les essais sont du bois résineux, du bois feuillus, du béton cellulaire, du plâtre, de la pierre tendre, du pisé et de

la fibre de bois. Plusieurs échantillons de ces différents matériaux ont tout d'abord été mis en étuve afin de pouvoir mesurer leurs masses anhydres. Ensuite, ces échantillons sont placés en solutions salines qui imposent une humidité relative de 75 % et de 98 %. Il est possible alors de tester les appareils sur différents matériaux de différentes teneurs en eau.

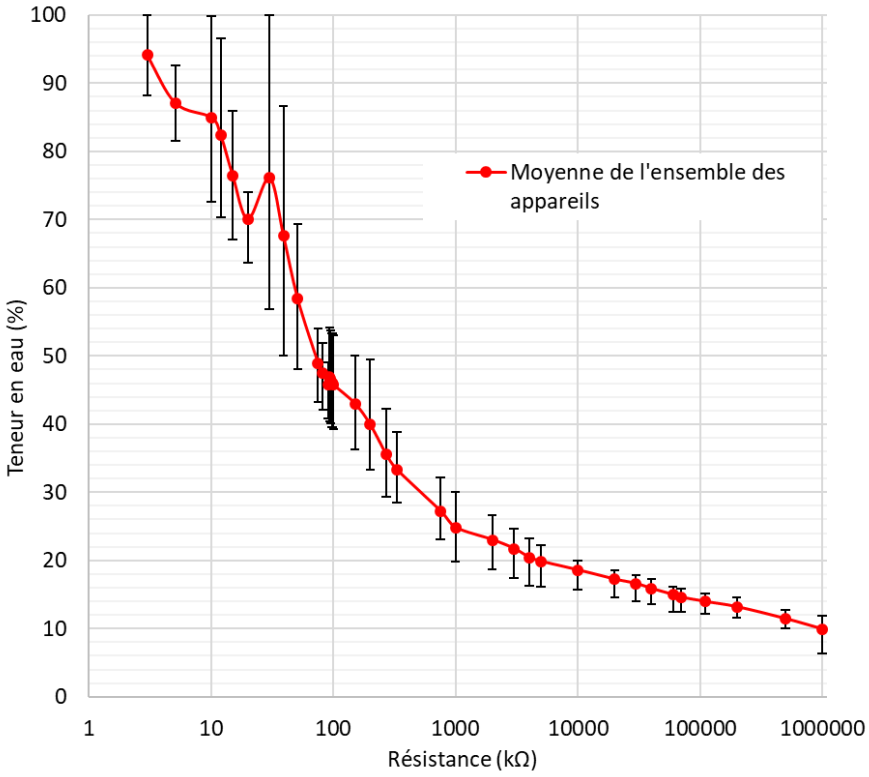
Enfin, un dernier test a été effectué avec la bombe à carbure pour du pisé en équilibre à 75 %.

2.4.5.2. Résultats

COMPARAISON DES HUMIDIMETRES A POINTE A PARTIR DES RESISTANCES ELECTRIQUES CONNUES

Les appareils de mesure disposent de différents modes de mesures résistives. Des modes sont conçus pour le matériau bois et d'autres sont consacrés aux matériaux de construction. Une première comparaison est faite pour l'ensemble des mesures résistives conçues pour le bois. Les modes suivants sont alors sélectionnés pour chaque appareil :

- LaserLiner DampFinder compact : Mode A
- LaserLiner DampFinder compact : Mode B
- Protimeter MMS2 : Chêne Europe
- Protimeter MMS2 : Sapin Douglas
- Dr Meter MKL-W01 : Mode WOOD
- Protimeter SurvayMaster
- Testo 606-2 : Mode 1
- Testo 606-2 : Mode 2



La courbe rouge représente la moyenne de l'ensemble des mesures effectuées. Les barres d'erreurs verticales représentent les valeurs maximales obtenues pour les barres supérieures et les valeurs minimales pour les barres inférieures.

Suivant les résistances mesurées, les réponses des humidimètres à pointe peuvent être similaires, ou très éloignées.

Pour de fortes résistances électriques, les réponses des humidimètres sont assez proches. Pour une résistance électrique comprise entre 10 000 kΩ et 1 000 000 kΩ, une différence de teneur en eau mesurée comprise entre 4 % et 2,5 % peut être obtenue. Ces résistances sont pour des teneurs en eau du bois comprises entre 10 % et 20 %, soit dans des conditions pérennes pour ce matériau.

Pour une plus faible résistance électrique, de 100 kΩ à 10 000 kΩ la différence de teneur en eau mesurée varie entre 6 % et 14 %. Ces résistances sont pour des teneurs en eau du bois comprises entre 20 % et 50 %, soit dans des conditions à risque pour ce matériau.

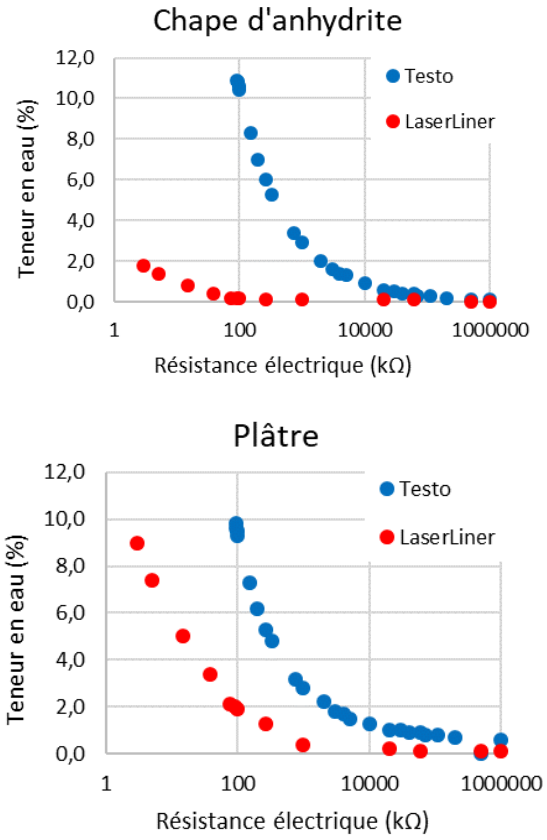
Pour de faibles résistances électriques, sous un seuil de 100 kΩ, les mesures obtenues pour les différents appareils varient de 10 % à 40 % de teneur en eau. Ces résistances sont pour des teneurs en eau du bois élevées, au-delà de 50 %.

L'obtention d'une teneur en eau précise du bois est réalisable avec ces appareils lorsque le bois est sec à l'air. En revanche, lorsque la teneur en eau du bois est supérieure à 20 %, il est difficile d'obtenir une teneur en eau précise.

Pour conclure sur ces mesures, l'ensemble de ces appareils peuvent être utilisés pour déterminer si le bois est humide (teneur en eau supérieure à 20 %) et la zone à risque.

Deux de ces appareils résistifs possèdent également des modes afin de mesurer la teneur en eau d'autres matériaux de construction. Il s'agit du Testo 606-2 ainsi que du LaserLiner DampFinder compact.

Les figures ci-dessous illustrent les résultats obtenus par les mesures des résistances pour la chape anhydrite et le plâtre. La différence obtenue entre les deux appareils de mesure est importante. Pour une résistance de 1000 kΩ, la teneur en eau de la chape anhydrite est de 2,9 % pour l'appareil Testo, et de 0,1 % pour le LaserLiner. À 1000 kΩ, la teneur en eau du plâtre est de 2,8 % pour l'appareil Testo, et de 0,4 % pour le LaserLiner. Il est ainsi impossible de tirer une conclusion sur la teneur en eau de ces matériaux à partir de ces appareils. Les résultats donnés sont donc à prendre avec beaucoup de précaution.



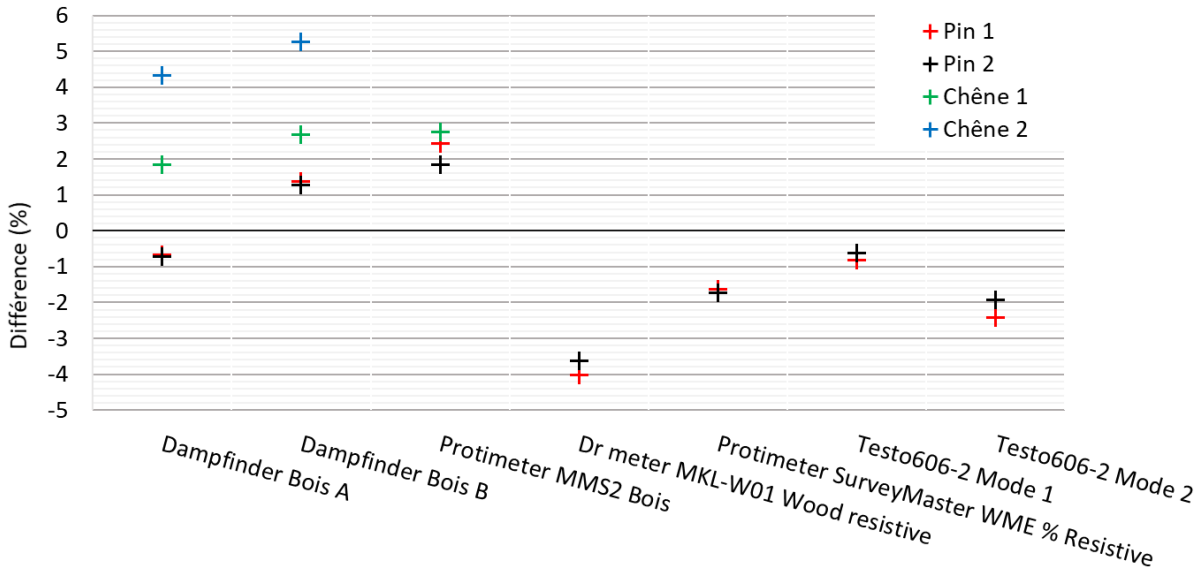
COMPARAISON DES HUMIDIMETRES SUR DES ECHANTILLONS CONNUS

Les résultats des mesures effectuées sur les différents échantillons sont classés en deux catégories. Une première catégorie pour le matériau bois, et une deuxième catégorie pour les autres matériaux de construction.

MESURES EFFECTUEES SUR LES ECHANTILLONS DE BOIS

Au total, 8 échantillons de bois ont été utilisés pour cette expérimentation. Deux échantillons de pin et deux de chêne ont été placés dans une solution saline à 75 %, et deux autres échantillons de pin et deux autres de chêne ont été placés dans une solution saline à 98 %. À 75 %, les teneurs en eau des échantillons varient entre 11,5 % et 8,5 %, et à 98 % les teneurs en eau des échantillons varient entre 23 % et 16 %.

Une mesure de teneur en eau a été effectuée pour les 4 échantillons placés à 75 % avec les modes bois des appareils. La différence entre la teneur en eau mesurée et la teneur en eau réelle est représentée pour chaque appareil et chaque échantillon sur la figure suivante.

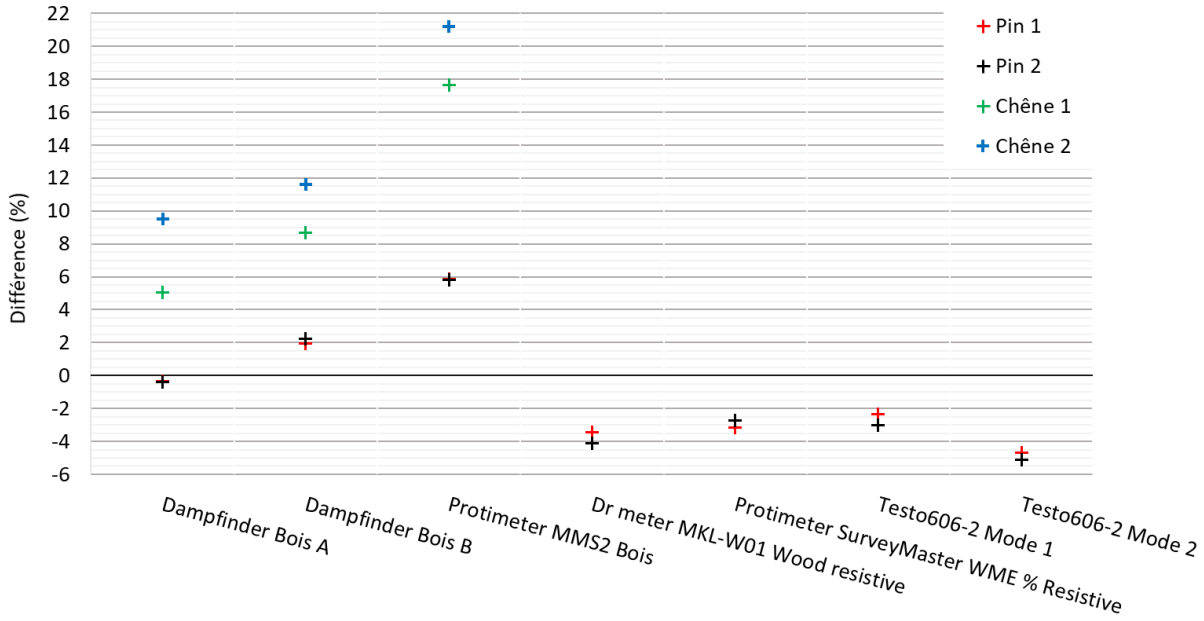


Différences obtenues entre les teneurs en eau mesurées et les teneurs en eau réelles des échantillons de bois en équilibre dans des conditions à 75 % d'humidité relative.

La plupart des différences obtenues pour le pin sont comprises entre -2 % et 2 %. Une valeur mesurée se trouve à -4 % de la valeur réelle. Ceci rejoint les résultats obtenus avec les résistances électriques pour l'appareil Dr Meter MKL-W01. La barre inférieure obtenue pour une résistance de 1 000 000 kΩ est le résultat de cet appareil. Les données mesurées pour le pin pour cette plage de teneur en eau sont plutôt satisfaisantes.

Les résultats pour le bois de chêne sont plus éloignés de la valeur réelle. Les données mesurées sont plus élevées de 2 % à 5 %. En revanche, dans cette plage de mesure, les résultats restent fiables dans le sens où un risque d'humidité n'est pas détecté.

En suivant le même protocole que pour les échantillons placés dans un environnement à 75 %, une mesure de teneur en eau a été effectuée pour les 4 échantillons placés à 98 % avec les modes bois des appareils. La différence entre la teneur en eau mesurée et la teneur en eau réelle est représentée pour chaque appareil et chaque échantillon sur la figure suivante.



Différences obtenues entre les teneurs en eau mesurées et les teneurs en eau réelles des échantillons de bois en équilibre dans des conditions à 98 % d'humidité relative.

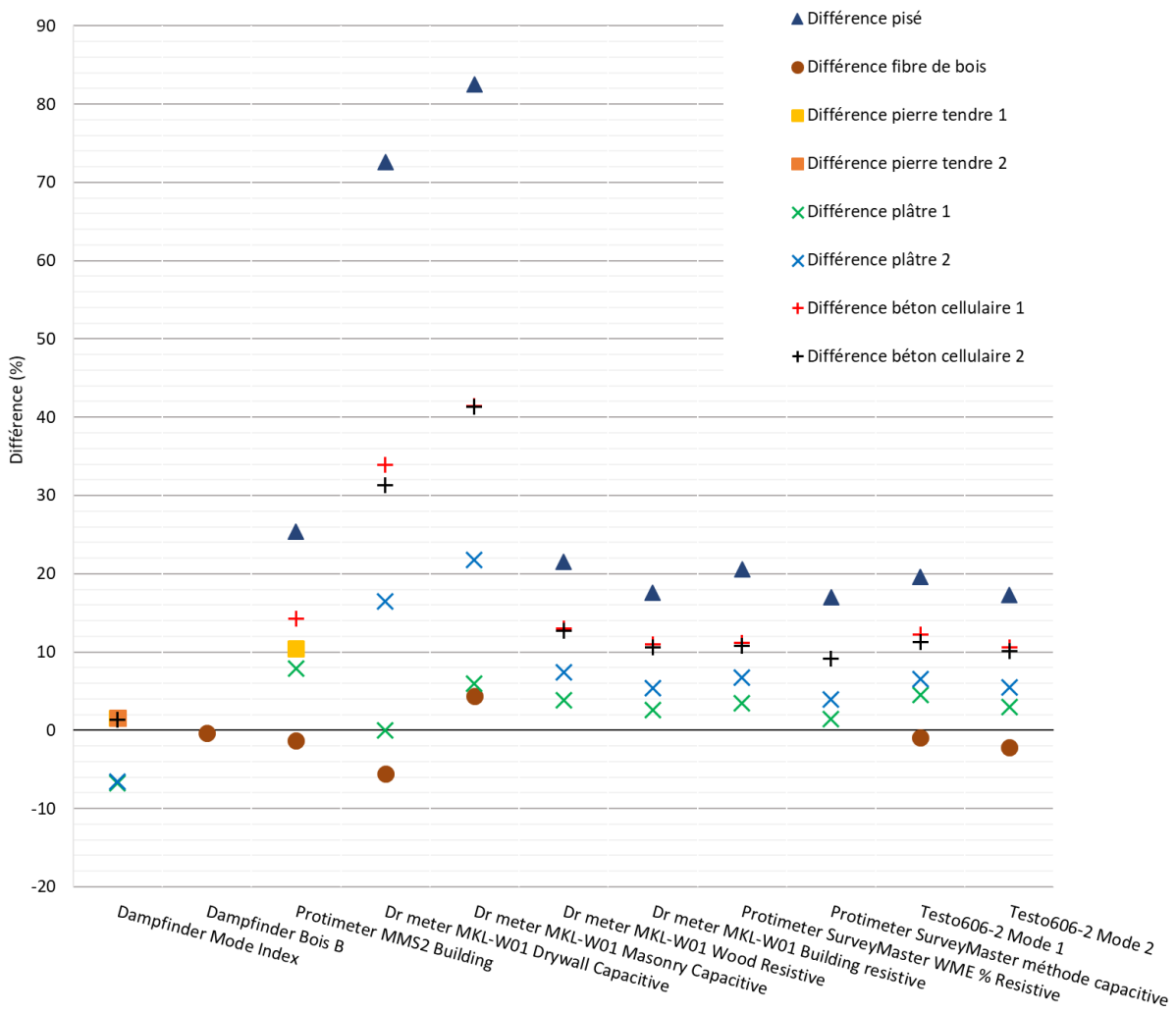
Pour des teneurs en eau plus élevées des échantillons de bois, les différences entre les mesures effectuées à partir des humidimètres et les valeurs réelles sont plus élevées. Pour le pin, les différences entre la teneur en eau mesurée et la teneur en eau réelle varient entre -5 % et 6 %. La fiabilité de la mesure est alors moindre que pour un échantillon plus sec. En effet, dans ces conditions, le bois est considéré humide. Les teneurs en eau mesurées sont la plupart du temps plus faibles que la teneur en eau réelle, ce qui limite l'appréhension du risque. Ces résultats ne sont donc pas fiables et la mesure effectuée mérite d'être plus proche de la réalité. Pour les échantillons de chêne, les mesures effectuées sont plus élevées de 4 % à 20 % que la teneur en eau réelle. Il est intéressant de noter ici que ces échantillons sont restés un certain temps dans une solution à 98 % d'humidité relative, et de la moisissure s'est créée sur les échantillons de chêne. Les grandes différences obtenues sont alors cette fois-ci le résultat de la moisissure présente sur l'échantillon.

MESURES EFFECTUEES SUR LES AUTRES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

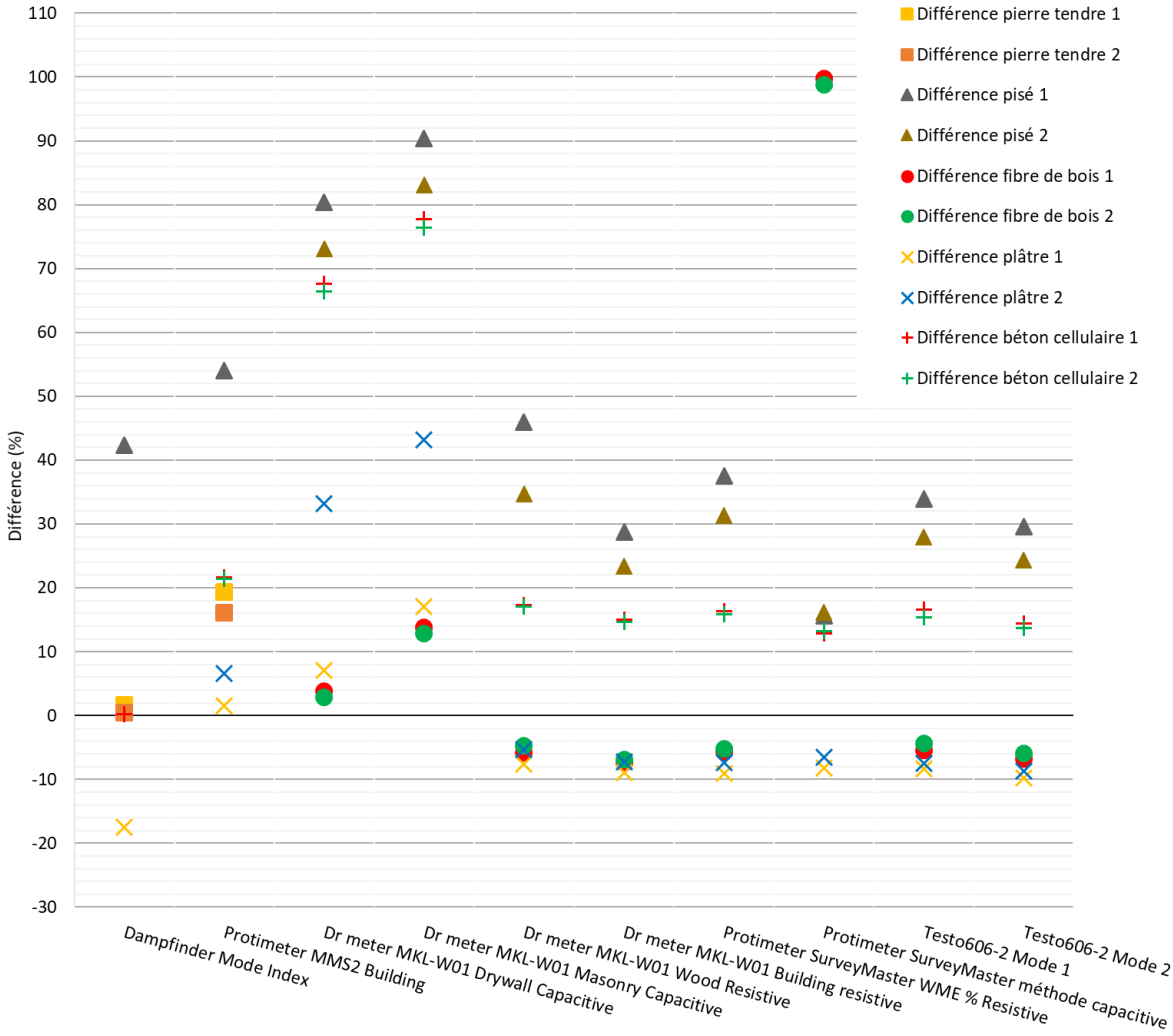
En suivant le même protocole que pour les échantillons de bois, des échantillons de plusieurs matériaux de construction, de la pierre tendre, du plâtre, du béton cellulaire, du pisé, de la fibre de bois ont été placés dans des solutions salines à 75 % d'humidité relative et à 98 % d'humidité relative.

D'autres modes de mesure ont été sélectionnés sur les appareils, adaptés pour les matériaux de construction.

Les différences obtenues entre les valeurs mesurées pour les échantillons en équilibre à 75 % et à 98 % et les teneurs en eau réelles sont présentées sur les figures ci-dessous.



Différences obtenues entre les teneurs en eau mesurées et les teneurs en eau réelles des échantillons de matériaux de construction en équilibre dans des conditions à 75 % d'humidité relative.



Différences obtenues entre les teneurs en eau mesurées et les teneurs en eau réelles des échantillons de matériaux de construction en équilibre dans des conditions à 98 % d'humidité relative.

Les différences obtenues entre les teneurs en eau mesurées et les teneurs en eau réelles sont très élevées. Il n'est pas possible à partir de ces humidimètres de mesurer une teneur en eau réelle des matériaux de construction. La plupart des appareils sont calibrés pour le matériau bois, et donnent seulement une indication sur le taux d'humidité, élevé ou non, des autres matériaux de construction. Certains appareils sont calibrés pour d'autres matériaux tel que le DampFinder de chez LaserLiner. À partir de la donnée mesurée par le mode Index, il est possible à partir d'un tableau de conversion de retrouver la teneur en eau réelle de certains matériaux de construction. Les données mesurées ainsi pour cet appareil restent plutôt proches de la réalité par rapport aux autres appareils de mesure. En revanche, il existe très peu d'appareils qui disposent de cette fonctionnalité, et comme nous pouvons le voir sur les échantillons de plâtre, ou de pisé, les teneurs en eau mesurées peuvent tout de même être éloignées de la réalité.

UTILISATION DE LA BOMBE A CARBURE

La bombe à carbure a été testée pour mesurer la teneur en eau d'un échantillon de pisé en équilibre à 75 % d'humidité relative. La teneur en eau réelle de cet échantillon est de 1,56 % et la teneur en eau mesurée avec la bombe à carbure est de 1,45 %. Le résultat obtenu est fiable, et cette méthode permet d'obtenir une teneur en eau précise de ce matériau. Elle a en revanche quelques inconvénients pour être utilisée in-situ. Elle ne peut pas être utilisée pour l'ensemble des matériaux de construction, car il est nécessaire de réduire en poudre le matériau pour obtenir sa teneur en eau. Ensuite, cette méthode a l'inconvénient d'être destructive. Un morceau d'échantillon doit être récupéré pour obtenir sa teneur en eau.

2.4.5.3. Conclusions

Plusieurs appareils de mesure existent aujourd'hui pour mesurer la teneur en eau des matériaux de construction in-situ. Les humidimètres, à pointe ou de surface, sont les appareils que l'on retrouve le plus fréquemment. Ces appareils permettent de réaliser deux types de mesure sur les matériaux. Une mesure résistive et une mesure capacitive pour lesquelles sont respectivement mesurées la résistance électrique et la permittivité diélectrique des matériaux qui varient en fonction de leurs teneurs en eau. Ces appareils ont plusieurs inconvénients. D'une part, la profondeur de mesure est généralement assez faible (jusque 4 cm de profondeur), et une petite partie de la paroi seulement est mesurée. D'autre part, ces appareils sont calibrés pour très peu de matériaux de construction. Souvent, des courbes de calibration sont renseignées dans ces appareils pour le bois, mais pas pour les autres matériaux. Un mode général peut exister pour les autres matériaux, et une indication de l'humidité de ces matériaux est donnée et non une teneur en eau réelle. Pour finir, la précision de ces appareils diminue lorsque les matériaux sont humides. Ces appareils sont ainsi plutôt utilisés pour réaliser une cartographie de l'humidité de la paroi, afin de déterminer où se trouve la zone la plus humide. Si des mesures de teneur en eau réelle sont nécessaires, il faut alors privilégier d'autres appareils de mesure. Pour cela, la bombe à carbure existe et peut être utilisée in-situ. Cette méthode a l'avantage d'être très précise, mais n'est pas adaptée pour l'ensemble des matériaux de construction. Elle est principalement utilisée pour les supports mortiers ou bétons et les chapes fluides.

2.4.6. Etapes pour réaliser un diagnostic humidité

Différentes étapes sont à suivre afin de réaliser un diagnostic humidité de la paroi avant sa rénovation.

Une première inspection visuelle peut être réalisée afin de percevoir toute présence de forte humidité dans la paroi. Cette inspection comprend la visualisation de taches noires ou vertes sur les murs, de champignons sur les bois, d'efflorescences salines sur les murs qui se traduisent par des petites taches blanches. Ceci comprend également la visualisation de cloques au niveau des parois, d'effritement de l'enduit ou du plâtre et de gonflement au niveau des revêtements. Cette première inspection visuelle permet de prendre connaissance du bâtiment et de son niveau d'humidité.

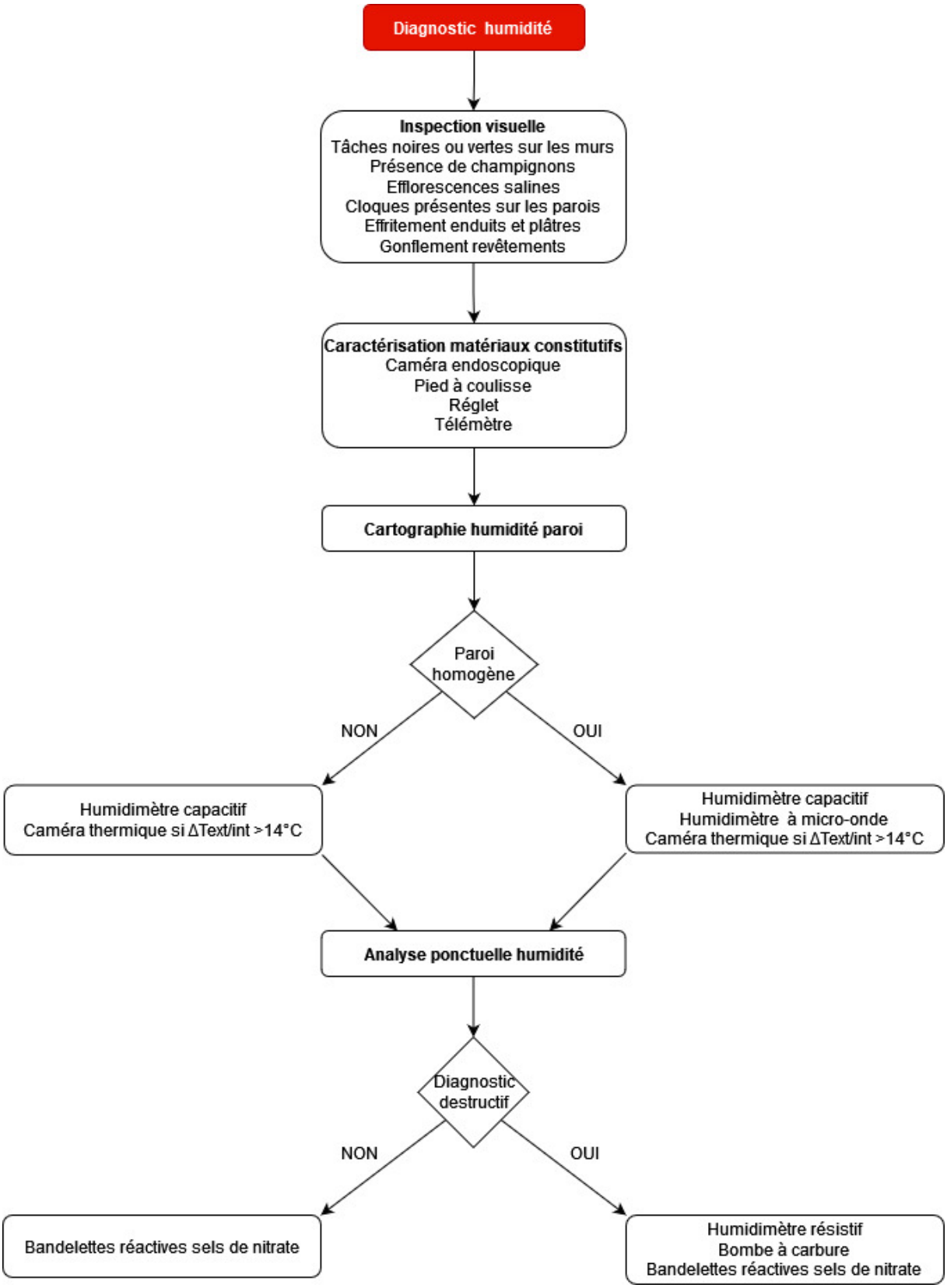
Dans un second temps, une analyse des matériaux constitutifs de la paroi est à réaliser. La caractérisation des matériaux, et de leur épaisseur, permettra de s'assurer du bon diagnostic à réaliser par la suite. En plus de cela, si une simulation est à réaliser avant rénovation, cela permettre de connaître la géométrie exacte de la paroi. Cette analyse des matériaux constitutifs de la paroi, peut être faite avec différents appareils de mesure : une caméra endoscopique, un pied à coulisse, un réglet

et encore un télémètre. La caractérisation des matériaux peut également se faire avec les fiches matériaux renseignées dans ce livrable Smart Réno.

Par la suite, une cartographie de l'humidité des parois peut être réalisée avec différents appareils de mesure. Cette cartographie permet de mieux discerner l'emplacement de forts taux d'humidité dans la paroi lorsque celle-ci n'est pas visible, et de quantifier ce taux d'humidité. L'appareil choisi dépend des matériaux de la paroi et de leur épaisseur, ce qui a pu être déterminé lors de l'étape précédente. Les humidimètres ont une portée plus ou moins importante suivant leur technologie. Pour les humidimètres capacitifs, la mesure peut s'effectuer jusque 40 – 50 mm de profondeur maximum suivant les appareils. Pour les humidimètres à micro-onde, la portée de la mesure va jusque 300 mm de profondeur maximum. Ainsi, en fonction de l'homogénéité de la paroi, le choix de l'appareil va plutôt se porter sur la méthode capacitive ou la méthode micro-onde. Il est important de se rappeler que ce diagnostic non destructif de l'humidité, va surtout nous permettre d'obtenir une comparaison relative du taux d'humidité dans les parois. Il est difficile d'obtenir la teneur en eau exacte des matériaux. Les différents points de mesure doivent alors impérativement s'effectuer sur des zones similaires (même matériau de même épaisseur), pour faire une analyse comparative. Un autre appareil peut également être utilisé pour ce diagnostic humidité, une caméra thermique, qui capte le rayonnement infrarouge. La présence d'un fort taux d'humidité va modifier la température de la paroi et pourra être visualisée via la caméra thermique.

Enfin, une mesure ponctuelle et plus précise de l'humidité peut être faite. Pour cela la question de la possibilité d'un diagnostic destructif est à se poser. Lorsque ce diagnostic destructif n'est pas envisageable, seules les bandelettes réactives au nitrate pourront être utilisées pour analyser la présence efflorescences salines lorsque celle-ci n'est pas visible. Si le diagnostic destructif peut être effectué, d'autres appareils peuvent être utilisés. Notamment l'humidimètre résistif, qui permet de réaliser une mesure de la résistance électrique entre les deux pointes de l'appareil. Cet appareil à l'avantage de pouvoir réaliser une mesure sur un point précis, et suivant le modèle de l'humidimètre, différentes courbes de calibration sont renseignées pour ainsi relier la résistance électrique du matériau à sa teneur en eau réelle. La mesure avec l'humidimètre résistif s'effectue au niveau de la profondeur des pointes. Une bombe à carbure peut également être utilisée. Cette mesure est chimique et s'effectue sur un échantillon de matériau recueilli sur la paroi. Elle est principalement recommandée pour des supports mortiers ou bétons, et des chapes fluides à base de sulfate de calcium. Le matériau doit pouvoir se broyer pour son utilisation.

Une arborescence reprenant l'ensemble des éléments décrits ci-dessus est ajoutée ci-dessous.


Diagnostic humidité
Inspection visuelle
Tâches noires ou vertes sur les murs
Présence de champignons
Efflorescences salines
Cloques présentes sur les parois
Effritement enduits et plâtres
Gonflement revêtements
Caractérisation matériaux constitutifs
Caméra endoscopique
Pied à coulisse
Réglet
Télémètre
Cartographie humidité paroi
Paroi homogène
NON
OUI
Humidimètre capacitif
Caméra thermique si ΔText/int >14°C
Humidimètre capacitif
Humidimètre à micro-onde
Caméra thermique si ΔText/int >14°C
Analyse ponctuelle humidité
Diagnostic destructif
NON
OUI
Bandelettes réactives sels de nitrate
Humidimètre résistif
Bombe à carbure
Bandelettes réactives sels de nitrate

3. Simplification du modèle de transferts couplés de masse et de chaleur

3.1. Contexte et objectifs

La tache 1.6 du projet Smart-Réno a pour objectif de créer des outils et méthodes simplifiés qui permettent d'appréhender le risque hygrothermique dans la conception et l'acte de rénovation du bâti. La simplification concerne plusieurs aspects des évaluations depuis l'accès aux informations utiles (pour reconnaître les matériaux, proposer des conditions initiales et aux limites pertinentes), jusqu'à la simplification des modèles numériques et de leur utilisation. Cette partie du livrable s'intéresse à ce dernier point. Elle décrit comment le modèle complet, à la base des études théoriques menées dans le cadre de la tâche 1.5, a été simplifié dans son contenu. Elle décrit également les éléments de validation qui ont permis de justifier ces simplifications.

Le modèle simplifié finalement retenu a été codé par éléments finis dans une version simplifiée de SYRTHES (le code complet de référence développé par EDF R&D) qui a été livrée à Wigwam pour une prise en main, des tests et des évaluations mi-novembre 2021.

Les simplifications d'usage espérées grâce à ces évolutions sont indiquées en fin de cette partie, qui comportera également quelques pistes de simplifications qui n'ont pas été implémentées pour diverses raisons mais qui pourraient être prises en considération dans une prochaine version de l'outil simplifié.

3.2. Méthodologie d'ensemble pour la simplification

Les simplifications physiques à adopter se justifient a priori par le domaine restreint de la physique qui peut être mobilisé pour des études classiques de parois en situation de rénovation. En effet un modèle complet intègre tous les phénomènes qui peuvent concourir aux transferts couplés de chaleur et de masse. Mais certains de ces phénomènes peuvent ne se manifester que dans des conditions très particulières jamais rencontrés dans les cas considérés ici. Nous pouvons par exemple citer le cas des effets de pression totale. Cette dimension se justifie dans un modèle complet car elle peut être très influente dans certains cas, par exemple dans une configuration d'essai à la coupelle (voir tâche 1.5). Mais dans un cas classique de paroi soumise sur ses deux faces à des conditions hygrothermiques ordinaires, en l'absence de séchage de matériaux hydrauliques, de telles situations semblent a priori exclues et il semble pertinent d'envisager, dans une démarche de simplification, la suppression de cette dimension du modèle complet.

La méthodologie proposée consiste à faire varier (d'un facteur 5 et d'un facteur 0,2) les principaux blocs décrivant le modèle complet (cette notion de bloc sera décrite deux chapitres plus bas) et d'observer l'impact de ces variations sur les résultats calculés dans une configuration réaliste de paroi de bâtiment, intégrant des séquences dynamiques et un matériau très hygroscopique (laine de bois).

Les blocs pour lesquels les variations n'entraîneront qu'un impact très faible sur les résultats seront considérés comme très peu influents et pourront être négligés dans un modèle simplifié.

Cependant, avant de statuer sur la suppression du bloc, une analyse physique des termes composant ce bloc sera menée. Elle vise à identifier s'il n'y a pas dans le bloc concerné, des termes qui pourraient être influents pour d'autres matériaux mais qui sont négligeables pour le matériau (laine de bois) objet des simulations.

A la fin, lorsque tous les blocs effectivement négligeables auront été identifiés et supprimés du modèle, le modèle simplifié obtenu sera testé sur la même séquence et ses résultats seront comparés aux résultats du modèle complet.

3.3. Description du modèle complet et son expression compactée par une écriture par blocs

Le modèle complet intègre trois équations de conservation : la conservation de l'énergie, la conservation de la masse d'eau et la conservation de la masse d'air sec. Chacune de ces équations exprime que la variation dans le temps de la densité volumique de l'entité conservée (énergie, masse d'eau ou masse d'air sec) est égale à la divergence du flux de cette entité (c'est-à-dire en terme plus imagé, à la différence entre les flux entrants et sortants du volume élémentaire).

Nous ne revenons pas ici sur les fastidieux développements qu'il faut consentir pour justifier l'écriture de ces équations (tous les détails figurent dans le document le rapport d'HDR de Thierry Duforestel, « Des transferts couplés de masse et de chaleur à la conception bioclimatique : recherches sur l'efficacité énergétique des bâtiments », Université Claude Bernard Lyon I, 2015). Nous nous contentons d'en donner ici l'écriture finale.

L'équation de conservation de l'énergie :

$$(\rho_s C_s + \tau_v C_l - \tau_v h_p + \varepsilon\rho_v\left(C_l + \frac{dL(T)}{dT}\right) + \varepsilon\rho_{as}C_{pas} - (L(T) + h^m)\left(\frac{\beta_p p_v}{\rho_l r_v T} + \frac{\varepsilon p_v}{r_v T^2}\right) + \frac{p_t\beta_p}{\rho_l})\frac{dT}{dt}$$
$$+ \left(-\tau_v h_T + (L(T) + h^m)\left(-\frac{p_v\alpha_T}{\rho_l r_v T} + \frac{\varepsilon}{r_v T}\right) + \frac{p_t\alpha_T}{\rho_l}\right)\frac{dp_v}{dt} - \varepsilon\frac{dp_t}{dt}$$
$$= \vec{\nabla}.(\lambda^*\,\vec{\nabla}T + (L(T) + h^m)\left(\frac{\pi_v^*}{p_t}\right)\vec{\nabla}p_v + (L(T) + h^m)(\omega_{mv}K_t - \frac{\pi_v^* p_v}{p_t^2})\vec{\nabla}p_t$$

L'équation de conservation de la masse d'eau.

$$\left(\beta_p - \frac{\varepsilon p_v}{r_v T^2}\right)\frac{dT}{dt} + \left(\alpha + \frac{\varepsilon}{r_v T}\right)\frac{dp_v}{dt}$$
$$= \vec{\nabla}.(K_l\rho_l(r_v \ln\left(\frac{p_v}{p_{sat}(T)}\right) - \frac{L(T)}{T})\,\vec{\nabla}T + \left(\frac{\pi_v^*}{p_t} + K_l\frac{\rho_l r_v T}{p_v}\right)\vec{\nabla}p_v + (\omega_{mv}K_t - \frac{\pi_v^* p_v}{p_t^2})\vec{\nabla}p_t$$

L'équation de conservation de la masse d'air sec.

$$-\frac{p_t - p_v}{r_{as}T}\left(\frac{\beta_p}{\rho_l} + \frac{\varepsilon}{T}\right)\frac{dT}{dt} - \frac{1}{r_{as}T}\left(\frac{\alpha_T(p_t - p_v)}{\rho_l} + \varepsilon\right)\frac{dp_v}{dt} + \frac{\varepsilon}{r_{as}T}\frac{dp_t}{dt}$$
$$= \vec{\nabla}.(\left(-\frac{\pi_v^* M_{as}}{p_t M_v}\right)\vec{\nabla}p_v + (\rho_{as}\frac{Kk_{rg}}{\eta_t} - \frac{\pi_v^* p_v M_{as}}{p_t^2 M_v})\vec{\nabla}p_t$$

On peut constater que formellement, toutes les équations présentent une structure identique. Elles utilisent 3 potentiels (Température, Pression partielle de vapeur et Pression totale de la phase gazeuse). Les membres de gauche contiennent une combinaison linéaire des dérivées temporelles de ces potentiels. Les membres de droite contiennent la divergence d'une combinaison linéaire des gradients de ces potentiels.

On peut ainsi exprimer une vision plus compacte des 3 équations de conservation avec une notation pratique qui permet de situer la position de chaque terme que nous appelons ici « bloc ».

L'équation de conservation de l'énergie

$$A_{Tt}\frac{dT}{dt} + A_{Tv}\frac{dp_v}{dt} + A_{Ta}\frac{dp_t}{dt} = \vec{\nabla}.(B_{Tt}\vec{\nabla}T + B_{Tv}\vec{\nabla}p_v + B_{Ta}\vec{\nabla}p_t)$$

L'équation de la conservation de la masse d'eau

$$A_{Vt}\frac{dT}{dt} + A_{Vv}\frac{dp_v}{dt} = \vec{\nabla}.(B_{Vt}\vec{\nabla}T + B_{Vv}\vec{\nabla}p_v + B_{Va}\vec{\nabla}p_t)$$

L'équation de la conservation de la masse d'air sec

$$A_{At}\frac{dT}{dt} + A_{Av}\frac{dp_v}{dt} + A_{Aa}\frac{dp_t}{dt} = \vec{\nabla}.(B_{Av}\vec{\nabla}p_v + B_{Aa}\vec{\nabla}p_t)$$

Chaque bloc s'écrit X_{Yz} avec la notation suivante :

- X=A s'il est dans le membre de gauche, X=B s'il est dans le membre de droite.
- Y=T s'il s'agit de l'équation de conservation de l'énergie, Y=V s'il s'agit de l'équation de conservation de la masse d'eau, Y=A s'il s'agit de l'équation de conservation de la masse d'air sec.
- z=t si le terme est associé au potentiel Température T, z=v si le terme est associé au potentiel Pression de vapeur Pv, z=a si le terme est associé au potentiel Pression totale Pt.

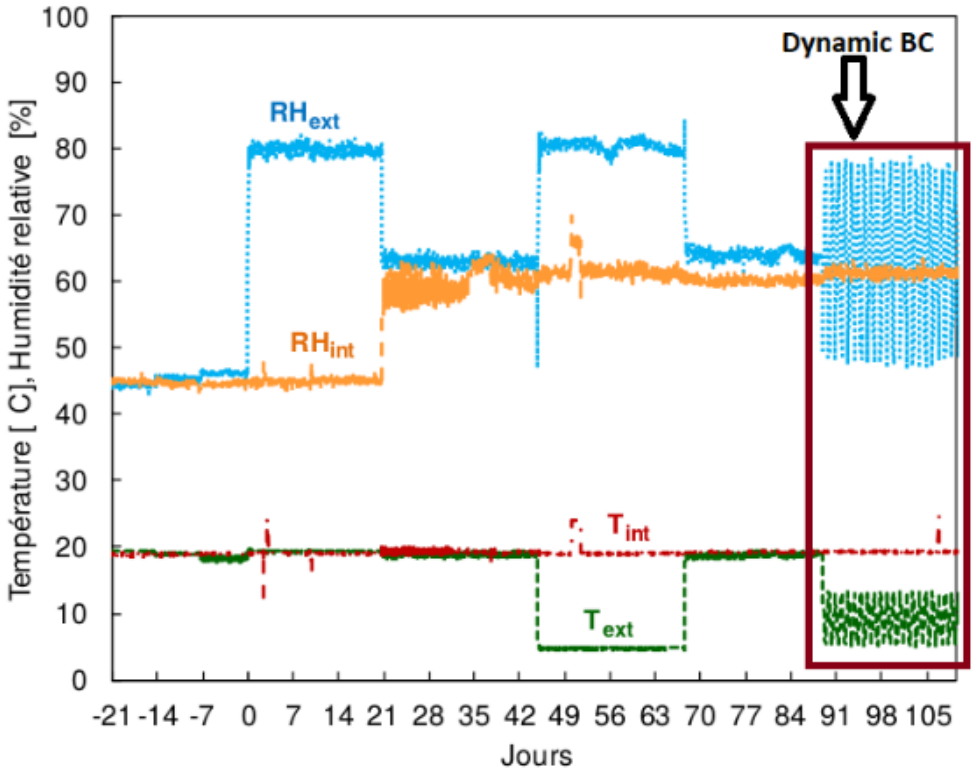
Le tableau suivant fait le lien entre cette écriture compactée et la formulation complète du modèle en décrivant chaque terme du modèle compacté.

Equation	Bloc	Formule du bloc
Equation de la conservation de la chaleur	A_{Tt}	$(\rho_s C_s + \tau_v C_l - \tau_v h_p + \varepsilon\rho_v \left(C_l + \frac{dL(T)}{dT}\right) + \varepsilon\rho_{as} C_{pas} - (L(T) + h^m)\left(\frac{\beta_p p_v}{\rho_l r_v T} + \frac{\varepsilon p_v}{r_v T^2}\right) + \frac{p_t \beta_p}{\rho_l})$
	A_{Tv}	$\left(-\tau_v h_T + (L(T) + h^m)\left(-\frac{p_v \alpha_T}{\rho_l r_v T} + \frac{\varepsilon}{r_v T}\right) + \frac{p_t \alpha_T}{\rho_l}\right)$
	A_{Ta}	$-\varepsilon$
	B_{Tt}	λ^*
	B_{Tv}	$(L(T) + h^m)\left(\frac{\pi_v^*}{p_t} + k_{nv}\right)$
	B_{Ta}	$\Lambda(\omega_{mv} K_t - \frac{\pi_v^* p_v}{p_t^2})$
Equation de la conservation de la masse d' eau	A_{Vt}	$\left(\beta_p - \frac{\varepsilon p_v}{r_v T^2}\right)$
	A_{Vv}	$\left(\alpha + \frac{\varepsilon}{r_v T}\right)$
	B_{Vt}	$K_l \rho_l (r_v \ln\left(\frac{p_v}{p_{sat}(T)}\right) - \frac{L(T)}{T})$
	B_{Vv}	$\left(\frac{\pi_v^*}{p_t} + K_l \frac{\rho_l r_v T}{p_v}\right)$
	B_{Va}	$(\omega_{mv} K_t - \frac{\pi_v^* p_v}{p_t^2})$
Equation de la conservation de l' air sec	A_{At}	$-\frac{p_t - p_v}{r_{as} T}\left(\frac{\beta_p}{\rho_l} + \frac{\varepsilon}{T}\right)$
	A_{Av}	$-\frac{1}{r_{as} T}\left(\frac{\alpha_T (p_t - p_v)}{\rho_l} + \varepsilon\right)$
	A_{Aa}	$\frac{\varepsilon}{r_{as} T}$
	B_{Av}	$\left(-\frac{\pi_v^* M_{as}}{p_t M_v}\right)$
	B_{Aa}	$(\rho_{as} \frac{K k_{rg}}{\eta_t} - \frac{\pi_v^* p_v M_{as}}{p_t^2 M_v})$

3.4. Description de la séquence expérimentale à la base des analyses de sensibilité

Il s'agit d'une séquence expérimentale très détaillée menée par le LERMAB (Université d'Epinal) dans le cadre du projet HygroBat. Elle concerne une paroi constituée d'une épaisseur de 8 cm de laine de

bois (densité 146 kg/m^3) dont les faces sont sollicitées par des conditions hygrothermiques variables (figure suivante).

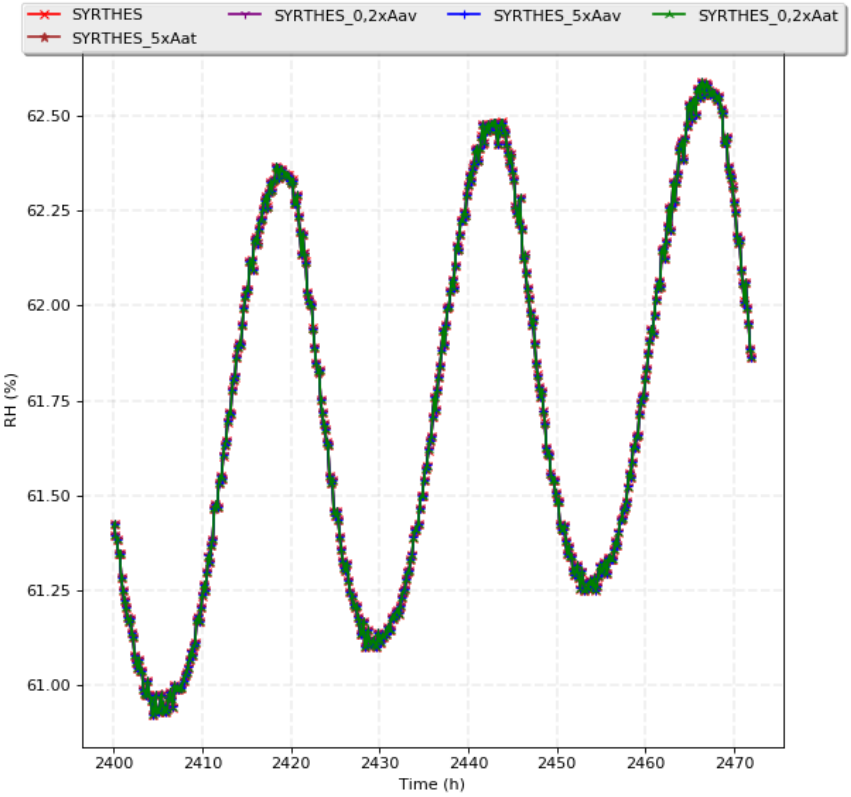


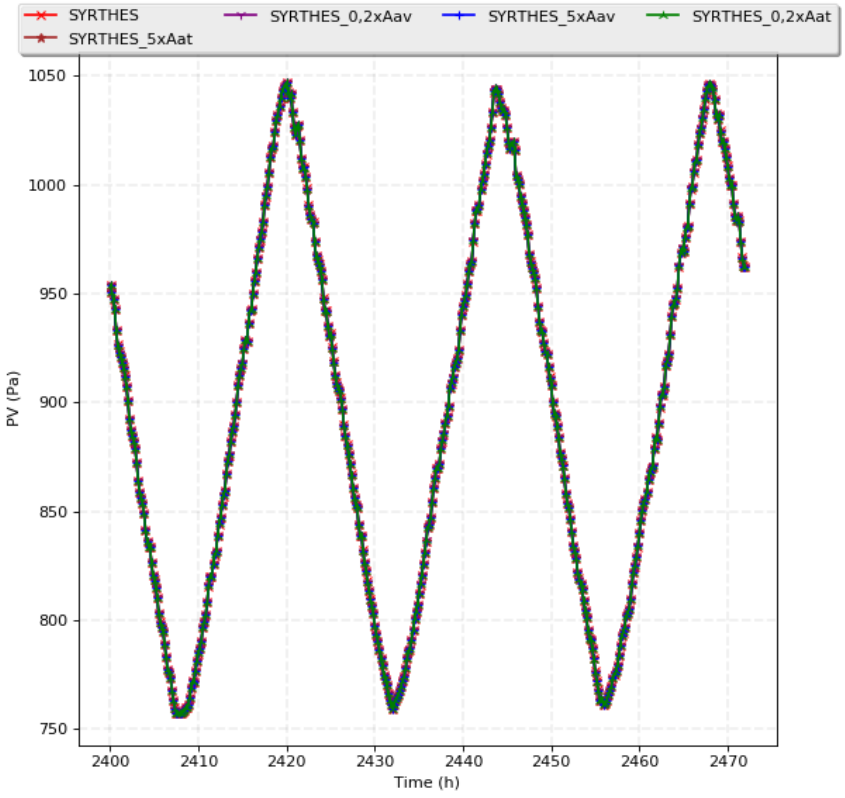
Le suivi expérimental permet la mesure de l'humidité relative et de la température en continu tous les deux centimètres dans l'épaisseur du matériau.

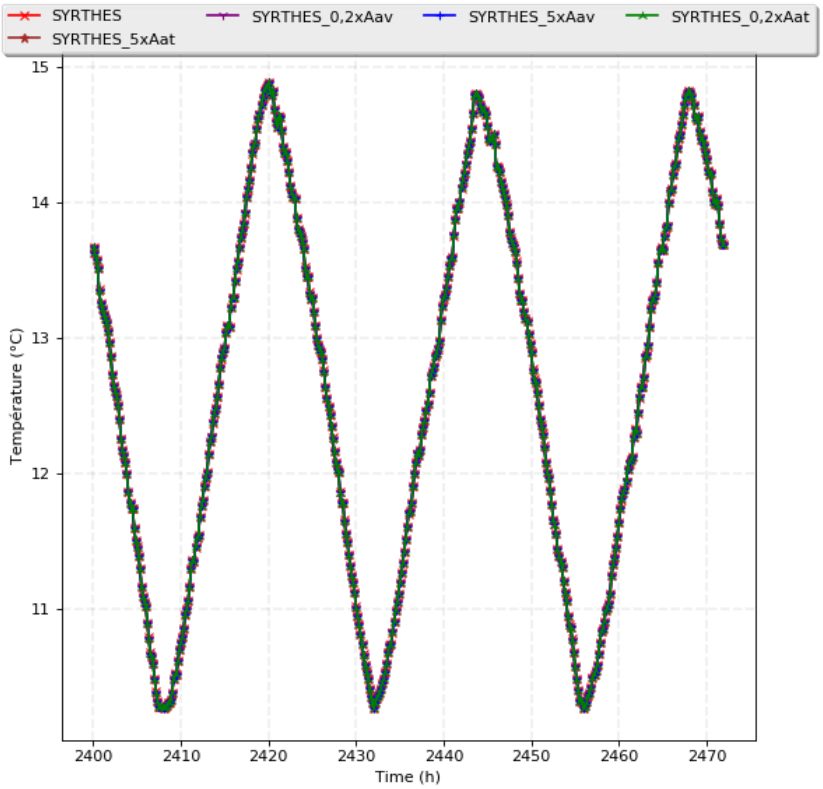
3.4.1. Principaux résultats

La méthodologie présentée trois chapitres plus haut a été appliquée à l'ensemble du modèle complet. Chaque bloc a été individuellement multiplié et divisé par un facteur 5 et nous avons comparé les résultats de simulation entre la version initiale et les versions intégrant les modifications des blocs (pour la configuration décrite ci-dessus). Lorsque les écarts constatés sur tous les paramètres calculés se sont révélés négligeables (inférieurs à 1% pour tous les paramètres calculés) les blocs correspondants ont été jugés négligeables.

Les figures suivantes illustrent cette démarche et montrent l'impact négligeable de la variation des coefficients Aav et Aat sur les calculs de l'humidité relative (HR), de la pression partielle de vapeur (Pv) et de la température (T) pour la partie dynamique de la sollicitation montrée ci-dessus.


SYRTHES
SYRTHES_0,2xAav
SYRTHES_5xAav
SYRTHES_0,2xAat
SYRTHES_5xAat
RH (%)
62.50
62.25
62.00
61.75
61.50
61.25
61.00
2400
2410
2420
2430
2440
2450
2460
2470
Time (h)


SYRTHES
SYRTHES_0,2xAav
SYRTHES_5xAav
SYRTHES_0,2xAat
SYRTHES_5xAat
PV (Pa)
1050
1000
950
900
850
800
750
2400
2410
2420
2430
2440
2450
2460
2470
Time (h)



Il ressort de cette analyse que :

- Les phénomènes physiques liés à la pression totale ne sont pas mobilisés. Ainsi, il est possible de supprimer totalement l'équation de la conservation de la masse d'air sec. Et il est aussi possible de supprimer tous les termes associés aux dérivées temporelles et aux gradients de la pression totale dans les deux équations restantes.
- Il est possible de supprimer le terme A_{Tv} (en facteur de $\frac{dp_v}{dt}$ dans le premier membre de l'équation de conservation de l'énergie).

Le modèle se limite alors à deux équations (conservation de l'énergie et conservation de la masse d'eau) sans aucun terme de dérivation de la pression totale du gaz.

3.4.2. Conséquences. Proposition d'un modèle simplifié

L'analyse précédente a permis de simplifier drastiquement l'écriture du modèle physique. Une équation a disparue, tous les termes en dérivée de la pression totale ont disparu et un terme du premier membre de l'équation de conservation de l'énergie a également disparu. Ainsi le nouveau modèle physique simplifié est décrit par deux équations de conservation qui ont été codées par une méthode éléments finis, en 2D et 3D, dans une nouvelle version de SYRTHES.

L'équation de conservation de l'énergie

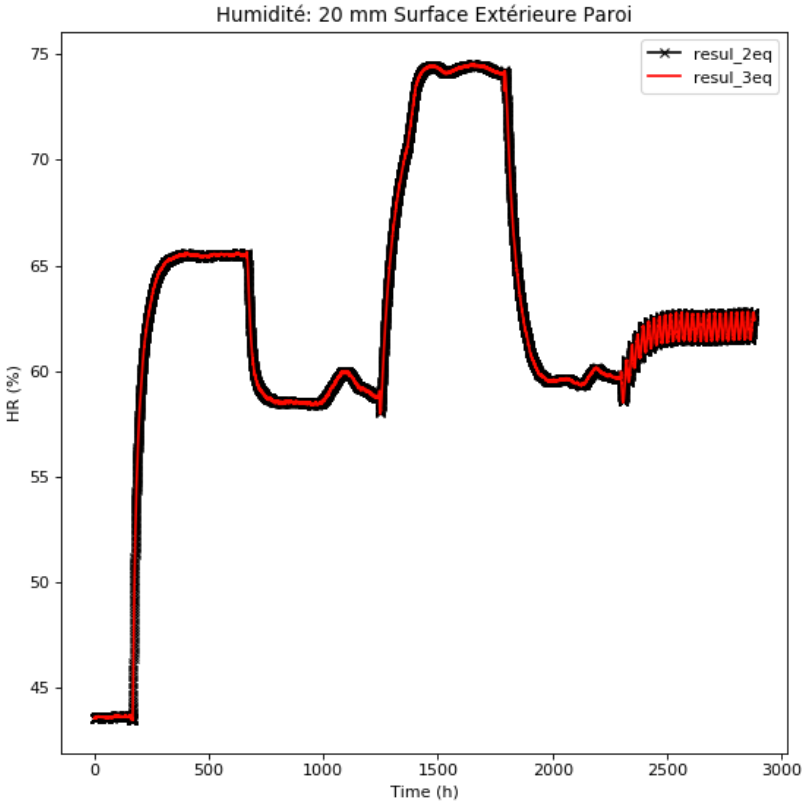
$$A_{Tt}\frac{dT}{dt} = \vec{\nabla}.(B_{Tt}\vec{\nabla}T + B_{Tv}\vec{\nabla}p_v)$$

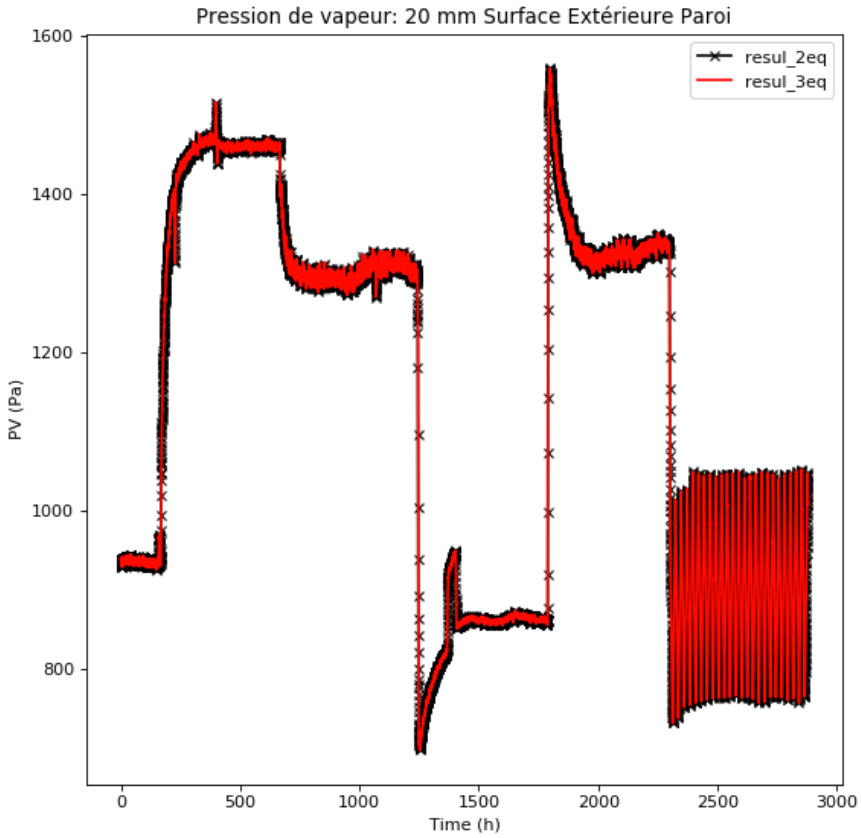
L'équation de la conservation de la masse d'eau

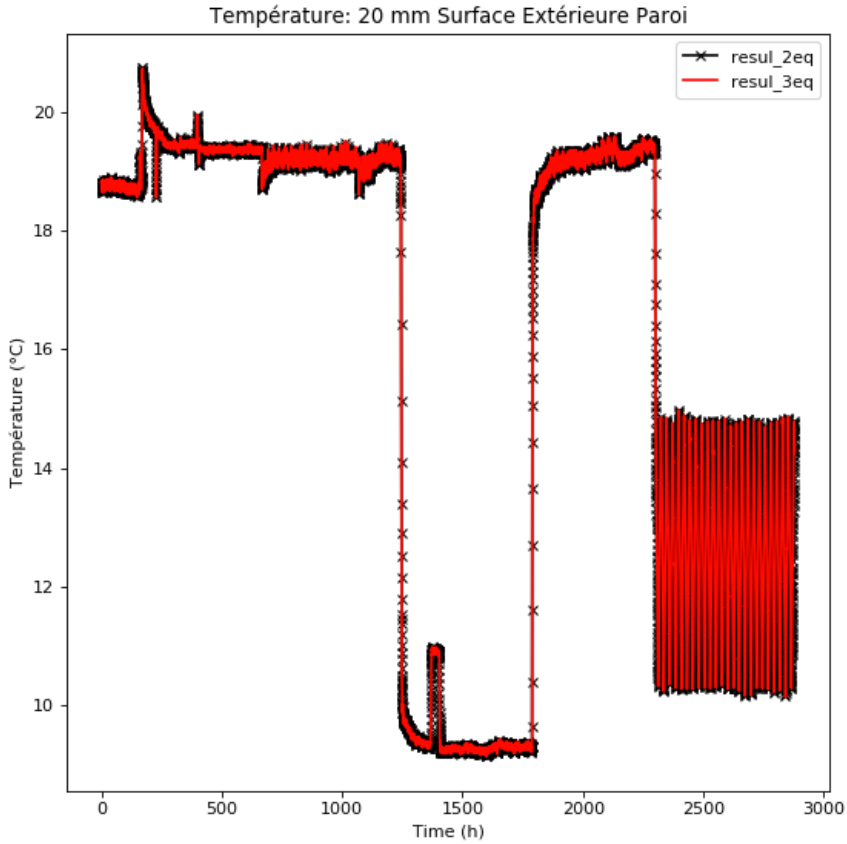
$$A_{Vt}\frac{dT}{dt} + A_{Vv}\frac{dp_v}{dt} = \vec{\nabla}.(B_{Vt}\vec{\nabla}T + B_{Vv}\vec{\nabla}p_v)$$

3.4.3. Eléments d'évaluation de la performance numérique du modèle simplifié

Le nouveau modèle simplifié a été codé en éléments finis et intégré comme une version supplémentaire de SYRTHES. Cette nouvelle version a été testée dans les conditions de l'essai HygroBat. Les figures suivantes montrent les résultats obtenus pour cette simulation avec la version simplifiée (en noir) et avec la version complète (en rouge) pour le calcul de l'humidité relative (HR), de la pression de vapeur (Pv) et de la température (T), 20 mm à l'intérieur du matériau.




Pression de vapeur: 20 mm Surface Extérieure Paroi
resul_2eq
resul_3eq
PV (Pa)
Time (h)
1600
1400
1200
1000
800
0
500
1000
1500
2000
2500
3000


Température: 20 mm Surface Extérieure Paroi
resul_2eq
resul_3eq
Température (°C)
Time (h)
20
18
16
14
12
10
0
500
1000
1500
2000
2500
3000

On constatera aisément que la simplification physique, dans ce cas particulier mais représentatif d'une situation normale de rénovation avec des sollicitations très variables et une forte hygroscopicité, n'apporte aucun changement perceptible des résultats simulés.

3.5. Simplifications d'usage espérées pour cette version simplifiée.

Gain de temps calcul.

SYRTHES est à la base un outil très efficace du point de vue numérique. Les simplifications apportées permettent en outre de gagner un facteur au moins égal à 3 par rapport à la version de base à 3 équations de conservation. L'exercice en cours de retour d'expérience sur l'utilisation de cet outil permettra de statuer sur la comparaison avec WUFI. Il semble que les premières impressions des utilisateurs sont plutôt favorables de ce point de vue.

Maillage automatique de géométries quelconques.

L'outil SYRTHES permet de bénéficier de toutes les souplesses d'un calcul par éléments finis. Toutes les géométries sont intégrables sans difficulté. Et le mailleur automatique de l'outil Salomé permet en outre de partitionner très simplement ces géométries tout en gardant la main sur la finesse locale du maillage si nécessaire. Au regard de WUFI, cantonné à des maillages rectangulaires et structurés sur tout le domaine simulé, cet avantage est indéniable.

Une multitude d'outils qui s'utilisent presque de la même façon.

Ce que nous appelons la version simplifiée de SYRTHES est en fait une version augmentée du SYRTHES de base. En effet, la simplification a donné lieu au codage d'une nouvelle version, mais qui n'a pas supprimé l'ancienne. L'outil livré à Wigwam contient la version de base ET la version simplifiée. Or toutes ces versions s'utilisent avec la même interface, le même système de maillage et de création des conditions initiales et aux limites, avec le même outil d'exploitation des résultats. Ainsi, un maillage fait pour une étude hygrothermique simplifiée peut être immédiatement réutilisé pour une étude en thermique pure (par exemple pour un calcul de pont thermique) ou pour une étude avec la version complète de SYRTHES.

Accès à la 3D.

Par principe, les développeurs de SYRTHES ont toujours pris le soin de coder en parallèle les versions 2D et 3D de leur outil. Ce principe fait qu'il n'y a jamais eu et qu'il n'y aura probablement jamais de version 2D et de version 3D de SYRTHES. Par construction, SYRTHES, qu'il soit utilisé en thermique pure, en hygrothermique simplifiée ou complète, est toujours un outil 2D et 3D. Bien entendu, la manipulation de la version 3D est plus délicate. Les maillages sont plus complexes. Les temps de calcul sont en général plus longs car il y a le plus souvent plus d'éléments à traiter. Mais le mode d'emploi de l'outil reste strictement le même. Ainsi l'utilisation de SYRTHES ouvre naturellement l'accès au monde de la simulation en 3 dimensions.

Une base de données matériaux incluant des propriétés physiques précises et fiables.

Le paragraphe suivant montrera que nous avons en perspective l'introduction d'un traitement plus simple des propriétés physiques décrites dans SYRTHES. Le domaine des transferts couplés, c'est une de ses difficultés un peu énervantes, nécessite en effet la manipulation d'un grand nombre de ces propriétés. Ce sont ces propriétés qui définissent le comportement hygrothermique des matériaux. Et

l'on devine aisément qu'elles peuvent couvrir rapidement un champ immense, d'autant plus que pour un même matériau, du moins pour un même nom générique de matériau, une infinité de variantes peuvent exister : un matériau standard, un matériau précis d'un fabricant particulier, un matériau spécifiquement testé par une procédure ou une équipe particulière, ….

Ainsi, en matière de simulation des transferts couplés de masse et de chaleur, il est illusoire de penser qu'un seul matériau décrit dans SYRTHES peut décrire toute la famille représentée par son nom. Cependant, la description des matériaux dans SYRTHES présente l'avantage d'être complète et précise. Aucune propriété nécessaire à la configuration physique traitée ne manque (il y a même des propriétés très peu mesurées qui y figurent au cas où un jour cette donnée viendrait à être plus disponible). Et chaque propriété se réfère à un corpus théorique très précis qui permet de la définir sans ambiguïté.

3.6. Perspectives de simplification

Externaliser la BDD matériaux

Aujourd'hui, les caractéristiques physiques des matériaux utilisables par SYRTHES sont définies dans des sous-programmes C. Selon que l'on veuille ou non voir apparaître ces matériaux dans le menu de l'interface utilisateur, deux procédures sont possibles pour modifier et/ou ajouter un matériau.

Les échanges qui ont eu lieu en cours de projet nous ont appris que, pour des raisons pratiques, il serait plus aisé d'avoir ces données dans une structure hors du logiciel (par exemple un fichier Excell). Il faudrait alors créer un programme spécifique pour lire ces données et les attribuer dans les sous-programmes de SYRTHES

La structure de ces données (nommées « données utiles à SYRTHES ») est aujourd'hui bien définie (voir annexe 1). Cependant, nous avons aussi souhaité développer des convertisseurs de données permettant de transformer toute donnée disponible en données utiles. Le choix fait pour réaliser ces convertisseurs (fichiers Excell avec programmes en Visual Basic) s'est révélé inapproprié. Et il ne restait plus assez de temps pour basculer les développements dans un environnement Python.

Ainsi ces nouvelles fonctionnalités (BDD matériaux externalisée et convertisseurs) devront être développés dans une prochaine version de SYRTHES simplifié.

Automatiser le calcul des indicateurs de risque hygrothermique

Dans le cadre du programme PACTE de l'AQC, le CSTB propose 5 indicateurs de risque hygrothermique. Notre idée initiale était de générer directement ces indicateurs dans la version simplifiée de SYRTHES. Cependant, pour trois d'entre eux (indicateurs intégrant des zones), la procédure proposée n'est pas claire et en tout cas non traductible directement en outil informatique. Ainsi, pour ces indicateurs, il sera nécessaire d'opter pour une version utile mais forcément incomplète de l'évaluation du risque. Ce point n'a pas pu être tranché pendant la durée du projet. Mais nous proposons en annexe 2 un traitement possible pour les 5 indicateurs qui pourra à terme être exploité pour l'élaboration du cahier des charge de ce développement.

Intégrer des fonctionnalités pratiques pour les films minces (résistances hydriques)

L'idée la plus simple qui vient à l'esprit est de décrire une résistance de contact comme une conditions aux limites entre deux milieux à l'intérieur du domaine.

De part et d'autre de cette frontière, il doit donc y avoir deux nœuds qui partagent les mêmes coordonnées mais qui sont séparés par cette résistance de contact.

A priori il semble alors possible de représenter toute résistance de contact par les mêmes paramètres qu'une condition aux limites ordinaire avec des coefficients h suffisamment élevés si l'on veut une condition de première espèce (pas de résistance pour ce transfert) ou au contraire assez élevés si l'on veut une résistance effective pour ce transfert.

Ainsi par exemple on doit pouvoir représenter un pare-vapeur par une forte résistance à la diffusion de vapeur d'eau, un h liquide nul et une faible résistance thermique.

Intégrer des fonctionnalités pratiques pour le rayonnement externe

Le moyen le plus simple auquel on pourrait arriver serait de définir un flux supplémentaire, du type a.Fs, dans les conditions aux limites thermiques du modèle. Alpha serait alors une donnée utilisateur, à entrer via un fichier de données ou via SALOME. Et Fs serait issu d'un calcul intégrant l'orientation et l'inclinaison de la surface de la paroi (donc là-aussi la normale sortante) et intégrant aussi les données de flux solaire (direct et diffus sur un plan horizontal) d'un fichier météo.

Intégrer des fonctionnalités pratiques pour la pluie battante

L'impact de la pluie battante sur les transferts d'humidité dans les parois de bâtiment est un éternel sujet de recherche dans la communauté en charge de ces questions. Elle a surtout été étudiée dans les pays où la construction en brique apparente est prédominante (Bénélux, Pays Scandinaves, …) car ce matériau n'est pas étanche à l'eau liquide. Pour les constructions neuves en France, cette question ne se pose pas car les règles techniques imposent une protection des façades vis-à-vis de la pluie. Ainsi les outils pratiques et reconnus permettant d'en tenir compte n'existent pas. Mais pour beaucoup de façades existantes, en torchis, en pierre apparentes, en briques, etc…la question se pose bel et bien et nous n'avons pas de procédure officielle à proposer.

Quelques approches ont cependant été proposées par le CSTB (toujours dans le PACTE AQC).

Le problème est de passer de données météo (pluviométrie, vitesse et direction du vent) à un flux liquide à la surface d'une paroi définie par son orientation (a priori orientation – direction vue par la surface extérieure - et inclinaison – par rapport à un plan horizontal - peuvent être définies par la normale sortante à cette surface).

Ces pistes, ainsi qu'une description de son intégration possible dans l'outil SYRTHES, sont décrits en annexe 3.

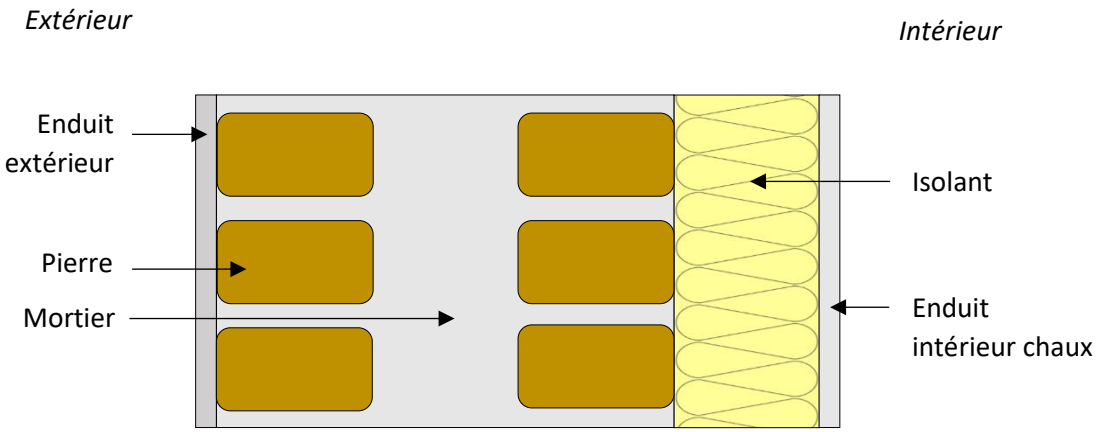
4. Retour d'expériences de l'outil numérique simplifié

Le bureau d'étude Wigwam a utilisé Syrthes sur un cas d'étude afin de réaliser son premier retour d'expérience. La réalisation du cas d'étude est détaillée dans le rapport, afin d'exposer les différentes étapes d'utilisation du logiciel Syrthes pour effectuer la simulation. Des retours sont ensuite énoncés dans le rapport, et des perspectives sont proposées.

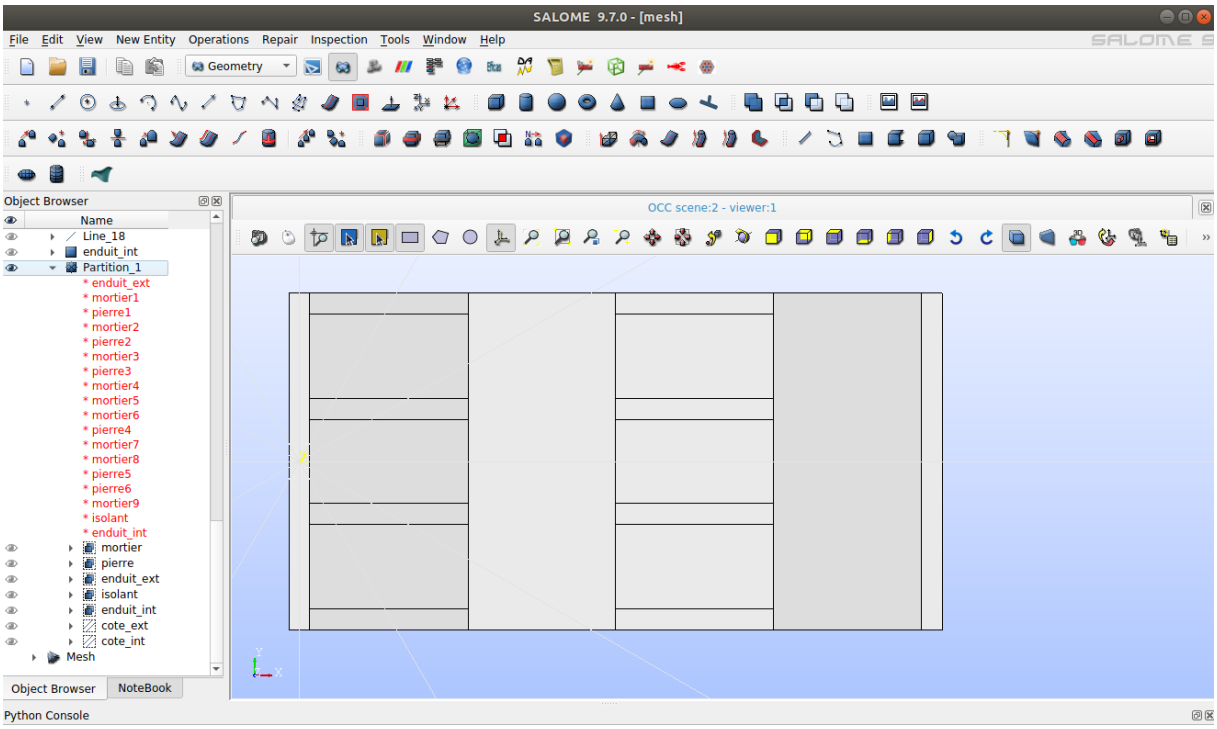
4.1. Détail de la réalisation du cas d'étude

4.1.1. Création de la géométrie avec le logiciel Salomé

La création de la géométrie s'effectue dans un premier temps sur la plateforme open source SALOME. Le premier cas d'étude est un cas 2D représenté sur le schéma ci-dessous :

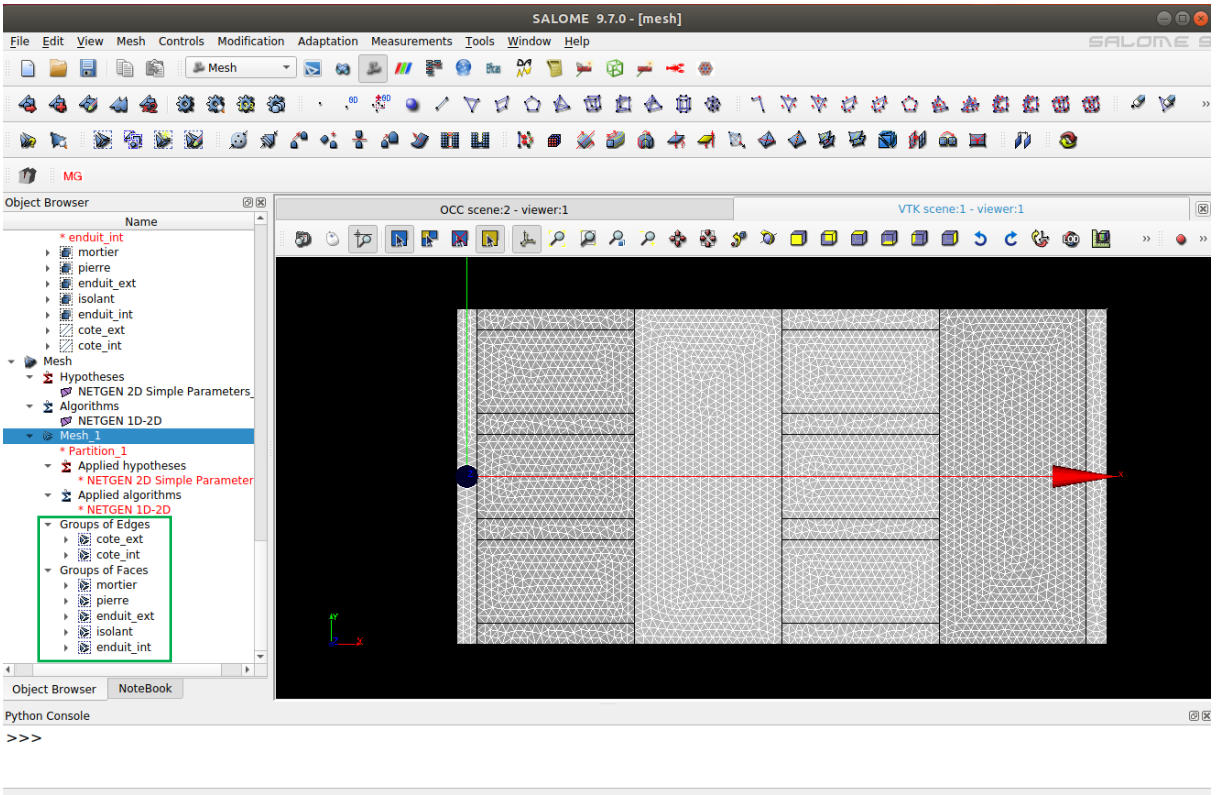


La création de la géométrie sur la plateforme SALOME débute par la réalisation de la coupe 2D de la paroi. Cette coupe a été réalisée dans l'onglet Geometry de la plateforme. La géométrie est représentée ci-dessous :



La réalisation de ces rectangles 2D s'effectue par extrusion d'une ligne. L'extrusion étant souvent de la même dimension, ceci permet de gagner du temps de modélisation.

Ensuite, le maillage est effectué sur la même plateforme, dans l'onglet Mesh. Le maillage réalisé pour ce cas d'étude est représenté ci-dessous, et l'algorithme Netgen 1D-2D a été utilisé :



Le nombre de nœuds est de 3692 et le nombre de triangles de 7142.

Il est important également de créer des groupes de formes dans SALOME pour gagner du temps par la suite lors de l'application des conditions limites et initiales. Par exemple ici, l'ensemble des rectangles modélisant les pierres, peuvent être regroupés en un seul groupe nommé pierre, afin de pouvoir appliquer les mêmes conditions initiales sur ces formes. Pour notre exemple, le matériau « pierre tendre » sera appliqué, et une seule manipulation suffira pour appliquer les conditions d'entrée, au lieu de 6 (6 pierres sont modélisées ici). Dans ce cas d'étude, les groupes suivants ont été créés :

- Mortier
- Pierre
- Isolant
- Enduit extérieur
- Enduit intérieur

Des groupes ont également été appliqués sur les côtés intérieurs et extérieurs pour pouvoir y appliquer des conditions limites par la suite :

- Côté extérieur
- Côté intérieur

Une fois ces groupes créés, ceux-ci apparaissent dans le rectangle vert de la figure ci-dessus.

Pour finir, une exportation au format «.hdf » de la géométrie est réalisée.

Une fois cette géométrie faite, la modélisation peut continuer sur le logiciel Syrthes.

4.1.2. Suite modélisation et simulation dans le logiciel Syrthes

Dans ce cas d'étude, un calcul des transferts de chaleur et d'humidité est réalisé. Pour ce faire, les conditions suivantes sont à renseigner :

- Conditions initiales en température et pression de vapeur pour chaque matériau
- Choix des matériaux (les propriétés renseignées peuvent être isotropes ou anisotropes)
- Conditions limites sur les côtés intérieurs et extérieurs. Ces conditions sont constantes dans le temps. Les conditions à renseigner sur la surface sont, la température, la pression de vapeur et le coefficient d'échange thermique.

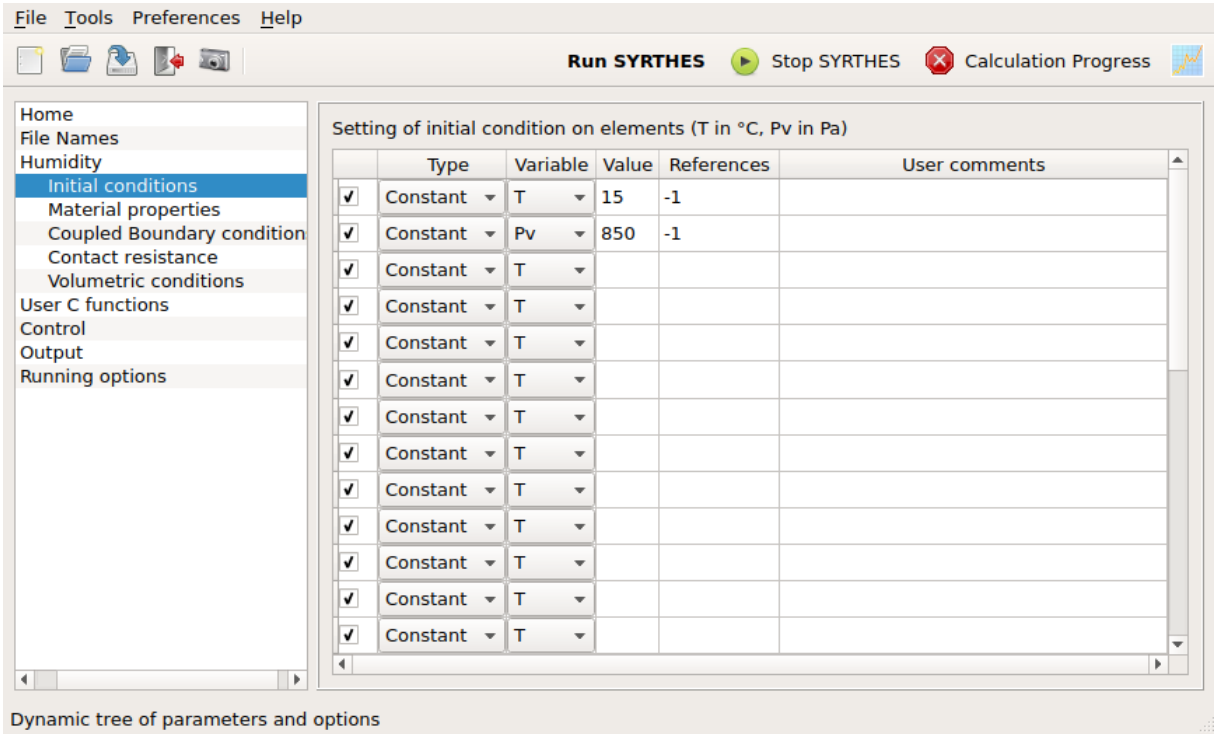
Le temps de calcul ainsi que le pas de temps peuvent être choisis. Ce pas de temps peut être variable. Il est possible également de modifier la précision du solveur, ainsi que le nombre d'itération maximal.

Des sondes peuvent être placées dans la géométrie afin de récolter la température, la pression de vapeur, l'humidité relative et la teneur en eau des matériaux aux emplacements choisis.

Pour ce cas d'étude, les données d'entrée renseignées sont les suivantes :

- Conditions initiales pour l'ensemble des matériaux :
  - Température : 15°C
  - Pression de vapeur : 850 Pa

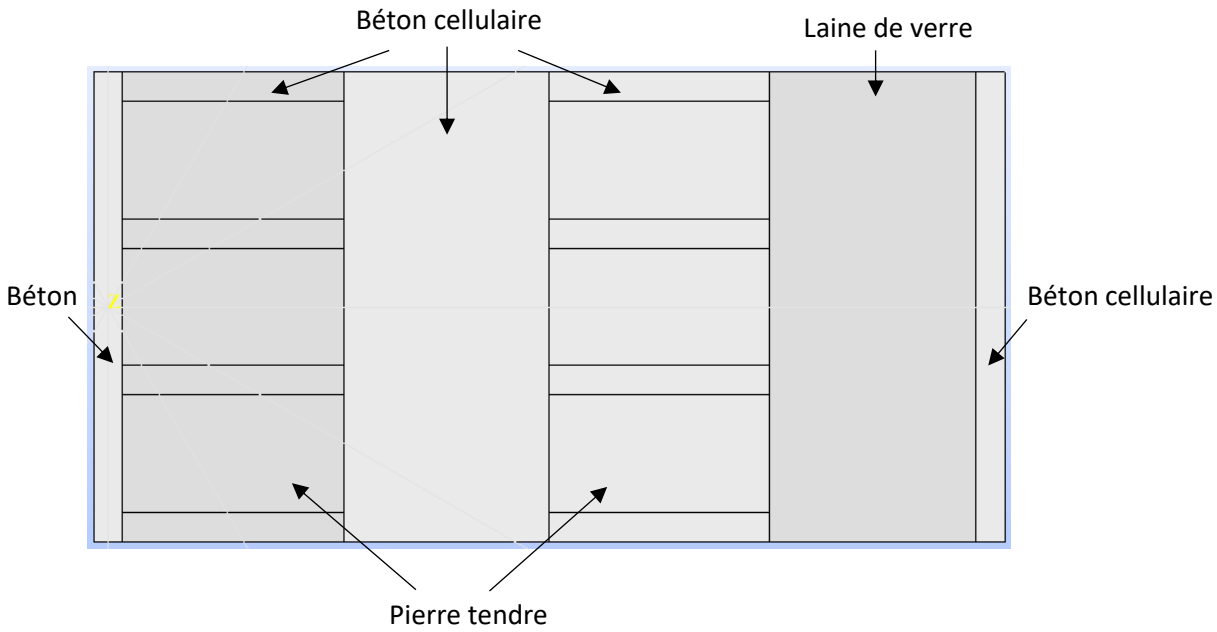
  L'application des conditions initiales sur le logiciel Syrthes s'effectue de la manière suivante :



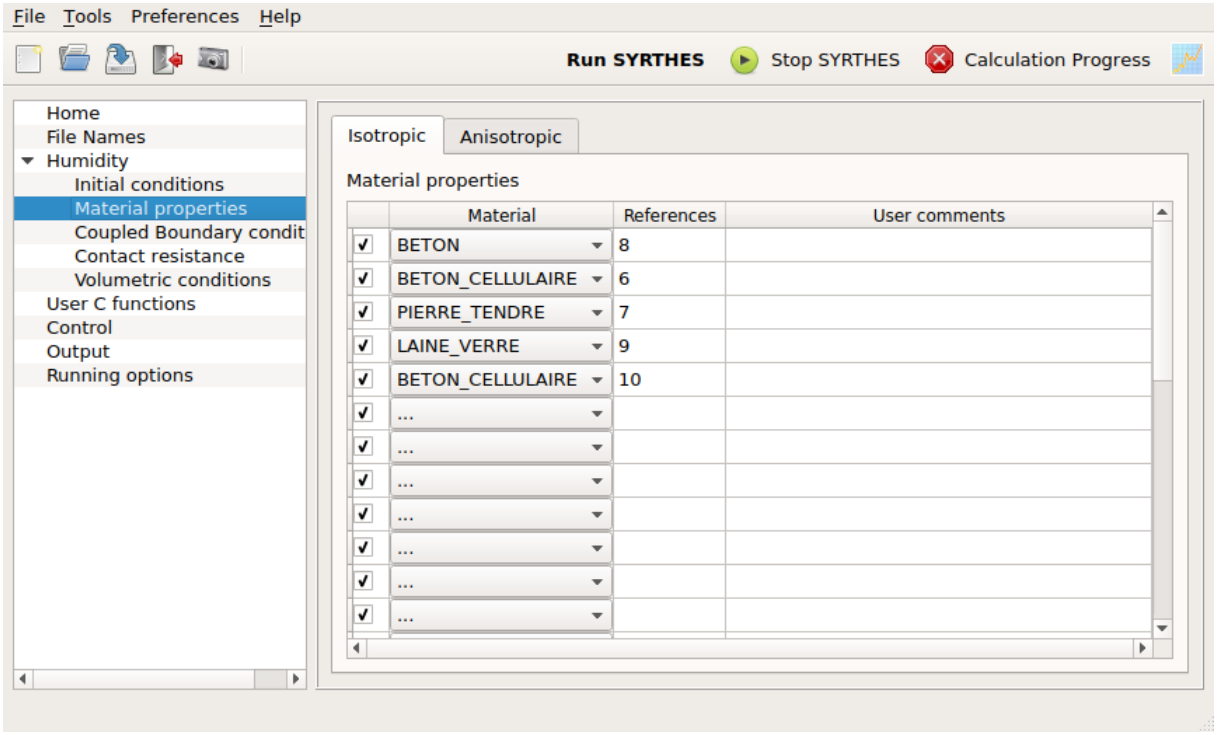
Il est possible dans le menu déroulant « Type » de choisir si la condition initiale est constante, ou une fonction. Un programme peut également être ajouté. La référence -1 inscrite permet d'appliquer cette condition à l'ensemble des matériaux.

- Matériaux renseignés :

Le béton cellulaire est renseigné à la place du mortier et de l'enduit intérieur car ces matériaux ne sont pas encore intégrés dans la base de données Syrthes.



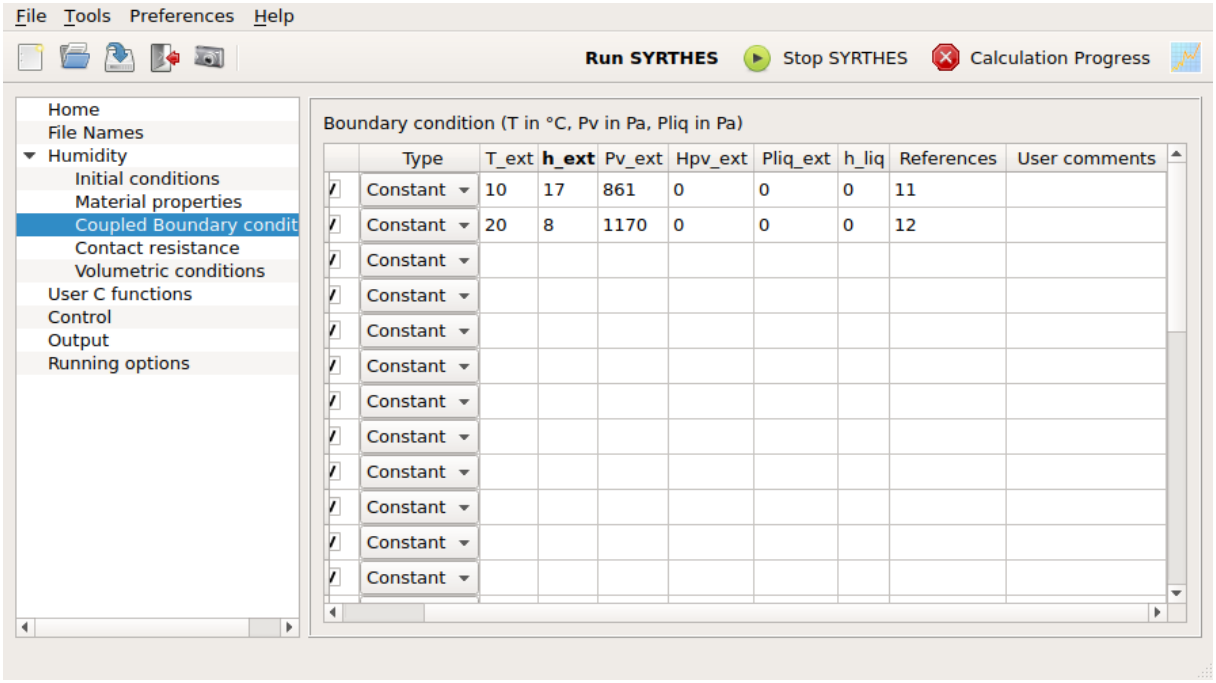
L'ajout des matériaux dans le logiciel Syrthes s'effectue de la manière suivante :



Nous pouvons apercevoir ici l'avantage de la création des groupes. Par exemple, la référence 7 ici concerne l'ensemble des 6 pierres de la coupe de la paroi. Une seule application de la pierre tendre peut être réalisée grâce au groupe créé. Les numéros de groupe sont automatiquement prédéfinis lors de l'import de la géométrie Salomé.

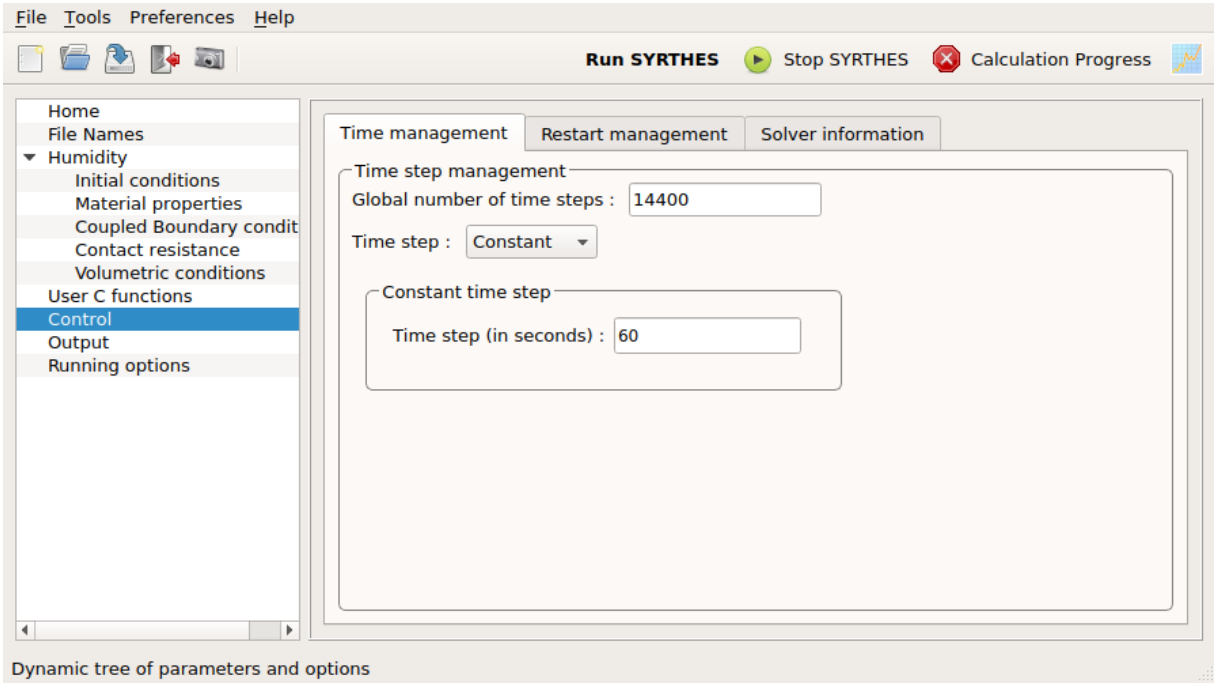
- Les conditions limites rentrées pour les côtés intérieurs et extérieurs sont les suivantes :
  - Côté intérieur : température 20°C, pression de vapeur 1170 Pa, coefficient d'échange thermique 8 W/m²K.
  - Côté extérieur : température 10°C, pression de vapeur 860 Pa, coefficient d'échange thermique 17 W/m²K.

  L'application de ces conditions dans le logiciel Syrthes s'effectue de la manière suivante :



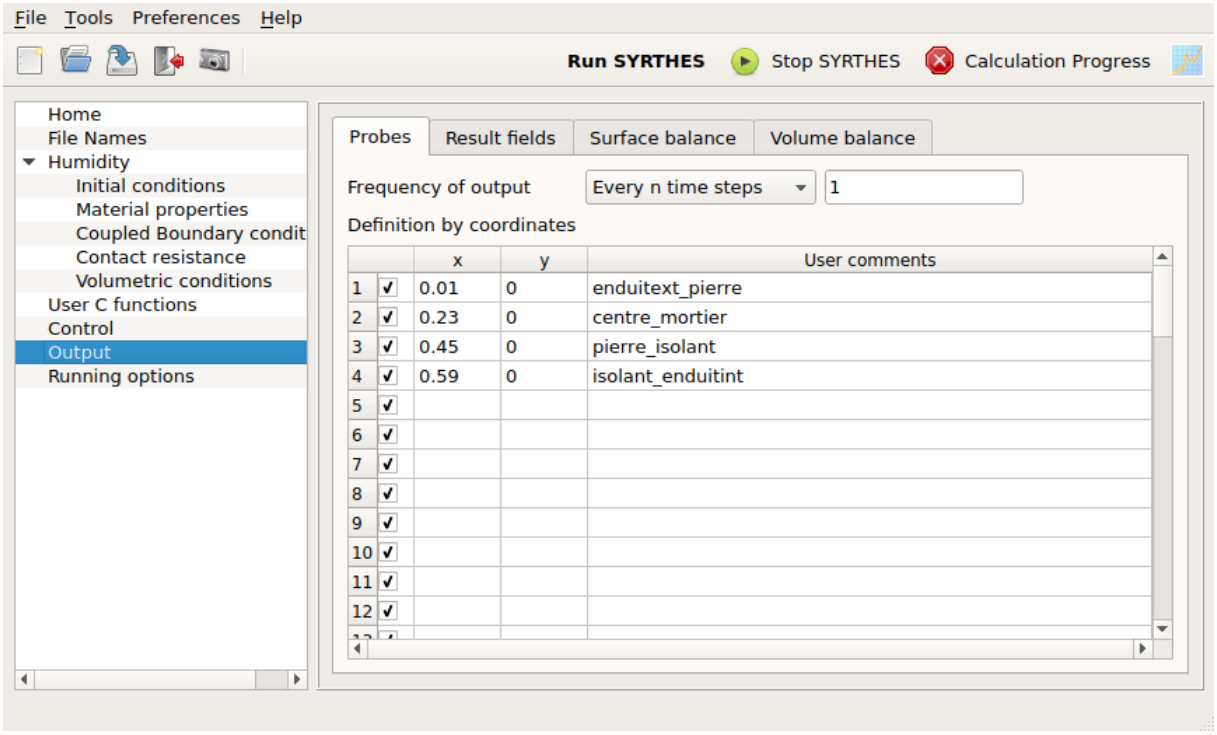
Ici, la référence 11, prédéfini automatiquement lors de l'import de la géométrie, correspond au côté extérieur, et la référence 12 au côté intérieur.

Une fois ces conditions renseignées, le temps de calcul et le pas de temps sont à renseigner dans le logiciel. Ce pas de temps peut être constant ou variable suivant les données hygrothermiques de la simulation. L'ajout de ces conditions dans Syrthes s'effectue de la manière suivante dans l'onglet Control :



Ici, le temps de calcul est de 10 jours, et le pas de temps est de 60 sec et est contant.

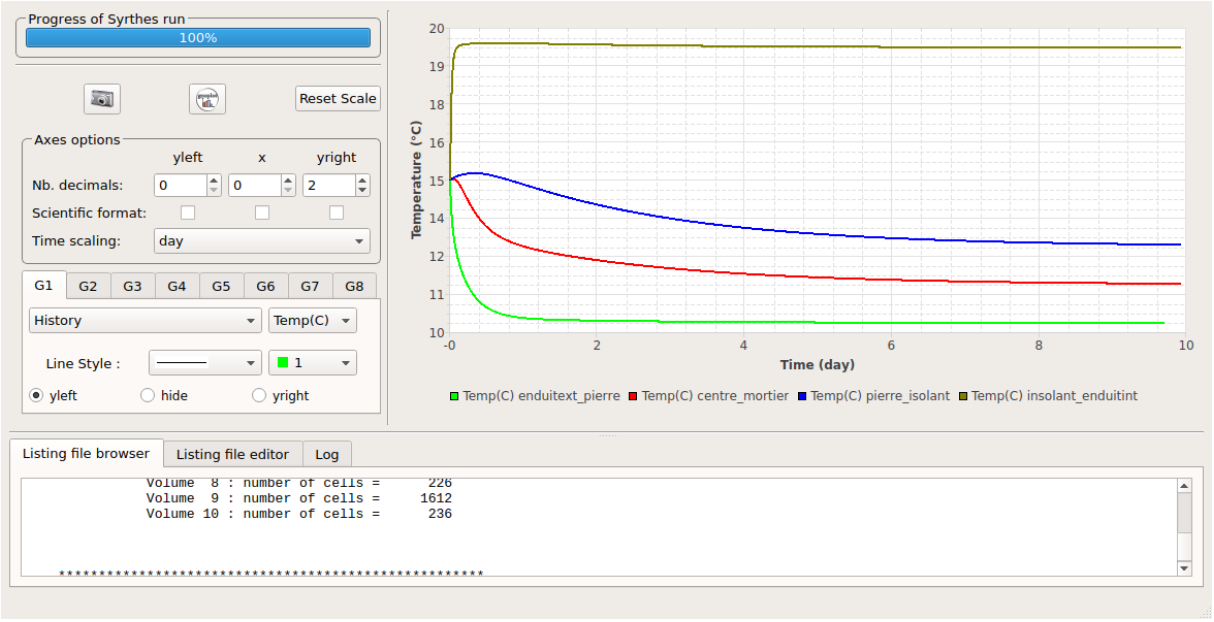
Enfin, des sondes peuvent être ajoutées pour visualiser sur des points particuliers la variation en température, en pression de vapeur, en humidité relative en en teneur en eau des matériaux. L'ajout de ces sondes dans le logiciel Syrthes s'effectue de la manière suivante :

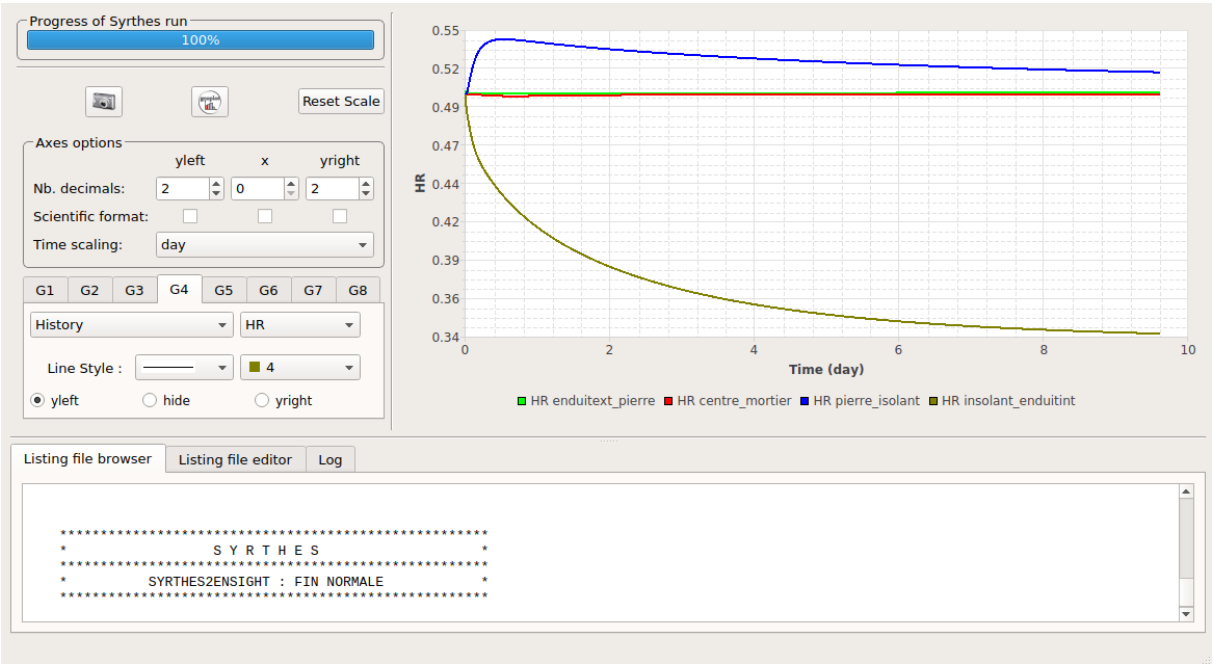


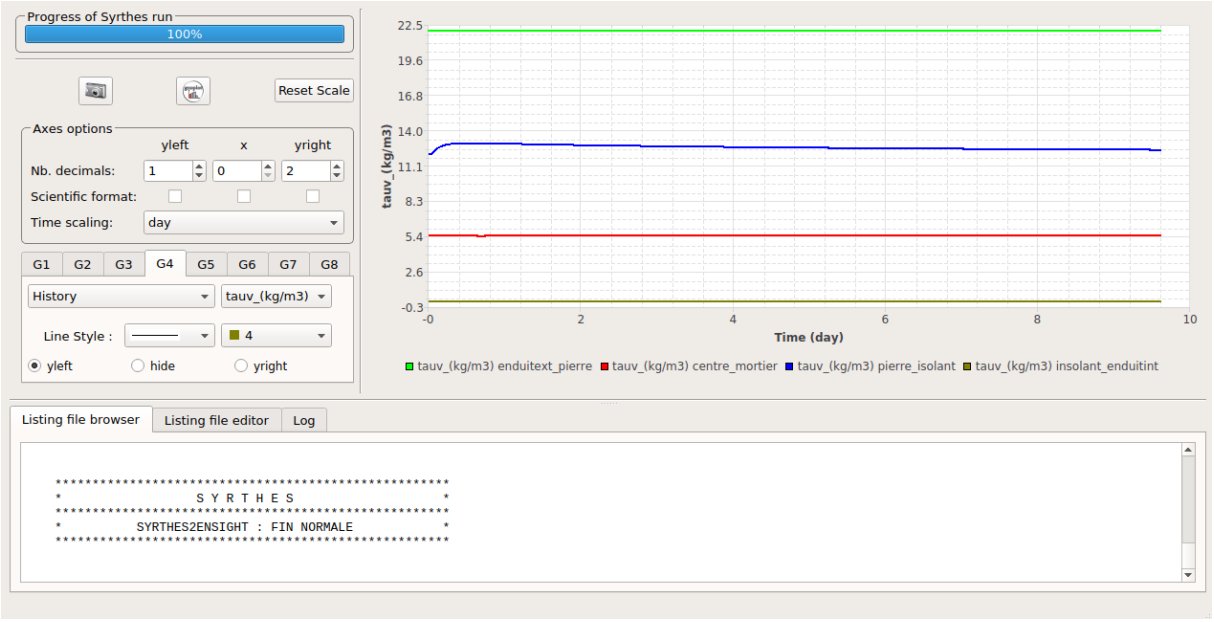
4 sondes ont été ajoutées pour ce cas d'étude. En x et y sont renseignées les positions des sondes. Celles-ci sont placées au milieu de la géométrie, avec une variation sur l'axe horizontal de façon à se placer à différentes interfaces. La première sonde est positionnée entre l'enduit extérieur et la pierre, la deuxième sonde au centre du mortier central, la troisième sonde entre la pierre et l'isolant et la quatrième sonde entre l'isolant et l'enduit intérieur.

Une fois l'ensemble de ces données renseignées, le calcul peut être lancé.

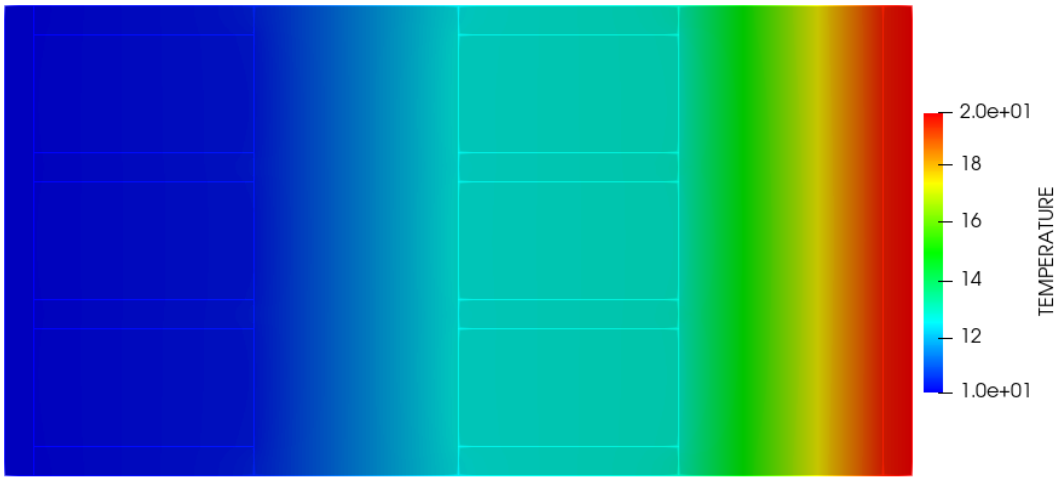
Les résultats de la simulation peuvent être visualisés sur l'onglet calculation progress du logiciel. Sur les figures ci-dessous sont représentées les variations de la température, de l'humidité relative et de la teneur en eau en fonction du temps au niveau des 4 sondes renseignées.

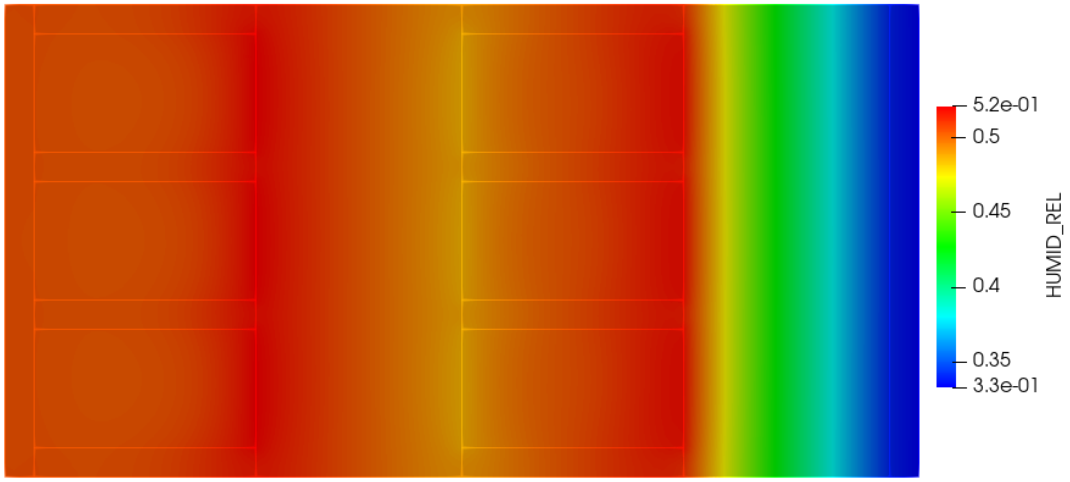

Progress of Syrthes run
100%
Reset Scale
Axes options
yleft
x
yright
Nb. decimals:
0
0
2
Scientific format:
Time scaling:
day
G1
G2
G3
G4
G5
G6
G7
G8
History
Temp(C)
Line Style :
1
yleft
hide
yright
Temperature (°C)
Time (day)
Temp(C) enduitext_pierre
Temp(C) centre_mortier
Temp(C) pierre_isolant
Temp(C) insolant_enduitint
Listing file browser
Listing file editor
Log
Volume 8 : number of cells = 226
Volume 9 : number of cells = 1612
Volume 10 : number of cells = 236


Progress of Syrthes run
100%
Reset Scale
Axes options
yleft
x
yright
Nb. decimals:
2
0
2
Scientific format:
Time scaling:
day
G1
G2
G3
G4
G5
G6
G7
G8
History
HR
Line Style :
4
yleft
hide
yright
HR
Time (day)
HR enduitext_pierre
HR centre_mortier
HR pierre_isolant
HR insolant_enduitint
Listing file browser
Listing file editor
Log
S Y R T H E S
SYRTHES2ENSIGHT : FIN NORMALE



Une visualisation de l'ensemble de ces paramètres sur l'ensemble de la géométrie peut également être réalisée sur le logiciel Paraview. Sur les figures ci-dessous sont représentées les champs de température et d'humidité relative sur l'ensemble de la géométrie au bout de 10 jours de simulation.





Il est également possible sur Paraview, de suivre grâce à un film les variations au cours du temps de ces champs de température, d'humidité relative, de pression de vapeur et de teneur en eau.

L'ensemble des étapes à suivre pour effectuer une simulation des transferts hygrothermiques sur la version simplifiée de Syrthes ont été décrites. Un retour sur l'utilisation du logiciel, et ses perspectives d'emploi est exposé ci-dessous.

4.2. Retours d'expérience

4.2.1. Prise en main du logiciel

La première partie du retour d'expérience concerne la facilité d'utilisation et de prise en main du logiciel par un bureau d'étude. Ce retour concerne tout d'abord la version simplifiée de Syrthes, développée lors du projet, puis Salomé et Paraview nécessaires pour la réalisation de la simulation. Des perspectives au niveau de l'interface et de facilitation de prise en main sont également énoncées ici.

L'utilisation de Syrthes est très intuitive. Les différents onglets présents sur la gauche de l'interface, à remplir les uns à la suite des autres guident bien la démarche à suivre pour réaliser la modélisation. Une formation sur le logiciel est tout de même nécessaire pour la première utilisation, malgré les tutoriels existants sur le logiciel Syrthes, ainsi que l'aide possible. Ceux-ci s'avèrent utiles lorsque la première appréhension du logiciel a été faite.

Pour la détermination des conditions limites et initiales, il serait plus simple pour les bureaux d'étude de remplir les conditions en humidité relative et non en pression de vapeur. De plus, des menus déroulants peuvent être proposés afin de déterminer certains coefficients, tel que le coefficient de transmission thermique surfacique en fonction de la paroi par exemple. Lorsque la base de données de Syrthes contiendra un grand nombre de matériaux, plusieurs menus déroulants, classés suivant le type de matériau (maçonneries, isolants …) pourraient être proposés, afin de faciliter le choix du matériau.

Afin de gagner du temps dans l'analyse des résultats, il est pertinent de pouvoir visualiser directement les conditions en température, pression de vapeur, humidité relative et en teneur en eau au niveau des sondes pré-enregistrées, grâce à la fenêtre « Calculation Progress ». Ceci permet en un rien de temps de conclure sur le risque hygrothermique lorsque les sondes mettent en avant un problème. Lorsque qu'aucun problème n'est détecté, il est tout de même nécessaire de faire une vérification des conditions hygrothermiques sur l'ensemble de la géométrie via le logiciel Paraview. La dimension utilisée pour l'évaluation du risque de la teneur en eau des matériaux biosourcés est en %M. Cette dimension pourrait alors être utilisée pour l'analyse de la teneur en eau au lieu d'avoir une grandeur en kg/m^3. L'identification du risque ne se fait pas toujours sur un seul point de la géométrie, mais parfois sur une zone moyennée. Il serait alors intéressant de pouvoir définir cette zone à investiguer en déterminant pour la sonde, les coordonnées de la zone. Cette zone à investiguer pourrait également être une zone préalablement choisie sur Salomé, en cliquant sur les mailles concernées. L'ensemble des évaluations des risques à mener pourront ainsi se faire directement via Syrthes.

La prise en main de Salomé et de Paraview requiert également une formation avant toute première utilisation. Pour le logiciel Salomé, quelques réflexes sont à prendre pour créer les géométries, mais

qui une fois adoptés permettent de gagner un certain de temps, et de limiter les erreurs de modélisation. Notamment la création des rectangles par extrusion d'une ligne, qui peuvent se faire à plusieurs reprises lorsque ceux-ci ont la même dimension sur la géométrie. En revanche, la création du maillage n'est pas forcément adaptée aux bureaux d'étude pour lesquels la création du maillage se fait totalement automatiquement. Ici, un mailleur automatique est mis en place, mais c'est tout de même au bureau d'étude de choisir l'algorithme de construction du maillage ainsi que les hypothèses de l'algorithme. Une fiche d'aide, ou une formation plus poussée, devraient être mises en place pour pouvoir créer, en fonction de la géométrie, un maillage adapté. Peut-être que dans une utilisation future, une automatisation du choix de l'algorithme et des hypothèses de construction du maillage pourrait être intégrée au logiciel. Pour le logiciel Paraview, il est intéressant de pouvoir visualiser sur tous les pas de temps les variations des champs de température, de pression de vapeur, d'humidité relative et de teneur en eau via un film. En plus de cela, pouvoir représenter graphiquement ces conditions sur une coupe de la géométrie est adapté aux rapports qui peuvent être faits par les bureaux d'étude.

En plus de ce qui a été énoncé dans les paragraphes précédents, trois éléments majeurs ressortent pour faciliter la prise en main du logiciel par les bureaux d'étude. D'une part il serait intéressant de pouvoir utiliser un seul logiciel et non trois pour pouvoir réaliser l'étude hygrothermique complète. Le logiciel Syrthes a été adapté pour une utilisation par un bureau d'étude, et non les logiciels Salomé et Paraview. Les prises en main des logiciels Salomé et Paraview ne sont tout de même pas aisées du fait de leurs nombreuses fenêtres et nombreux onglets puisqu'ils peuvent être utilisés pour de nombreuses applications. Ceci rejoint le deuxième point qui pourrait être apporté pour faciliter la prise en main. Il s'agit d'améliorer l'ergonomie des logiciels en automatisant certains paramètres (création du maillage) et limitant certains choix (menus déroulants pour définir les données d'entrée). Et enfin, le dernier point a été abordé lors de ce projet mais n'a pu aboutir, il s'agit de pouvoir utiliser le logiciel Syrthes sur Windows. Une machine virtuelle a été installée pour que Wigwam puisse utiliser le logiciel sur Linux, ce qui en soit fonctionne très bien mais reste difficile à installer et à utiliser.

4.2.2. Simplification d'usage du logiciel

4.2.2.1. Temps de modélisation et temps de calcul

L'ensemble des temps de modélisation ont été enregistré une fois les différents logiciels utilisés à plusieurs reprises. Ces temps de modélisation et de calcul sont comparés par rapport aux temps nécessaires pour faire les mêmes manipulations avec le logiciel utilisé habituellement pas le bureau d'étude, le logiciel WUFI.

- Temps de création de la géométrie

La création de la géométrie est entièrement faite sur SALOME. La création des formes sur le logiciel a pris au total 8 min sur cette géométrie. La création du maillage a pris 4 min. Au total, 12 min sont nécessaires pour la réalisation de la géométrie complète afin de l'exporter dans le logiciel Syrthes.

Le temps de création de la géométrie sur le logiciel habituellement utilisé dans le bureau d'étude est de 10 min, et la création du maillage est automatique ce qui n'a ainsi pas pris de temps.

- Temps pour paramétrer les données d'entrée

La définition des données d'entrée sur Syrthes se fait plutôt rapidement. En effet, 7 min sont nécessaires pour rentrer l'ensemble des données concernant les conditions initiales, les conditions limites, et les paramètres de calcul.

Sur le logiciel habituellement utilisé par le bureau d'étude, 7 min sont également nécessaires. Des données supplémentaires sont à renseigner au niveau des coefficients des transferts surfaciques, mais à certains endroits, un pré-remplissage est déjà fait pour les données d'entrée revenant fréquemment telles que les conditions initiales en température et pression de vapeur des matériaux, ou certains coefficients surfaciques.

- Temps de calcul

Différents calculs ont été lancés sur le logiciel pour comparer les temps de calcul, avec ou sans enregistrement des données au niveau des sondes, et un enregistrement à chaque pas de temps ou tous les 10 pas de temps. Les calculs ont été lancés 3 fois, et une moyenne est inscrite pour chaque cas.

- 4 sondes et enregistrement des données tous les pas de temps : 68,9 secondes
- 4 sondes et enregistrement des données tous les 10 pas de temps : 61,04 secondes
- 0 sonde : 59,39 secondes

La simulation a également été faite avec le logiciel WUFI. L'enregistrement des données sur certains points de la géométrie n'est pas possible sur ce logiciel. Ainsi, une comparaison peut être faite avec le temps de calcul de Syrthes pour 0 sonde. Les maillages entre WUFI et SYRTHES sont différents. Une attention particulière a été apportée sur le nombre de mailles, pour que celui-ci soit à peu près équivalent entre les deux logiciels. En plus des conditions limites et initiales similaires, la précision du solveur est la même entre les deux logiciels. Le temps de calcul par le logiciel WUFI est de 192 secondes, soit un temps de calcul 3,2 fois plus long environ.

Le temps de calcul sur le logiciel Syrthes est environ 3 fois plus rapide pour les modélisations équivalentes réalisées par Wigwam. Ce gain de temps est très intéressant pour la prestation du bureau d'étude, pour lequel des calculs assez complexes peuvent durer plusieurs heures, voire plusieurs dizaines d'heure avec le logiciel WUFI. En effet, les bureaux d'étude ne possèdent pas, pour la plupart, d'ordinateurs puissants dédiés aux simulations. Durant le calcul, l'ordinateur de l'employé est alors fortement mobilisé, alors que plusieurs calculs peuvent être en attente de lancement. Un gain de temps de calcul est alors fortement appréciable afin de gagner en productivité.

4.2.2.2. Calculs simultanés

Pour continuer sur la question du gain de productivité, le logiciel simplifié Syrthes a un avantage par rapport au logiciel WUFI 2D. Plusieurs fenêtres du logiciel Syrthes peuvent être ouvertes en simultanées, ce qui implique que plusieurs calculs peuvent être lancés simultanément. Cette fonctionnalité est également un gros plus pour le bureau d'étude qui a, la majorité du temps, plusieurs simulations 2D à effectuer. Pour gagner en productivité, l'ensemble de ces simulations simultanées peuvent être lancées durant les heures non travaillées, en pleine nuit ou durant le week-end, pour permettre une analyse des résultats plus rapide.

4.2.2.3. Modélisation 3D

Le logiciel WUFI permet de réaliser des simulations des transferts hygrothermiques à travers l'enveloppe seulement en 1D et en 2D. Jusqu'à aujourd'hui le choix des détails d'étude, ainsi que les choix de modélisation s'effectuent suivant ces possibilités. Il s'est avéré à de nombreuses reprises qu'une modélisation 3D aurait été plus appropriée, et permettrait de ne pas se mettre dans un cas trop favorable ou à l'inverse trop défavorable Certes le temps de calcul serait plus élevé, mais le nombre de modélisation à effectuer diminuerait. Nous pensons notamment à la modélisation des **assemblages pour les constructions modulaires**. Ces assemblages peuvent être assez complexes, et peuvent être réalisés par des pièces métalliques pouvant entraîner des pathologies liées à l'humidité.

4.2.2.4. Modélisation courbe

Le logiciel Syrthes permet de réaliser des simulations sur des géométries courbes et en pente. Il arrive que l'on ait besoin de modéliser ces types d'élément qui sont alors seulement approchés par la modélisation sur WUFI. Des éléments de toiture par exemple peuvent être courbe, et la jonction plancher / toiture nécessite une pente à prendre en compte. **L'utilisation de Syrthes permettra de ne plus faire de restrictions que ce soit dans la dimension de simulation, ou la modélisation courbe et en pente lorsque celle-ci est nécessaire.**

4.2.2.5. Finesse du maillage

La simulation par éléments finis du logiciel Syrthes permet une plus grande souplesse au niveau du choix et de la finesse du maillage. Comme précisé précédemment, la réalisation du maillage devrait être encore plus automatisée dans le choix de l'algorithme de maillage et des hypothèses, car ceux-ci restent encore difficilement applicables pour un bureau d'étude. Pour cette automatisation, des choix pourraient être faits en amont par le bureau d'étude pour choisir certains endroits critiques de la géométrie ou la finesse du maillage est nécessaire, et au contraire indiquer des endroits ou un maillage grossier suffirait. Ceci améliorerait le gain de temps de calcul indiqué précédemment, et de limiter les problèmes de convergence du modèle à certains endroits critiques.

4.2.2.6. Modification de la géométrie en cours d'étude

Il arrive fréquemment qu'une modification de la géométrie doit être apportée durant l'étude hygrothermique. Cette modification est nécessaire par suite d'une demande du client, d'un manque de données en début d'étude, ou tout simplement d'une erreur de modélisation. La modification de la géométrie sur le logiciel Salomé s'effectue plus facilement et rapidement que sur le logiciel WUFI et entraîne ainsi un gain de productivité pour le bureau d'étude. En revanche, il serait intéressant de pouvoir continuer avec la géométrie modifiée sans avoir à redéfinir toutes les données d'entrée sur Syrthes.

4.2.2.7. Réalisation études de sensibilité

Un point important pour le bureau d'étude est à soulever avec l'utilisation de Syrthes : la possibilité de réaliser des études de sensibilité. Il arrive souvent pour le bureau d'étude de devoir analyser l'impact de différentes épaisseurs de matériaux sur la performance hygrothermique de l'enveloppe, ou d'étudier différentes propriétés thermophysiques des matériaux, telles que le Sd des membranes pare-vapeur par exemple, ou même d'étudier l'effet de la mise en place de différents matériaux comme

une isolation minérale vs une isolation biosourcée par exemple. **La capacité de réaliser des études de sensibilité sur les simulations des transferts hygrothermiques ouvre de grandes possibilités pour le bureau d'étude, et lui permettra de préconiser la solution la plus performante sur le point de vue environnemental et énergétique.**

4.2.2.8. Couplage différentes études

Les études hygrothermiques et thermiques réalisées aujourd'hui par la majorité des bureaux d'étude sont décorrélées. Une modélisation est à réaliser pour l'étude hygrothermique, une deuxième modélisation sur un autre logiciel est à réaliser pour une étude thermique. L'outil Syrthes permet de réaliser ces deux simulations, des transferts hygrothermiques et des transferts thermiques, sur une seule modélisation réalisée sur le logiciel Salomé. Ceci est alors un gain de temps pour le bureau d'étude, d'autant plus que les études hygrothermiques pourront être couplées à des études thermiques pour mieux appréhender les comportements hygrothermiques observés. Il serait également possible de coupler les études hygrothermiques avec des études de dynamique des fluides. Cette partie est également très intéressante pour l'étude de la performance hygrothermique de l'enveloppe car les ventilations de lame d'air, qu'elles soient sous tuile, ou au sein d'une paroi, ont un impact conséquent sur la performance hygrothermique de l'enveloppe, et le confort hygrothermique des habitants à l'intérieur du bâtiment. **Ce couplage entre les études hygrothermiques avec les études thermiques et de dynamique des fluides est alors un gain de productivité pour le bureau d'étude, et un gain de performance dans la solution retenue pour la construction ou la rénovation.**

4.2.2.9. Intégration phénomènes physiques complexes dans la modélisation

Plusieurs phénomènes physiques, approchés ou non modélisés dans le logiciel WUFI, ont nécessité à être pris en considération dans le logiciel Syrthes. Nous pensons notamment à la modélisation de la ventilation des lames d'air, qui sont généralement de faibles épaisseurs et donc difficilement modélisables. Mais leurs modélisations plus précises serait bénéfique pour les simulations au vu de leur importance dans la performance hygrothermique de l'enveloppe et leurs impacts sur le confort intérieur. Nous pensons également à la prise en compte du rayonnement solaire par certains matériaux intégrés dans l'enveloppe. Ces matériaux peuvent être des membranes réfléchissantes, et au vu de leurs bienfaits sur le confort intérieur estival, il serait pertinent de pouvoir mieux l'approcher dans la modélisation pour valoriser ces bienfaits. La question de la modélisation de la pluie battante entre également en compte dans la prise en compte de phénomènes complexes. EDF a relevé dans l'annexe 2 l'approche de la modélisation de la pluie battante dans le logiciel WUFI. Par cette approche, nous observons en effet de nombreux problèmes de convergence lors de phénomènes de pluies, entrainant alors des temps de calcul très longs et évidemment des résultats qui peuvent être faux. Des corrections de cette modélisation seraient alors pertinente car aujourd'hui, celle-ci ne permet pas toujours d'obtenir des résultats fiables.

4.2.2.10. Alimentation de la base de données matériaux

EDF a pour projet de développer un outil qui permettrait de convertir les propriétés thermophysiques des matériaux pour que ces matériaux soient facilement implémentés dans la base de données Syrthes. De nombreux laboratoires peuvent aujourd'hui caractériser ces propriétés, mais chacun ayant sa méthode de caractérisation, il est difficile pour un bureau d'étude de convertir les données mesurées dans la dimension requise par le logiciel. Ce convertisseur de donnée permettrait alors de

facilement alimenter la BDD, ce qui est très intéressant pour différents acteurs de la filière bâtiment. Les bureaux d'étude d'une part qui pourraient utiliser une plus grande diversité de matériaux dans leurs modélisations, mais également comparer différentes propriétés qui peuvent être recueillies lors de veilles techniques. Nous pouvons également imaginer que le logiciel Syrthes puisse être utilisé par les fabricants de matériaux pour qu'ils puissent facilement appréhender l'impact de leurs matériaux sur le comportement hygrothermique d'une enveloppe, et modifier en fonction le développement ou le préconiser aisément. **Avec les enjeux climatiques d'aujourd'hui et le développement de nouveaux matériaux mixtes, géosourcés et biosourcés qui en découlent, il n'est pas si aisé de pouvoir modéliser ces matériaux et de prédire correctement le comportement hygrothermique de l'enveloppe. Ce convertisseur de données permettra de facilement renseigner la base de données des dernières innovations, et d'inciter à l'utilisation de ces matériaux en construction neuve ou rénovation.**

4.2.3. Perspectives de développement du logiciel

4.2.3.1. Automatisation de l'étude

Pour faciliter l'utilisation du logiciel Syrthes par un grand nombre d'acteurs de la filière bâtiment, et aider ainsi à la rénovation des bâtiments, l'automatisation de l'ensemble des étapes de son utilisation est alors un projet de développement adéquat.

L'automatisation passerait dans un premier temps par **l'automatisation du maillage**. Après la création des formes de la géométrie sur Syrthes, et des choix spécifiques de la finesse du maillage, la création du maillage pourrait être entièrement automatisée, pour s'assurer que des erreurs ne soient pas commises par l'utilisation.

Dans un second temps, la définition des conditions limites et intérieures ne sont pas si difficiles et si longues que ça à renseigner par l'utilisateur. Une aide au remplissage pourrait se faire en intégrant des menus déroulants pour certains coefficients, ou un pré-remplissage pourrait être fait pour les conditions initiales en température et en humidité relative des matériaux par exemple.

Ensuite, une **automatisation de l'analyse** peut être réalisée et fait partie d'ailleurs des projets à venir de EDF. Des indicateurs de risques, préconisés par le guide SimHuBat sont à suivre pour l'étude des risques hygrothermiques au sein d'une enveloppe. Ces indicateurs se basent sur des valeurs seuils en humidité relative ou en teneur en eau des matériaux à ne pas dépasser ponctuellement ou sur un certain laps de temps dans une certaine zone moyennée. Cette automatisation est prévue lors de l'amélioration de cette version Syrthes simplifiée.

Enfin, pour terminer sur l'automatisation, une **automatisation du rapport** à rendre par le bureau d'étude pourrait être prévue, de façon toujours à gagner en productivité pour ce dernier et pouvoir ainsi réaliser un plus grand nombre d'étude à moindre prix. La réalisation d'études hygrothermiques pourrait ainsi se généraliser, et il ne sera plus questions de risques hygrothermiques lors de constructions neuves ou rénovations.

4.2.3.2. Outil d'aide à la conception de l'enveloppe et à la préconisation bas carbone

Nous pourrions également imaginer que le logiciel Syrthes puisse être une aide à la conception de l'enveloppe. Pour cela des études de sensibilité pourraient être menées lorsqu'un risque hygrothermique est avéré. Des simulations pourraient être réalisées avec différentes épaisseurs de matériaux, différents types de matériaux ou différentes propriétés thermophysiques de matériaux de façon à concevoir une enveloppe pérenne sur le plan hygrothermique. L'aide à la conception pourrait également se faire pour favoriser une conception bas carbone, en favorisant l'utilisation de matériaux mixtes, biosourcés ou géosourcés, voire locaux ou issus du réemploi. Cette aide à la conception bas carbone intervient également par l'optimisation de la quantité de matière utilisée.

4.2.3.3. Outil d'aide à l'exploitation de résultats expérimentaux

L'outil Syrthes pourrait également être un outil d'aide à l'exploitation de résultats expérimentaux. L'exploitation de résultats expérimentaux par la simulation n'est pas si aisée pour les bureaux d'étude. Les différentes méthodes pour faire fitter le modèle aux résultats expérimentaux pour permettre d'approcher au mieux certaines propriétés de matériaux in-situ, pourraient être intégrées au logiciel.

4.2.3.4. Conditions climatiques extérieures et intérieures

Des apports sont également à apporter dans le choix des conditions climatiques extérieures et intérieures. Pour les conditions climatiques extérieures, des conditions climatiques recueillies dans des stations météorologiques devraient pouvoir être importées dans le logiciel, de façon à se rapprocher le plus possible des conditions réelles. Pour cela, l'intégration de fichiers issus du logiciel Météonorm est suffisante. Pour les conditions climatiques intérieures, celles-ci devraient être calculées en suivant les normes en vigueur, à partir du climat extérieur et du type de bâtiment, de façon à avoir des conditions variables. Enfin, il serait également intéressant de poursuivre de nombreux travaux qui ont pu être menés déjà sur l'impact de pics de chaleur ou d'humidité intérieurs sur le comportement hygrothermique de l'enveloppe, et l'effet tampon que celle-ci peut avoir.

4.2.3.5. Numérisation du bâtiment

Afin de faciliter la modélisation, une interface pour intégrer des données de BIM dans le logiciel Syrthes pourrait être faite. Ainsi, les différentes données récoltées via le BIM pourraient être utilisée pour la simulation des transferts hygrothermiques mais également pour la simulation des transferts thermiques à travers l'enveloppe du bâtiment.

4.2.1. Conclusions du retour d'expériences

L'utilisation de Syrthes pour la réalisation des études hygrothermiques au sein d'un bureau d'étude apporte de nombreuses possibilités. La performance du cœur de calcul, la possibilité d'y implémenter d'autres phénomènes physiques jusqu'alors non pris en compte, et l'utilisation de nouvelles propriétés thermophysiques de matériaux, permet au bureau d'étude de gagner en productivité, et en fiabilité des résultats. Le gain en productivité entraînera alors la réalisation d'un plus grand nombre d'études pour ainsi toucher le plus grand nombre de constructions. La possibilité de réaliser des études de

sensibilité est également un gros plus pour le bureau d'étude qui pourra alors facilement préconiser des produits plus performants écologiquement et énergétiquement. Enfin, développer toute l'automatisation de l'étude permettra aussi de gagner en productivité et en fiabilité. En revanche, pour que le logiciel puisse être utilisé par le plus grand nombre d'acteurs, un travail doit être apporté sur son ergonomie, pour ainsi gagner en facilité d'utilisation. Nous pensons notamment à la simplification de la création de la géométrie, quitte à ce qu'elle soit implémentée dans le logiciel Syrthes, pour ainsi ne plus avoir 3 logiciels à utiliser mais un seul pour faire l'ensemble de l'analyse. De nombreuses perspectives ont été annoncées et permettraient en partie de répondre aux enjeux actuels de la massification de la rénovation, grâce notamment à l'automatisation de la réalisation de l'étude et à la préconisation d'une conception adaptée.

ANNEXES

Annexe 1. Description des données utiles à SYRTHES

données physiques de base	**DONNÉES PHYSIQUES DE BASE CONSTANTES**			
	signification	symbole	unité	
	masse volumique du liquide	rhol	kg.m-3	
	masse volumique de l'air	rhot	kg.m-3	
	constante des gaz parfaits	r	J.mol-1.K-1	
	constante massique de la vapeur	rv	J.kg-1.K-1	
	constante massique de l'air sec	ras	J.kg-1.K-1	
	chaleur massique de l'eau liquide	cpl	J.kg-1.K-1	
	chaleur massique de l'air sec	cpas	J.kg-1.K-1	
	masse molaire de la vapeur	xmv	kg.mol-1	
	masse molaire de l'air sec	xmas	kg.mol-1	
	FONCTIONS GÉNÉRALES			
	signification	symbole	les dépendances	unité
	chaleur latente d'évaporation	fxl	T	J.kg-1
	dérivée de la chaleur latente d'évaporation	fdl	T	J.kg-1.K-1
	pression de vapeur saturante	Psat	T	Pa
	viscosité dynamique de l'eau	fxml	T	kg.m-1.s-1
	perméabilité à la vapeur d'eau de l'air	Piair	T	s

données matériaux	**CARACTÉRISTIQUES CONSTANTES DES MATÉRIAUX**			
	signification	symbole	unité	
	porosité du matériau sec	eps0	-	
	masse volumique du matériaux sec	rhos	kg,m-3	
	perméabilité intrinstèque	xk	m²	
	chaleur massique du matériaux sec	cs	J.kg-1.K-1	
	FONCTIONS CONSTANTES PAR MATÉRIAUX			
	signification	symbole	les dépendances	unité
	porosité du matériau humide	feps	tauv	-
	perméabilité au liquide	fxkl	T, xkrl, xml	s
	taux d'humidité volumique maximum	taumax	T	kg.m-3
	DONNÉES DES MATÉRIAUX SOUS FORME DES FONCTIONS			
	signification	symbole	les dépendances	unité
	taux d'humidité volumique	tauv	Pv, T	kg.m-3
	pente de l'isotherme de sorption	alphat	Pv, T	kg.m-3Pa-1
	perméabilité relative au liquide	xkrl	tauv	-
	conductivité thermique du matériau humide	lambt	tauv, T	J.s-1.m-1.K-1
	permébilité à la vapeur	Piv	Pv,T	kg.m-1.s-1
	chaleur latente complémentaire	hm	TAUV	J.kg-1
	la dérivée partielle de l'isotherme de sorption par rapport à T	betap	Pv, T, tauv	kg.m-3K-1
	fonction supplémentaire dhp	dhp	tauv, betap	J.kg-1.Pa-1
	fonction supplémentaire dhT	dhT	tauv, alphat	J.kg-1.K-1

Annexe 2. Calcul automatique des indicateurs de risque hygrothermique.

Risque 1. Humidification des matériaux

Echelle : Chaque matériau modélisé.

Indicateur : D'une année sur l'autre, le taux d'humidité moyen de chaque matériau n'augmente pas de plus de 2%, c'est-à-dire que le taux d'humidité moyen à la fin de l'année 2 n'excède pas de plus de 2% (en valeur relative) le taux d'humidité moyen à la fin de l'année 1.

Pour le calculer : Calcul du taux d'humidité moyen en fin d'année pour chaque matériau. Comparaison entre deux années successives.

Action si échec : Prolongation d'une année de la simulation (jusqu'à 10 ans). Si échec au bout de 10 ans : Affichage d'un message : « Risque 1 : Humidification des matériaux. Liste des matériaux concernés ».

Action si succès : Affichage d'un message : « Risque 1 : Humidification des matériaux. Aucun risque identifié ».

Remarques : La définition du critère suppose qu'une simulation ne peut pas durer moins de 2 ans.

Risque 2. Humidification du composant (si le risque 1 n'est pas identifié, alors a priori aucune raison d'évaluer le risque 2 et donc afficher directement le message de succès)**.**

Echelle : Tout le domaine modélisé.

Indicateur : D'une année sur l'autre, le taux d'humidité moyen du domaine modélisé n'augmente pas de plus de 2%, c'est-à-dire que le taux d'humidité moyen à la fin de l'année 2 n'excède pas de plus de 2% (en valeur relative) le taux d'humidité moyen à la fin de l'année 1.

Pour le calculer : Calcul du taux d'humidité moyen en fin d'année sur tout le domaine. Comparaison entre deux années successives.

Action si échec : Prolongation d'une année de la simulation (jusqu'à 10 ans). Si échec au bout de 10 ans : Affichage d'un message : « Risque 2 : Humidification du composant »

Action si succès : Affichage d'un message : « Risque 2 : Humidification du composant. Aucun risque identifié ».

Remarques : La définition du critère suppose qu'une simulation ne peut pas durer moins de 2 ans.

Risque 3. Développement fongique dans les matériaux biosourcés qui ne participent pas à la stabilité de la structure.

Echelle : Limités aux matériaux biosourcés non structurels. Sur des zones de 5 mm x 20 mm puisque le critère s'évalue par des valeurs moyennes du taux d'humidité massique (en %) sur ces zones.

Indicateur : **Le taux d'humidité massique** moyen sur une zone de 5 mm x 20 mm dépasse **20%** pendant plus de 56 jours par an en ne comptant que les périodes d'au moins 7 jours consécutifs.

Pour le calculer :

Le taux d'humidité concerné ici est exprimé en taux d'humidité massique (TétaM en %), c'est-à-dire par le rapport entre la masse d'eau et la masse de matériau sec exprimé en %. Avec SYRTHES, nous calculons une grandeur équivalente qui est Tauv (en kg/m3). La conversion nous donne l'équivalence suivante : La condition TétaM < X % est équivalent à la condition $Tauv < \frac{X.\rho_{mat}}{100}$

Donc le critère de défaut se traduit ici par **Tauv >= 0,2. Rhomat**.

Reste la question de la zone. Mais cette notion est très floue. Même les BET qui traitent de tels problèmes peinent à nous expliquer comment ils vérifient cela. On comprend qu'ils regardent près des pare-vapeurs et qu'ils interprètent même souvent la règle stricte. Du coup nous suggérerions bien de se contenter d'une alerte et pas d'une évaluation complète (voir la méthodologie proposée à la fin de cette note).

Action si échec : Affichage d'un message : « Risque 3 : Développement fongique dans les matériaux biosourcés. Risque possible dans la zone des nœuds X, Y, Z… »

Action si succès : Affichage d'un message : « Risque 3 : Développement fongique dans les matériaux biosourcés. Aucun risque identifié ».

Remarques :
La définition du risque suppose que l'on peut définir par un indicateur adapté les matériaux qui sont biosourcés et qui ne participent pas à la structure. Seul l'utilisateur a la responsabilité de le déclarer. A déclarer dans le mailleur ? Par quel moyen ? Ou alors on s'en fiche et on le calcule pour tous les matériaux et l'utilisateur verra bien s'il s'agit d'un matériau pour lequel la question se pose.

Risque 4. Pérennité des matériaux de structure en bois ou à base de bois.

Echelle : Limités aux matériaux de structure et à base de bois. Sur des zones de 5 mm x 20 mm puisque le critère s'évalue par des valeurs moyennes du taux d'humidité massique (en %) sur ces zones.

Indicateur : **Le taux d'humidité massique** moyen sur une zone de 5 mm x 20 mm dépasse **23%** pendant plus de 56 jours par an en ne comptant que les périodes d'au moins 7 jours consécutifs.

Pour le calculer :
Le taux d'humidité concerné ici est exprimé en taux d'humidité massique (TétaM en %), c'est-à-dire par le rapport entre la masse d'eau et la masse de matériau sec exprimé en %. Avec SYRTHES, nous calculons une grandeur équivalente qui est Tauv (en kg/m3). La conversion nous donne l'équivalence suivante : La condition TétaM < X % est équivalent à la condition $Tauv < \frac{X.\rho_{mat}}{100}$

Donc le critère de défaut se traduit ici par **Tauv >= 0,23. Rhomat**.

Reste la question de la zone. Mais cette notion est très floue. Même les BET qui traitent de tels problèmes peinent à nous expliquer comment ils vérifient cela. On comprend qu'ils regardent près des pare-vapeurs et qu'ils interprètent même souvent la règle stricte. Du coup nous suggérerions bien de se contenter d'une alerte et pas d'une évaluation complète (voir la méthodologie proposée à la fin de cette note).

Action si échec : Affichage d'un message : « Risque 4 : Pérennité des structures à base de bois. Risque possible dans la zone des nœuds X, Y, Z… »

Action si succès : Affichage d'un message : « Risque 4 : Pérennité des structures à base de bois. Aucun risque identifié ».

Remarques :
La définition du risque suppose que l'on peut définir par un indicateur adapté les matériaux qui sont biosourcés et qui ne participent pas à la structure. Seul l'utilisateur a la responsabilité de le déclarer. A déclarer dans le mailleur ? Par quel moyen ? Ou alors on s'en fiche et on le calcule pour tous les matériaux et l'utilisateur verra bien s'il s'agit d'un matériau pour lequel la question se pose.

Risque 5. Condensation dans la masse.

Echelle : Par matériau. Sur des zones de 5 mm x 20 mm puisque le critère s'évalue par des valeurs moyennes du taux d'humidité massique (en %) sur ces zones.

Indicateur : **L'humidité relative** moyenne sur une zone de 5 mm x 20 mm dépasse **98%** pendant plus de 56 jours par an en ne comptant que les périodes d'au moins 7 jours consécutifs.

Pour le calculer :
L'humidité relative est disponible à chaque nœud et chaque instant.

Action si échec : Affichage d'un message : « Risque 5 : Condensation dans la masse. Risque possible dans la zone des nœuds X, Y, Z… »

Action si succès : Affichage d'un message : « Risque 5 : Condensation dans la masse. Aucun risque identifié ».

Remarques : Aucune

Méthodologie possible commune pour le calcul de l'indicateur des 3 derniers risques

La méthodologie s'applique aux risques basés sur des valeurs limites pendant 56 jours par an en ne comptant que les périodes supérieures à 7 jours (de mémoire 3 indicateurs). Il s'agit d'une méthodologie qui ne calcule pas le risque précis tel qu'il est décrit ci-dessus, mais qui calcule un risque approché juste pour indiquer à l'utilisateur les zones à regarder de plus près.

Pour chaque risque n°i :
Pour chaque nœud (ou maille) de numéro n qui dépasse la limite : On ouvre un compteur de temps Compt-riski(n,t0, t0), avec t0 l'instant initial du dépassement de la limite.
Tant que la limite est dépassée, on prolonge le compteur en mettant à jour le temps t
Compt-riski(n,t0, t)
Dès que la compteur dépasse 7 jours (t-t0 >= 7 jours) on oublie la le compteur (on le réouvrira plus tard avec un autre t0 si une nouvelle période de dépassement s'ouvre lorsque celle qui nous intéresse maintenant sera fermée) et on ouvre une période : Perj-riski(n, t0, t). j est l'indice de la période pour le nœud n et le risque i.
Tant que ça dépasse toujours, la période reste ouverte et le temps t augmente. Et dès que la limite n'est plus dépassée, la période se termine à tf. Perj-riski(n,t0, tf).
Pour chaque noeud (ou maille) on obtient ainsi un ensemble de périodes.
La somme des tf-t0 pour chaque période donne la durée totale.
Si cette durée est supérieure ou égale à 56 jours, on retient le nœud (ou la maille) comme nœud (maille) à risque pour le risque i.

On affiche ce nœud en rouge dans le post-processeur. Et on fait ça pour chacun des 3 risques. Cartes du risque i.

Annexe 3. Intégration de conditions aux limites pour la pluie battante

L'approche que l'on pourrait proposer :

Le problème est de passer de données météo (pluviométrie, vitesse et direction du vent) à un flux liquide à la surface d'une paroi définie par son orientation (a priori orientation – direction vue par la surface extérieure - et inclinaison – par rapport à un plan horizontal - peuvent être définies par la normale sortante de cette surface).

Le flux liquide (entrant dans la surface) prendrait la forme d'un terme du type :

$$\Phi_l = \hbar_l (P_{lext} - P_{lsurf})$$

Pour Plext deux approches sont possibles :

- Une approche simple pour laquelle on prend systématiquement Plext = Patm=101325 Pa.
- Une approche plus complexe où Plext dépend de l'inclinaison et de l'orientation de la paroi, avec des variantes :
    - Si la paroi est horizontale :
      Alors Plext peut prendre la forme :
      $$P_{lext} = P_{atm} + \rho_l g h$$
      Mais il faut gérer la hauteur d'eau (valeur directe de la pluviométrie, mais qu'il faudrait alors diminuer de ce qui rentre dans le matériau, de ce qui s'évapore, …)
    - Si la paroi n'est pas horizontale :
      Alors Plext peut prendre la forme :
      $$P_{lext} = P_{atm} + \frac{1}{2}\rho_{air} V^2$$
      Avec V qui serait la composante du vent projetée sur le vecteur normal à la paroi.

Ceci-dit un calcul rapide montre qu'il faudrait 10 cm d'eau ou un vent à plus de 160 km/h pour que le terme supplémentaire de pression liquide représente 1% de la pression atmosphérique. **Donc la version Plext=Patm semble très raisonnable**.

Pour Plsurf, on s'appuie sur la valeur locale de la température et de l'humidité relative et on utilise la loi de Kelvin :

$$P_{lsurf} = P_{atm} + \rho_l r_v T_{surf} ln\left(HR_{surf}\right)$$

En conséquence, le flux liquide entrant dans la surface s'exprime par :

$$\Phi_l = -\hbar_l \rho_l r_v T_{surf} ln\left(HR_{surf}\right)$$

Pour $\hbar_l$:
Il y a d'abord des surfaces imperméables à l'eau liquide (les parois métalliques, les enduits qui sont faits pour ça, …) pour lesquelles $\hbar_l = 0$
Pour les autres surfaces, c'est à préciser peut-être, mais on peut avoir l'objectif de viser des valeurs permettant d'avoir des conditions proches de la première espèce, c'est-à-dire avec une pression de surface proche de la pression extérieure. Pour cela, étant donnés les ordres de grandeur des pressions liquides, il semble raisonnable de viser un $\hbar_l$ de l'ordre de 0,1 kg/(m^{2}sPa).

L'approche (difficilement compréhensible) du CSTB :

Dans le rapport final du projet SimHuBat (2020), le CSTB explique à sa façon la **quantité de pluie disponible pour l'absorption d'eau** sur une surface de paroi. Il semble que cette règle vienne de WUFI (puisque le modèle évoqué est de H. Künzel, le développeur de WUFI), mais ce n'est pas indiqué dans

le rapport. Ce qu'on croit comprendre, c'est que la quantité d'eau (sans unité dans le rapport) disponible pour l'absorption s'écrit :

$$Q = a_r R_h (R_1 + R_2 U cos\theta)$$

- U non défini !
- θ défini comme l'angle d'incidence entre la normale à la paroi et la vitesse du vent.
- Rh (qui donne son unité à Q !) est définie comme la « précipitation » sur un plan horizontal. On peut donc penser qu'on prend là l'unité qu'on veut, mais ça doit ressembler à une masse ou une hauteur d'eau par m2 et pendant un temps donné (donc un débit). Il faudrait voir comment ça se présente dans les fichiers météo.
- a_r est un coefficient d'accommodation qui traduit le ruissellement :
    - Il vaut 0,7 pour les parois verticales (ruissellement maximal)
    - Il vaut 1 pour toutes les autres parois.
- R1 et R2 sont des coefficients qui dépendent de l'inclinaison de la surface extérieure par rapport à l'horizontal (inclinaison de 90° = surface verticale, inclinaisons de 0° = surface horizontale qui voit le ciel, inclinaison de 45° = surface inclinée qui voit le ciel, inclinaison de 135°C = surface inclinée qui ne voit pas le ciel) et de la hauteur de la paroi étudiée (plus exposée si elle est plus haute). Ce qui permet de définir les règles suivantes :
    - Pour toute surface inclinée à plus de 90° (qui ne voit pas le ciel) : Pas de pluie incidente : R1=R2=0
    - Pour toute surface inclinée à moins de 90° : Pas d'effet du vent : R2=0 et R1=1.
    - Pour les surfaces inclinées à 90° (verticales) : Effet du vent : R1=0, R2 = 0,07 si la hauteur est inférieure à 10 m ou R2=0,2 dans le cas contraire.

Ce qui étonne là-dedans (hormis les notions mal définies (angle d'incidence) ou pas définies du tout (unité de Rh, coefficient U), c'est le traitement en 2D dans un plan vertical des surfaces (inclinaison) et en 2D dans un plan horizontal de la vitesse du vent (orientation du vent). Par exemple on peut penser qu'une surface orientée à l'ouest et inclinée de 135°C sur l'horizontale peut prendre les pluies venant de l'ouest, mais ne prendra pas celles qui viennent de l'est. Alors qu'avec ce modèle elle ne prend de pluie dans aucun cas. A l'inverse une surface orientée à l'ouest avec une inclinaison de 45° prendra toujours la pluie alors qu'elle ne peut pas prendre celle qui vient de l'est…

Mais que peut-on faire de tout cela en pratique ? Le texte du CSTB est assez laconique : « La quantité d'eau disponible pour absorption à la surface sera le plus souvent supérieure à celle pouvant être effectivement absorbée par la façade (à l'exception notamment des murs maçonnés et des murs en pierre sans enduit) ». Et globalement, la quantité d'eau disponible à la surface, ne donne pas un flux. Et rien ne permet en pratique dans nos modèles de calculer le bilan de l'eau disponible.

<u>Tentative d'utilisation de l'approche CSTB :</u>

Déjà, il faut fortifier le passage au calcul de la méthode proposée pour l'évaluation de la quantité d'eau disponible Q. Pour cela on peut suggérer d'adopter les idées suivantes.

- Un vecteur normé en 3D pour la normale sortante à la paroi np (xp, yp, zp)
- Un vecteur normé en 3D pour la vitesse du vent nv (xv, yv, zv=0). La composante zv est nulle car la vitesse du vent des fichiers météo est toujours définie dans le plan horizontal.
- Du coup on peut écrire cosθ =$\overrightarrow{np}.\overrightarrow{-nv}$
    - Si zp<0 : La paroi voit le sol. Pas de flux liquide
    - Si zp>0 : La paroi n'est pas verticale et voit le ciel. Alors ar=1, R1=1 et R2=0. Ainsi Q=Rh (la pluviométrie mesurée par la station météo)
    - Si zp=0 : La paroi est verticale alors R1=0 et ar=0,7
        - Si la hauteur de la paroi est supérieure à 10 m : R2=0,2
        - Sinon R2=0,07

Q=Max(0 ; 0,7.Rh.R2.cosθ) car avec notre définition de cosθ, si le cosinus est négatif c'est qu'il pleut au dos de la surface dont on s'occupe, donc la quantité d'eau disponible est nulle.

Il reste alors à calculer le flux lorsque Q n'est pas nul.

- On peut suggérer une méthode bourrin qui dit que si Q donné par le fichier météo au pas de temps de calcul n'est pas nul alors $\Phi_l = -\hbar_l \rho_l r_v T_{surf} ln\left(HR_{surf}\right)$.
  Ca revient à dire que s'il a plu pendant le pas de temps, peu importe la quantité d'eau disponible Q, il y en a assez pour faire un flux liquide si la surface n'est pas protégée ou étanche à l'eau liquide.
- On peut aussi suggérer une méthode à peine moins bourrin qui dit que si Q>Lim (à définir, par exemple 10^{-3} mm d'eau) alors $\Phi_l = -\hbar_l \rho_l r_v T_{surf} ln\left(HR_{surf}\right)$
- Ou peut-être aussi une méthode qui compare Q et Φ_l.dt et qui prend comme flux entrant le plus petit des deux (si Q est la quantité disponible pendant tout le pas de temps – ce qui ne dépend que de la façon dont Rh est mesuré dans les stations météo – le flux liquide serait alors Q/dt).

Et puis il reste le cas où Rh est nul (donc Q calculé au pas de temps par la méthode précédente est nul aussi, mais il a cessé de pleuvoir). Ca ne signifie pas pour autant que la surface est sèche, donc que Q est nul. Mais pour cela, il faudrait a minima faire un bilan rétroactif entre l'eau envoyée dans le matériau et celle qui a été disponible… Ca me semble un peu compliqué.

Les données à entrer par l'utilisateur seraient alors :
Le coefficient $\hbar_l$ (kg/(m^2.Pa.s))
Orientation et inclinaison de la surface (ou vecteur normal à la surface)
Vecteur vitesse du vent (mais a priori la direction suffit, par exemple le vecteur normé selon le sens et la direction du vent)
Hauteur de la paroi

Et il faudrait que le fichier météo intègre la pluviométrie.